

COMMITTENTE:



0392

ALTA SORVEGLIANZA:



CONTRAENTE GENERALE



**PROGETTO ESECUTIVO** DI 1° LIVELLO

**LINEA FERROVIARIA MILANO-NAPOLI  
NODO DI FIRENZE - PENETRAZIONE URBANA LINEA A.V.  
PASSANTE A.V.  
Lotto 2**

ELABORATO: **GALLERIE NATURALI  
RELAZIONE TECNICO-DESCRITTIVA GENERALE**

ITALFERR		CONTRAENTE GENERALE		DIREZIONE LAVORI		Data	
Vidimato	Data	OGG. DELLA SOC. CONS. PER AZIONI OGG. DIRETTORE TECNICO VIA SAN BIAGIO, 75 42024 CASTELNOVO DI SOTTO (RE) C. F. e P. IVA 0221990351 TEL. 0522 961111					
PE_ITALFERR							

COMMESSA	LOTTO	FASE	ENTE	TIPO DOC.	OPERA/DISCIPLINA	PROGR.	REV.	SCALA
<b>F E W 1</b>	<b>4 0</b>	<b>E</b>	<b>Z Z</b>	<b>R G</b>	<b>G N 0 0 0 0</b>	<b>0 0 1</b>	<b>C</b>	-

PROGETTAZIONE CONTRAENTE GENERALE: Aspetti generali: AMBIENTE - DURAZZANI - GECECO Progetti  
 Strutture - Architettura: SWS Engineering - Studio MAJOWECKI - OPEN PROJECT - Studio LEMBO FAZO - ECI Eco Consulting Ingegneria  
 Implantistica: ANSALDO - BETA PROGETTI - T.e T.I. - TESIFER

Revis.	Descrizione	Redatto	Data	Verificato	Data	Approvato	Data	Autorizz./Data
A	Emissione	Ing. Oss	21/02/2008	Ing. Cucino	22/02/2008	Ing. Lanzafame	25/02/2008	Ing. Fuoco
B	Revisione per CdL 409 del 08/05/09	Ing. Oss	22/06/09	Ing. Cucino	24/06/09	Ing. Lanzafame	26/06/09	
C								

ORDINE DEGLI INGEGNERI  
 DELLA PROV. DI TRENTO  
 S. SEMO FUOCO  
 C. F. e P. IVA N° 2897

File: FEW1_40_E_ZZ_RG_GN0000_001_B.doc	Codifica GC:	n. Elab.:
--	--------------	-----------

Committente Principale <b>RFI</b>	Alta Sorveglianza <b>ITALFERR</b>	Contraente Generale <b>NODAVIA s.c.p.a.</b>
<b>PASSANTE – LOTTO 2</b> GALLERIE NATURALI RELAZIONE TECNICO-DESCRITTIVA GENERALE		<b>PROGETTO ESECUTIVO DI I LIVELLO</b>

## INDICE

1.	INTRODUZIONE .....	3
1.1	GENERALITÀ .....	3
1.2	TERMINI DI RISPONDEZZA DEL P.E. AL P.D. ....	3
1.3	BREVE INQUADRAMENTO DELL'OPERA .....	4
2.	STUDIO GEOLOGICO GEOTECNICO.....	8
3.	TRACCIATO DELLE GALLERIE .....	11
4.	GALLERIE A SEMPLICE BINARIO ESEGUITE CON METODO MECCANIZZATO .....	12
4.1	SEZIONE TIPO A DOPPIA CANNA .....	12
4.2	SCELTA DEL METODO DI SCAVO .....	13
4.3	ANALISI DEGLI EFFETTI DEI CEDIMENTI SULLE OPERE IN SUPERFICIE .....	15
4.4	INTERVENTI DI SALVAGUARDIA .....	18
4.5	COMPENSATION GROUTING PER GLI EDIFICI 165,166 E I BASTIONI DELLA FORTEZZA DA BASSO 19	
4.6	INTERVENTO DI SOTTOFONDAZIONE SPALLA DEL PONTE AL PINO.....	20
4.7	CONSOLIDAMENTO PER LO SBOCCO A RIFREDI .....	21
4.8	MONITORAGGIO IN CORSO D'OPERA .....	21
4.9	MONITORAGGIO INTERNO .....	21
4.10	MONITORAGGIO ESTERNO.....	22
4.11	CUNICOLI DI COLLEGAMENTO.....	22
5.	GALLERIE A DOPPIO BINARIO DI PRECEDENZA .....	24
5.1	SEZIONE TIPO .....	24
5.2	SCELTA DEL METODO DI SCAVO E CONSOLIDAMENTO .....	25
5.3	POZZO COSTRUTTIVO NORD.....	25
5.4	FASI ESECUTIVE.....	26
6.	OPERE ACCESSORIE.....	28
6.1	POZZO D'AGGOTTAMENTO.....	28
6.2	POZZI DI VENTILAZIONE SUD .....	28

Committente Principale <b>RFI</b>	Alta Sorveglianza <b>ITALFERR</b>	Contraente Generale <b>NODAVIA s.c.p.a.</b>
PASSANTE – LOTTO 2 GALLERIE NATURALI RELAZIONE TECNICO-DESCRITTIVA GENERALE		<b>PROGETTO ESECUTIVO DI I LIVELLO</b>

## 1. INTRODUZIONE

### 1.1 Generalità

La presente relazione sintetizza tutti gli aspetti caratterizzanti questa fase di Progettazione Esecutiva della Penetrazione Urbana del Passante Ferroviario A.V. a Firenze.

L'obiettivo è quello di fornire un quadro sintetico delle soluzioni di progetto adottate per le opere civili, nonché inquadrare gli aspetti connessi alla sicurezza ed all'impatto generato dall'intervento sull'ambiente circostante.

La relazione, oltre ad accertare la rispondenza al Progetto Definitivo, che ha già superato l'iter approvativi presso gli enti di riferimento, fornisce gli elementi necessari per dimostrare la rispondenza del progetto alle finalità cui è preposta l'opera stessa descrivendone tutte le scelte sviluppate.

### 1.2 Termini di rispondenza del P.E. al P.D.

Il Progetto Esecutivo è stato sviluppato in pieno accordo con le indicazioni contenute nel Progetto Definitivo e ne è un suo naturale sviluppo.

Il P.E. mantiene e sviluppa le soluzioni ed i concetti di base su cui è stato sviluppato il P.D..

Le modeste variazioni apportate riguardano solamente adattamenti tecnici derivanti dal naturale approfondimento dei dati nonché dall'approfondimento delle analisi di dettaglio. Alcune variazioni sono altresì connesse puramente ad aspetti costruttivi e di organizzazione del cantiere.

Più in particolare, come meglio esposto nel seguito, il P.E. è stato sviluppato ripercorrendo il seguente schema concettuale:

#### **Geologia:**

Sono stati integrati gli studi relativi alle zone geologicamente più incerte ed interessate da opere specifiche e specialistiche che necessitano di indagini puntuali sia in sito che in laboratorio. Queste indagini hanno permesso di dimensionare nel dettaglio aspetti specifici e puntuali di particolare interesse.

#### **Caratteristiche del sistema, Tracciato e Sezioni tipo:**

Non è stata apportata alcuna modifica/variazione sostanziale al sistema previsto in P.D. in termini di sistema ferroviario riproponendo una galleria a doppia con cunicoli trasversali di collegamento.

Il tracciato della linea ripercorre esattamente quanto previsto in P.D. apportando minimi adattamenti per l'adeguamento della linea agli standard previsti.

Le sezioni tipo della galleria sono rimaste pressoché analoghe a quelle previste in P.D.

#### **Aerodinamica e sicurezza**

I concetti base inerenti l'aerodinamica e la sicurezza assunti per lo sviluppo della progettazione esecutiva sono analoghi a quelli previsti in sede di P.D. apportando opportuni adattamenti al concetto di sicurezza in galleria al fine di rendere il progetto sviluppato in P.E. rispondente al sopravvenuto decreto ministeriale del 28 ottobre 2005 riferito all "Sicurezza nelle Gallerie Ferroviarie".

Committente Principale <b>RFI</b>	Alta Sorveglianza <b>ITALFERR</b>	Contraente Generale <b>NODAVIA s.c.p.a.</b>
PASSANTE – LOTTO 2 GALLERIE NATURALI RELAZIONE TECNICO-DESCRITTIVA GENERALE		<b>PROGETTO ESECUTIVO DI I LIVELLO</b>

### **Aspetti costruttivi**

Le linee generali degli aspetti costruttivi sono stati mantenuti invariati rispetto al P.D. sia in termini di modalità di scavo (utilizzo di sistema meccanizzato a pressione di fango), sia per quanto riguarda tempistiche.

Anche per quanto riguarda le problematiche inerenti lo smarino del materiale di scavo sono stati mantenuti i concetti sviluppati a base di P.D. privilegiando il trasporto su ferro dei materiali evacuati ed approvvigionati.

### **Aspetti ambientali**

Il P.D. prevedeva un concetto generale di compatibilità ambientale che è stato sostanzialmente mantenuto e sviluppato.

## **1.3 Breve inquadramento dell'opera**

Quanto vi descritto riguarda il Progetto Esecutivo delle gallerie naturali previste per il passante ferroviario nella città di Firenze della linea Alta Velocità Milano-Napoli.

Il passante AV prevede la costruzione di una coppia di nuovi binari che si svilupperanno in galleria nel tratto urbano compreso tra le attuali stazioni di Firenze Campo di Marte e di Firenze Rifredi lungo il quale è anche prevista la nuova stazione AV in sotterraneo.

Le gallerie naturali, oggetto della presente relazione, si estendono con continuità per una lunghezza complessiva di circa 5000 m tra l'imbocco di Campo di Marte (Sud) e quello di Rifredi (Nord), interrotte solo dalla nuova stazione AV posta a circa 3000 m dall'imbocco Sud.

Il sistema delle gallerie naturali di linea è costituito da due gallerie a semplice binario che corrono affiancate dagli imbocchi alla stazione. Ciascuna galleria in corrispondenza degli ingressi/uscite della nuova stazione AV presenta una sezione più larga per contenere, oltre al binario di corsa, anche il binario di precedenza con la relativa comunicazione e tronchino di sicurezza. Le gallerie a doppio binario di ingresso/uscita della stazione denominate nel seguito "di precedenza" sono lunghe circa 60 m, realizzate, nel tratto a nord, tra la stazione e pozzo costruttivi Nord, a sud tra stazione e By Pass n° 8 denominato Galleria Costruttiva Sud e di cui si dirà nel seguito.

Completano il sistema delle opere in sotterraneo attinenti le gallerie naturali, i cunicoli di collegamento per la sicurezza dei passeggeri tra le due gallerie a semplice binario (by-pass), i pozzi di ventilazione e il pozzo di aggettamento. Tutte queste opere saranno descritte nel seguito e sono illustrate più diffusamente nelle specifiche relazioni. Le opere di imbocco sono trattate in altre relazioni.

In questa introduzione si fornirà un elenco delle gallerie naturali, delle principali opere ad esse relative e un sommario dei principali temi affrontati nella progettazione.

Procedendo da Nord verso Sud la configurazione finale delle gallerie naturali si presenta come segue (le progressive sono riferite al binario pari):

- Due gallerie affiancate a semplice binario di sezione circolare di diametro interno di 8.3 m dalla progr. 1+317.76 (imbocco Sud) alla progr. 4+252.00 (inizio galleria di precedenza tratto sud);
- Due gallerie di sezione policentrica a doppio binario dalla progr. 4+252.00 (inizio galleria di precedenza tratto sud) alla progr. 4+323.64 (inizio banchina e camerone stazione AV);

Committente Principale <b>RFI</b>	Alta Sorveglianza <b>ITALFERR</b>	Contraente Generale <b>NODAVIA s.c.p.a.</b>
<b>PASSANTE – LOTTO 2</b> GALLERIE NATURALI RELAZIONE TECNICO-DESCRITTIVA GENERALE		<b>PROGETTO ESECUTIVO DI I LIVELLO</b>

- Due gallerie di sezione policentrica a doppio binario dalla progr. 4+776.44 (fine banchina e camerone stazione AV) alla progr. 4+838.71 (inizio pozzo costruttivo e di ventilazione nord);
- Due gallerie affiancate a semplice binario di sezione circolare di diametro interno di 8.3 m dalla progr. 4+850.91 (fine pozzo costruttivo e di ventilazione nord) alla progr. 6+891.20 (imbocco Nord).

Le gallerie a semplice binario verranno eseguite mediante fresa a pressione del fronte, mentre le gallerie di precedenza verranno scavate con metodo tradizionale e l'uso della tecnologia del congelamento per il consolidamento e l'impermeabilizzazione del terreno. La fresa avvierà lo scavo a partire dall'imbocco di Campo di Marte, e terminerà lo scavo con uscita nell'imbocco Nord di Rifredi operando prime per lo scavo della canna del binario pari e successivamente, sempre operando da sud verso nord, il binario dispari.

Le gallerie a semplice binario sono collegate ad intervalli variabili compresi tra 410 m e 490 m da 13 cunicoli di sicurezza per l'evacuazione dei passeggeri in caso di incidente.

Rientrano tra le opere accessorie per l'esercizio e la sicurezza delle gallerie le seguenti costruzioni:

- Una camera di sconnessione dei fumi Nord tra le gallerie e la stazione AV e di alloggiamento impianti tecnologici tra le progr. 4+838.71 e 4+850.91 (denominata Pozzo costruttivo e di ventilazione Nord). E' costituita da un camerone interrato (indicato in seguito e negli elaborati come pozzo) utilizzato in fase esecutiva per lo scavo delle gallerie a doppio Binario lato Nord e per la traslazione delle frese in ripartenza;
- Pozzi di sconnessione dei fumi Sud tra le gallerie e la stazione AV posti in corrispondenza delle gallerie a doppio binario Sud alla progressiva 4+315.24;
- Un pozzo di accumulo acque di infiltrazione delle gallerie munito di pompe di aggettamento alla progressiva 3+140.14;

La rappresentazione schematica delle opere elencate è riportata nell'elaborato "pianta schematica con ubicazione nicchie, gallerie di collegamento e opere accessorie"

Per l'esecuzione delle gallerie sono previste, con funzione prevalentemente costruttiva oltre agli imbocchi la seguente opera:

- Una camera di manovra realizzata negli ultimi 30 m della galleria di precedenza a doppio binario lato binario dispari tratto nord per la traslazione della fresa che dovrà riallinearsi in asse al binario dispari per lo scavo della tratta a singolo binario nord.

Per la sicurezza degli scavi e la salvaguardia di alcune interferenze sottopassate dalle gallerie a semplice binario, sono previsti, inoltre, alcuni lavori di consolidamento eseguiti dalla superficie. Si elencano procedendo da Nord a Sud:

- Consolidamento del terreno superficiale mediante trattamenti colonnari dall'alto dello sbocco delle frese a bassa copertura in zona Rifredi;
- Consolidamento mediante trattamenti colonnari dall'alto dei fronti del pozzo Nord e del camerone della nuova stazione A.V. tratto sud lato binario dispari dove le frese sono in entrata ed uscita;
- Controllo dei cedimenti mediante iniezioni cementizie (metodo del compensation grouting) per i bastioni murari del monumento storico di Fortezza da Basso;

Committente Principale <b>RFI</b>	Alta Sorveglianza <b>ITALFERR</b>	Contraente Generale <b>NODAVIA s.c.p.a.</b>
<b>PASSANTE – LOTTO 2</b> GALLERIE NATURALI RELAZIONE TECNICO-DESCRITTIVA GENERALE		<b>PROGETTO ESECUTIVO DI I LIVELLO</b>

- Controllo dei cedimenti mediante iniezioni cementizie (metodo del compensation grouting) per due edifici posti a circa 100 m dall'avvio delle frese all'imbocco di Campo di Marte;
- Consolidamento delle fondazioni della spalla del cavalcavia ferroviario "ponte al Pino" mediante micropali, posto anch'esso a circa 100 m dall'imbocco delle frese;
- Consolidamento mediante pali plastici del fronte di imbocco delle frese a Campo di Marte.

Il progetto esecutivo delle gallerie naturali è stato sviluppato in conformità al P.D. e pertanto a quanto approvato nella conferenza dei servizi sia del passante che della stazione e delle relative prescrizioni e accordi intersocietari. In particolare, oltre al dimensionamento e alle verifiche delle opere, il progetto comprende uno studio della cantierizzazione e delle fasi costruttive, nonché la scelta di modalità di scavo orientate al massimo contenimento dei disturbi indotti alle attività cittadine e al patrimonio edilizio esistente. I cantieri principali sono stati concentrati nelle aree ferroviarie poste agli imbocchi e nella zona della nuova stazione, il trasporto delle terre è previsto mediante l'uso di treni e le tecniche di scavo scelte assicurano il contenimento dei cedimenti in superficie entro limiti accettabili per la sicurezza e la conservazione delle preesistenze. Il progetto comprende anche un diffuso monitoraggio in corso d'opera che prevede misure in superficie e sulle opere esistenti allo scopo di dare evidenza ai terzi degli effetti dagli scavi in sottoterraneo, di verificare l'efficacia delle tecnologie utilizzate e di prevenire la produzione di danni e disturbi alle opere preesistenti.

La scarsa profondità delle gallerie che attraversano terreni sciolti sotto falda e la presenza in superficie di un territorio densamente urbanizzato ha richiesto un approfondimento dello studio geologico-tecnico già condotto sulla base di una estesa e completa campagna di sondaggi e prove, mentre per quanto concerna il censimento delle preesistenze sottoattraversate in superficie ci si è riferiti a quanto ereditato dalle fasi progettuali precedenti (P.P e P.D.).

Lo studio geologico e la caratterizzazione geotecnica è comune a tutto il tracciato.

Il progetto delle gallerie naturali è stato suddiviso in tre parti:

1. Gallerie naturali eseguite con sistema meccanizzato nella quale vengono trattati i seguenti temi:
  - le sezioni tipo;
  - i calcoli di stabilità degli scavi e dei rivestimenti;
  - le macchine di scavo a pressione del fronte;
  - l'analisi delle interferenze in superficie;
  - gli interventi di salvaguardia delle opere interferenti;
  - il monitoraggio;
  - i cunicoli di collegamento;
2. Galleria a doppio binario di precedenza nella quale vengono affrontati i seguenti argomenti:
  - le sezioni tipo;
  - i calcoli di stabilità degli scavi e del rivestimento definitivo delle gallerie;
  - i calcoli di stabilità delle opere di sostegno dei pozzi e delle strutture definitive;
  - le fasi esecutive dei pozzi e delle gallerie;

Committente Principale <b>RFI</b>	Alta Sorveglianza <b>ITALFERR</b>	Contraente Generale <b>NODAVIA s.c.p.a.</b>
<b>PASSANTE – LOTTO 2</b> GALLERIE NATURALI RELAZIONE TECNICO-DESCRITTIVA GENERALE		<b>PROGETTO ESECUTIVO DI I LIVELLO</b>

- il congelamento del terreno;
- il monitoraggio;

3. Opere accessorie:

- calcoli di stabilità delle opere di sostegno dei pozzi e delle opere definitive;
- fasi esecutive

Committente Principale <b>RFI</b>	Alta Sorveglianza <b>ITALFERR</b>	Contraente Generale <b>NODAVIA s.c.p.a.</b>
<b>PASSANTE – LOTTO 2</b> GALLERIE NATURALI RELAZIONE TECNICO-DESCRITTIVA GENERALE		<b>PROGETTO ESECUTIVO  DI I LIVELLO</b>

## 2. STUDIO GEOLOGICO GEOTECNICO

Lo studio geologico e idrogeologico e la caratterizzazione geotecnica dei terreni attraversati dalle gallerie è particolarmente importante nel contesto dell'attraversamento urbano di Firenze, sia per la complessità stratigrafica e geotecnica in cui si opererà lo scavo, che per le condizioni di copertura e di interferenza in superficie.

Già nel corso dei precedenti sviluppi progettuali (progetto di massima e progetto definitivo) sono stati svolti approfonditi studi geologico-tecnici per verificare la fattibilità degli scavi, per scegliere le tecnologie di scavo e valutare le possibili interferenze degli stessi con l'ambiente e le costruzioni urbane. A tale scopo nelle precedenti fasi progettuali si è ricorso alla consulenza dei prof. Coli e Pranzini dell'Università di Firenze rispettivamente per lo studio geologico e per lo studio idrogeologico, scelti tra i maggiori esperti della geologia e idrogeologia dell'area Fiorentina. Lo studio geologico-geotecnico presentato è in continuità e coerenza con il lavoro svolto in P.D. e aggiornato per tener conto della campagna d'indagine integrativa eseguita nel corso del 2007. Visto il numero considerevole di indagini eseguite nelle fasi precedenti nella campagna integrativa proposta per lo sviluppo del P.E. ci si è concentrati nell'esecuzione di studi mirati alla taratura di siti e contesti specifici connessi alle opere di maggior interesse. Lo studio, oltre che sui dati storici e di bibliografia, si è basato su n° 121 sondaggi con relative prove eseguiti direttamente per la progettazione nelle fasi geognostiche precedenti integrate con n°39 tra sondaggi e prove penetrometriche statiche. Su una lunghezza investigata di 7000 metri fornisce una densità media di sondaggi pari a 1 sondaggio ogni 50 m. La distanza massima tra due sondaggi è sempre inferiore a 150m.

Sono state eseguite prevalentemente indagini geognostiche di tipo diretto ed in particolare sondaggi a carotaggio continuo, intervallati mediamente 50-100 m l'uno dall'altro, spinti ad una profondità di circa un diametro al disotto dell'arco rovescio, con esecuzione di prove in sito (SPT, pressiometriche, Lefranc, cross-hole e down-hole) e prelievo di campioni sottoposti ad analisi di laboratorio.

Gran parte dei fori di sondaggio sono stati attrezzati con piezometro e alcuni di essi sono stati strumentati con doppio piezometro di tipo Casagrande, uno ubicato a quota calotta ed uno a quota arco rovescio. Alcuni piezometri sono stati installati nelle formazioni superficiali soprastanti il cavo della galleria, al fine di rilevare il regime idrodinamico nella falda superficiale ed in quella profonda, eseguendo a tale scopo prove di emungimento da pozzi opportunamente perforati ed attrezzati.

Il passante ferroviario A.V. attraversa una vasta zona di pianura alluvionale, in prevalenza costituita dai sedimenti fluviali e torrentizi dell'Arno e dei suoi affluenti, appoggiati su depositi di natura lacustre.

La distribuzione spaziale dei depositi, funzione dell'energia e della capacità di trasporto del mezzo, risulta spesso assolutamente casuale con passaggi eteropici e repentini dalle frazioni grossolane a quelle fini, e frequenti discontinuità stratigrafiche, in gran parte corrispondenti a fenomeni erosivi.

Considerando la natura dei depositi e la loro disposizione spaziale piuttosto caotica, si è deciso di adottare una nuova classificazione, rivedendo l'intera successione clastica neogenica dell'area fiorentina, secondo il criterio delle UBSU (Unità Stratigrafiche a Limiti Inconformi) suggerito dal Servizio Geologico Nazionale (S.G.I., 1992) e dal Consiglio Nazionale delle Ricerche (C.N.R., 1991), in modo da definire per i diversi corpi sedimentari, oltre ai reciproci rapporti spaziali anche il legame con le aree di provenienza.

I terreni studiati sono stati pertanto suddivisi in Sintemi a loro volta raggruppati in Supersintemi o divisibili in Subsintemi.

Committente Principale <b>RFI</b>	Alta Sorveglianza <b>ITALFERR</b>	Contraente Generale <b>NODAVIA s.c.p.a.</b>
PASSANTE – LOTTO 2 GALLERIE NATURALI RELAZIONE TECNICO-DESCRITTIVA GENERALE		<b>PROGETTO ESECUTIVO DI I LIVELLO</b>

Lo scavo delle gallerie naturali interesserà tre unità sedimentarie che, dalle più antiche alle più recenti, sono: le Argille turchine del Supersistema del Lago Firenze-Prato-Pistoia, i depositi del Supersistema di Firenze e quelli del Supersistema dell'Arno.

#### **Supersistema del Lago Firenze-Prato-Pistoia (Argille turchine)**

Sono i sedimenti più antichi, di origine lacustre, sovraconsolidati, costituiti prevalentemente da argille sabbiose o limose o da limi argillosi, contenenti frequenti inclusi ghiaiosi di origine calcarea. Tali termini presentano una consistenza da solido-plastica a solida, con  $I_c$  prossimo a superiore all'unità. In alcune zone sono presenti lenti e strati di ghiaie sabbiose o limose mediamente addensate ( $D_r = 50\%$ ).

L'indice plastico è generalmente compreso tra 16 e 32 ma può anche raggiungere valori di 45, hanno una buona resistenza al taglio a breve termine, con valori di  $c_u$  solitamente compresi tra 150 e 250 kPa, mentre per i parametri a lungo termine si può assumere  $c' = 28$  kPa e  $\phi' = 24^\circ$ .

La permeabilità è in genere minore di  $1E-7$  m/s anche se sono stati misurati valori di  $1E-5$  m/s, riferibili a zone maggiormente ricche di materiali granulari con scarsa matrice fine.

#### **Depositi del Supersistema di Firenze**

Si possono distinguere due litofacies:

- argille sabbiose e limose, o limi argillosi, a consistenza semisolida ( $I_c$  compreso tra 0.75 e 1), da poco a mediamente plastiche, con livelli ghiaiosi sabbiosi addensati e con contenuto variabile di limo. Nelle ghiaie sono stati rinvenuti ciottoli di natura arenacea della dimensione dei 100÷150 mm di diametro, e a volte anche superiore ai 200 mm. Si tratta di materiali di natura lacustre o fluvio-lacustre, che rispetto ai terreni del Supersistema di Firenze precedentemente citati, presentano una maggiore frequenza di lenti ghiaiose sabbiose addensate rispetto ai livelli argillosi. I termini coesivi presentano una resistenza a breve termine mediamente elevata, con valori per la  $c_u$  compresi tra 90 e 170 (KPa), mentre a lungo termine le caratteristiche di resistenza presentano valori di  $c' = 10$  kPa e  $\phi' = 28^\circ$ . I termini granulari risultano in genere addensati ( $D_r = 70\%$ ). La permeabilità da prove Lefranc è medio-bassa, stimabile attorno a  $1E-7$  m/s.
- ghiaie eterometriche con ciottoli (diam. max > 10 cm), poligenica, in matrice da limoso argillosa a limoso sabbiosa; a volte sono intercalati livelli limoso argillosi o limoso sabbiosi (di spessore massimo intorno al metro). Si tratta di materiali attribuiti alla sedimentazione del paleo-Arno. Sono terreni addensati con valore di densità relativa  $D_r = 65\%$  ed angolo di attrito  $\phi' = 38^\circ$ ; prove Lefranc eseguite in foro di sondaggio hanno fornito per questi terreni valori di permeabilità da media a medio-alta, frequentemente compresi tra  $1E-4$  e  $1E-5$  m/s.

#### **Depositi del Supersistema dell'Arno**

Sono in prevalenza costituiti da ghiaie sabbiose addensate e in misura minore da argille limose compatte e limi argillosi di media plasticità. Possono presentare inclusi ciottoli arenacei di diametro dell'ordine dei 100÷150 mm e più raramente superiore ai 200 mm.

I materiali granulari risultano mediamente addensati ( $D_r = 55\div 65\%$ ) e presentano angolo di attrito  $\phi' = 33\div 38^\circ$ . I risultati di prove di permeabilità indicano valori, per il coefficiente di permeabilità  $K$ , compresi in genere tra  $1E-4$  e  $1E-5$  m/s.

La resistenza a breve termine per i termini coesivi è rappresentata da valori della  $c_u$ , generalmente compresi tra 90 e 150 kPa mentre a lungo termine ha fornito valori di  $c' = 7,5$  KPa e  $\phi' = 27^\circ$ .

Committente Principale <b>RFI</b>	Alta Sorveglianza <b>ITALFERR</b>	Contraente Generale <b>NODAVIA s.c.p.a.</b>
<b>PASSANTE – LOTTO 2</b> GALLERIE NATURALI RELAZIONE TECNICO-DESCRITTIVA GENERALE		<b>PROGETTO ESECUTIVO DI I LIVELLO</b>

Dal punto di vista idrogeologico il Supersistema dell'Arno costituisce un buon acquifero e contiene la falda più importante e produttiva della pianura fiorentina; i valori maggiori di permeabilità, sono stati registrati nelle ghiaie in matrice sabbiosa in prossimità dell'Arno, in presenza di sedimenti più grossolani e recenti.

Il minore grado di permeabilità rilevato per il Supersistema di Firenze (a parte i depositi attribuiti al paleo-Arno), è dovuto alla elevata percentuale di materiale fine presente nella matrice delle ghiaie; le Argille Turchine rappresentano invece un acquiclude essendo prevalenti i litotipi limoso-argillosi.

La falda idrica è localizzata negli orizzonti macroclastici che fanno parte dei Supersistemi dell'Arno e di Firenze, e nelle lenti ghiaiose all'interno delle Argille Turchine.

Si tratta in generale di una falda libera, con tavola d'acqua ubicata a profondità comprese fra 1 e 10 metri, che risulta confinata laddove l'acquifero è sovrastato da uno strato di terreno superficiale limoso-argilloso, oppure nelle ghiaie presenti nelle Argille Turchine, sedi di falde in pressione alimentate dalle zone apicali dei conoidi e dalla lenta infiltrazione dalla superficie.

Le escursioni stagionali della superficie freatica sono legate principalmente al regime delle precipitazioni, per cui i livelli di massima si registrano in primavera e i minimi all'inizio dell'autunno, con variazioni mediamente contenute entro 1- 1,5 m. La diminuzione dei pompaggi per l'abbandono di molti pozzi, ne sta determinando in questi ultimi anni una notevole risalita.

Committente Principale <b>RFI</b>	Alta Sorveglianza <b>ITALFERR</b>	Contraente Generale <b>NODAVIA s.c.p.a.</b>
<b>PASSANTE – LOTTO 2</b> GALLERIE NATURALI RELAZIONE TECNICO-DESCRITTIVA GENERALE		<b>PROGETTO ESECUTIVO DI I LIVELLO</b>

### 3. TRACCIATO DELLE GALLERIE

Le progressive crescono nel senso che va da Sud a Nord e si descriverà il tracciato partendo dall'imbocco di Campo di Marte per giungere a Rifredi.

Il tracciato delle gallerie e delle frese si svolge da Campo di Marte fino alla stazione AV, posta nell'area Belfiore e degli ex Macelli, sottoattraversando direttamente l'area densamente abitata compresa tra l'ospedale Mayer e Piazza della libertà per poi seguire la direttrice di Viale Spartaco Lavagnini fino alla Fortezza da Basso, attraversata sotto i bastioni dal lato di Viale Strozzi. Da qui sottopassa il fascio binari di SMN e seguendo Viale delle Ghiacciaie, dove sono presenti numerosi edifici, giunge all'area Belfiore nella stazione AV. Proseguendo oltre la stazione AV le gallerie naturali seguono un percorso attiguo alla linea ferroviaria di superficie attraversando aree comunali mediamente urbanizzate e sottopassano, prima di giungere all'imbocco Nord, i binari in esercizio dalla stazione di Rifredi.

Dal punto di vista altimetrico il tracciato è in discesa dall'imbocco di Campo di Marte fino alla fine di Viale Spartaco Lavagnini dove raggiunge il punto di minimo alla progr. 3+116.51; risale fino alla stazione AV dove per tutto lo sviluppo, comprensivo delle gallerie a doppio binario di precedenza, è orizzontale e riprende con diverse pendenze in risalita fino Rifredi.

Nel tratto compreso tra campo di Marte e la nuova stazione AV il tracciato attraversa il maggior numero di interferenze, sottopassando la linea ferroviaria Firenze-Roma e Firenze-Pisa e numerosi edifici prima di giungere sotto il Viale Sparco Lavagnini e al monumento storico della Fortezza Da Basso. In questo primo percorso le coperture aumentano da un minimo di 7 metri, in corrispondenza dell'imbocco, fino ad un massimo di 26 m verso la fine del Viale Lavagnini, per poi diminuire a 19 m in ingresso alla stazione AV. La ragione dell'approfondimento della linea risiede nella necessità di sottopassare le fondazioni dei bastioni della Fortezza con una copertura più alta possibile: con questo andamento si raggiungono valori minimi di circa 15 m che pongono la cinta muraria, comunque, al riparo da importanti danni. Dalla stazione AV in poi le coperture vanno da 15 m in corrispondenza di Via Circondaria fino a circa 6 m allo sbocco Nord.

Le gallerie a semplice binario corrono lungo tutto il tracciato ad un interasse di circa 19.30 m, tranne che nei tratti estremi dove la distanza è variabile e raggiunge il minimo valore in corrispondenza degli imbocchi. All'imbocco Sud il valore è di 17.20 m e all'imbocco Nord si riduce fino 11.9 m a causa delle ridotte dimensioni del camerone di uscita vincolate dalle opere ed infrastrutture ferroviarie esistenti in superficie.

Il tracciato delle gallerie di precedenza è, come detto, in orizzontale e si sviluppa in continuità dell'ingresso/uscita della stazione tra i pozzi Nord e Sud per circa 60 per lato. L'interasse tra le due gallerie è di circa 22.50 m e le coperture sono maggiori di 12m.

Committente Principale <b>RFI</b>	Alta Sorveglianza <b>ITALFERR</b>	Contraente Generale <b>NODAVIA s.c.p.a.</b>
PASSANTE – LOTTO 2 GALLERIE NATURALI RELAZIONE TECNICO-DESCRITTIVA GENERALE		<b>PROGETTO ESECUTIVO DI I LIVELLO</b>

#### 4. GALLERIE A SEMPLICE BINARIO ESEGUITE CON METODO MECCANIZZATO

##### 4.1 Sezione tipo a doppia canna

La scelta di due canne separate scaturisce da ragioni di sicurezza di esercizio ferroviario e da vantaggi costruttivi. La lunghezza della linea in sotterraneo, di circa 6250 m, compresi i tratti in artificiale degli imbocchi e il tratto in stazione, ha reso necessario separare i due binari in due gallerie distinte, al fine di garantire, in caso di incidente e di incendio in una galleria, il ricovero dei passeggeri nell'altra. Il trasferimento dei passeggeri nella galleria non interessata dall'incendio è assicurato dalla presenza lungo linea dei by-pass di collegamento compartimentati, attraverso porte tagliafuoco, e dalla presenza di una ampia banchina di larghezza 170 cm, che si restringe solo localmente, ogni 25 m, in corrispondenza delle nicchie di ricovero personale a 120 cm.

Lo sdoppiamento delle gallerie introduce degli evidenti vantaggi realizzativi. Il diametro di scavo di una singola canna, pari a 9.4 m, permette l'utilizzazione di frese a pressione del fronte di largo impiego che hanno dimostrato eccellenti risultati sia di produzione che di sicurezza in, ormai, numerosissime realizzazioni.

La sezione tipo di scavo per le gallerie di linea è, dunque, circolare. Il diametro interno di 8.3 m permette il transito di una sagoma di tipo C corrispondente ad un P.M.O.n.5 con ampi margini di sicurezza. Il diametro di 8.3 m è la misura minima per il rispetto di tutti i franchi elettrici e di armamento e fornisce un'area libera di circa 46 m<sup>2</sup>, che assicura un adeguato livello di comfort fino a velocità di 200 km/h, ampiamente al di sotto di quelle previste per la tratta in oggetto. L'evacuazione dei passeggeri da un treno in caso di incidente ha richiesto la presenza su di un lato di tutte le gallerie di un camminamento di larghezza minima 120 cm. Il risultato è stato ottenuto disassando l'asse del binario rispetto all'asse della galleria di 35 cm. La banchina è normalmente di 170 cm e si riduce a 120 cm, dimensione minima richiesta, solo in corrispondenza delle nicchie di ricovero del personale. Le banchine sono ricavate sul lato più vicino all'altra canna in modo da essere collegate direttamente attraverso i by-pass. Le nicchie di ricovero del personale disposte ogni 25 m e, normalmente previste in scavo nelle gallerie eseguite con la tecnica tradizionale, in questo caso sono realizzate all'interno della galleria con elementi prefabbricati montati sulla banchina e a ridosso del rivestimento. La scelta è dettata dalla esigenza di non dover interrompere con troppa frequenza la continuità degli anelli di rivestimento definitivo in un contesto geotecnico di terreni sciolti sotto falda, che, come si illustrerà più avanti, ha orientato la scelta del congelamento quale metodo di consolidamento per la costruzione dei by-pass.

In definitiva la sezione tipo scelta di diametro interno di 8.3 m soddisfa i seguenti requisiti:

- Transito di un Gabarit tipo C;
- Area libera di 46 m<sup>2</sup>;
- Piano teorico di contatto della T.E. a 5.20 m dal piano ferro con franco libero dalla calotta di 150 cm;
- Uso di traverse da 260 cm
- Distanza delle traverse dal rivestimento o dalla banchina di 80±10 cm;
- Piano banchina posto a +25 cm dal piano ferro

Committente Principale <b>RFI</b>	Alta Sorveglianza <b>ITALFERR</b>	Contraente Generale <b>NODAVIA s.c.p.a.</b>
<b>PASSANTE – LOTTO 2</b> GALLERIE NATURALI RELAZIONE TECNICO-DESCRITTIVA GENERALE		<b>PROGETTO ESECUTIVO DI I LIVELLO</b>

- Larghezza corrente di banchina di 170 cm e di 120 cm in corrispondenza della nicchia di ricovero;
- Nicchia di ricovero in aggetto con ingombro al piede di 50 cm;
- Altezza di ballast di 45±10 cm;
- Banchina dotata di tubi per l'alloggiamenti dei cavi IS, TLC, e LFM e di una canaletta per il tubo antincendio. Ogni 25 m in corrispondenza della nicchia e dei by-pass i tubi per i cavi sono interrotti da pozzetti di derivazione e manutenzione.
- Canaletta per la raccolta delle acque di infiltrazione al disotto del ballast.

Tutte le misure riportate, tranne quella del piano di contatto e del marciapiede, sono affette da una tolleranza di  $\pm 10$  cm che rappresenta la massima deviazione assegnata alla macchina di scavo. Ogni deviazione fuori da detta tolleranza deve essere evitata, altrimenti si dovrà ricorrere ad un ritracciamento dell'asse del binario per poter rispettare i franchi minimi su riportati.

La gallerie dispari del tratto Nord e tratto Sud sono attrezzate con dei cavidotti F160 integrativi, collocati in un basamento sul lato opposto a quello della banchina. Essi hanno lo scopo di alimentare gli impianti della stazione sia da Campo di Marte che da Rifredi con una linea a media tensione. Su questa banchina, posta a quota piano ferro, non sarà consentito il transito del personale e la manutenzione dei cavi sarà consentita solo con particolari soggezioni all'esercizio.

La canaletta di raccolta delle acque è posta in asse galleria consentendo altresì l'eventuale e locale manutenzione previa rimozione temporanea di alcune traverse. La canaletta confluisce nel pozzo di aggettamento che, per ragioni connesse alle interferenze in superficie, non è posto esattamente nel punto di minimo altimetrico. Il pozzo è collocato a circa 34 metri a Sud di detta punto di depressione e, pertanto, in questo breve tratto la canaletta dovrà seguire un andamento in contropendenza rispetto alla livelletta ferroviaria.

## 4.2 Scelta del metodo di scavo

Per la realizzazione delle gallerie in esame, è risultato di gran lunga vantaggioso far ricorso al metodo di scavo meccanizzato attraverso l'impiego di frese ad attacco integrale con scudo e sostegno del fronte.

Le caratteristiche dei terreni da attraversare, la scarsa profondità dello scavo, la presenza di numerosi manufatti in superficie sensibili ai cedimenti, i tempi e i costi di costruzione, sconsigliano fortemente l'impiego di scavo tradizionale, poco efficace per assicurare le necessarie condizioni di stabilità ed evitare rilevanti cedimenti in superficie senza ricorrere a pesanti interventi di consolidamento preventivi, in genere molto onerosi in termini di tempi e costi.

Oltre al requisito essenziale della stabilità, la tecnica di scavo delle gallerie deve garantire per la salvaguardia e la funzionalità delle numerose costruzioni e infrastrutture presenti in superficie, il massimo contenimento dei cedimenti. I cedimenti in superficie nascono, come noto, dalle deformazioni del terreno che si sviluppano nell'intorno del profilo di scavo e del fronte, a seguito dell'annullamento della pressione che prima dello scavo il terreno asportato esercitava sul contorno.

La tecnica dello scavo meccanizzato con frese a sostegno del fronte permette di mantenere sempre una pressione sul fronte e di contenere le deformazioni del cavo rivestendo la galleria a brevissima distanza dal fronte con anelli prefabbricati impermeabili, man mano che avanzano gli scavi. Attraverso la stessa

Committente Principale <b>RFI</b>	Alta Sorveglianza <b>ITALFERR</b>	Contraente Generale <b>NODAVIA s.c.p.a.</b>
<b>PASSANTE – LOTTO 2</b> GALLERIE NATURALI RELAZIONE TECNICO-DESCRITTIVA GENERALE		<b>PROGETTO ESECUTIVO DI I LIVELLO</b>

contropressione il sistema è anche in grado di tamponare le infiltrazioni d'acqua con l'aiuto di additivi iniettati direttamente nella camera di scavo, che chiudono gli interstizi tra i grani del terreno. In questo modo si evita di turbare le condizioni idrogeologiche e di innescare cedimenti di consolidazione del terreno.

L'adozione della tecnologia meccanizzata per lo scavo delle gallerie, comporta l'impiego di schiume, fanghi polimerici o bentonitici, a seconda della tipologia di macchina che si utilizza, e con concentrazioni dipendenti dalle caratteristiche granulometriche e di plasticità dei terreni. In entrambi i casi non si tratta di prodotti classificabili come "rifiuti tossici o pericolosi" secondo le norme vigenti, per cui il terreno misto agli additivi residui verrà trasportato direttamente al deposito già individuato senza speciali accorgimenti.

Il sostegno del fronte sarà realizzato a pressione di terra (EPBS). Si rimanda ai documenti di progetto specifici per dettagli in merito.

Lo studio geotecnico orientato allo scavo meccanizzato è stato finalizzato alla definizione di un quadro completo ed esauriente di tutte le situazioni che si possono riscontrare e alla individuazione dei possibili rischi che ciascuna tecnologia di scavo deve affrontare.

Il tracciato è stato suddiviso in 5 tratte omogenee per condizioni geotecniche, coperture ed interferenze ed all'interno di ciascuna zona sono state riportate oltre alle informazioni stratigrafiche, geotecniche e geomeccaniche secondo l'approccio del metodo ADECO-RS, i risultati delle analisi specifiche per lo scavo meccanizzato segnalando i problemi da affrontare con ciascuna tecnologia con riguardo a:

- Comportamento del terreno in funzione della granulometria;
- Collosità;
- Condizionamento con schiume e/o polimeri, trovanti e difficoltà di rimaneggiamento.
- Perdita di aria compressa durante le manutenzioni.

Non sono stati trascurati, in fase di sviluppo della progettazione esecutiva gli aspetti di seguito elencati:

- elevata possibilità di incontrare terreni incoerenti acquiferi, anche al di fuori dei punti già segnalati dall'indagine, senza alcuna eccezione lungo tutto il tracciato, di dimensioni tali da interessare in tutto o in parte la sezione trasversale delle gallerie. Nel contesto geologico di deposizione l'incontro di ghiaie o sabbie acquifere durante lo scavo di terreni a grana fine e viceversa, può essere improvviso e non prevedibile, per la difficoltà di determinare con esattezza l'estensione tridimensionale dei diversi materiali con possibilità di cadute della consistenza del terreno nella camera di scavo nell'EPBS. Questo aspetto mette in evidenza l'importanza di un adeguato sistema di monitoraggio e di condizionamento del terreno;
- le caratteristiche stratigrafico-geotecniche lungo il tracciato, di disomogeneità dei terreni all'interno della stessa sezione di scavo e di gradienti idraulici differenziati, non permettono di affidarsi esclusivamente a modellazioni geotecniche per simulare le condizioni di interazione terreno-macchina e pertanto la definizione del valore della pressione da applicare al fronte e i restanti parametri di macchina andranno ricercati in fase di scavo e costantemente verificati con il monitoraggio in corso d'opera;
- presenza in alcune zone di argille ad alta plasticità (principalmente nei depositi del Sistema del Lago) che possono creare problemi per il raggiungimento della lavorabilità del terreno nella

Committente Principale <b>RFI</b>	Alta Sorveglianza <b>ITALFERR</b>	Contraente Generale <b>NODAVIA s.c.p.a.</b>
<b>PASSANTE – LOTTO 2</b> GALLERIE NATURALI RELAZIONE TECNICO-DESCRITTIVA GENERALE		<b>PROGETTO ESECUTIVO DI I LIVELLO</b>

camera di scavo nel caso di EPB. Ciò richiede lo studio sperimentale di idonei additivi per ovviare al problema;

- probabile presenza di ciottoli di dimensione superiore a 200mm soprattutto nei depositi dell'Arno;

Si sottolinea che la macchina dovrà, comunque, operare sempre a pressione del fronte ed effettuare l'iniezione del vuoto di coda contemporaneamente a alla spinta. I valori della pressione al fronte sono stati opportunamente definiti ed indicati negli specifici elaborati e saranno ritirati in funzione dei monitoraggi in corso d'opera.

### 4.3 Analisi degli effetti dei cedimenti sulle opere in superficie

Per il contesto urbano in cui si sviluppa il tracciato della linea ferroviaria, assume notevole importanza la valutazione degli effetti dei cedimenti prodotti dallo scavo delle gallerie sulla sicurezza e funzionalità delle numerose opere in superficie ricadenti nel bacino di subsidenza.

A tale scopo per sviluppare suddette analisi ci si è riferiti ai dati raccolti nell'estesa ed impegnativa campagna di censimento e di rilievo condotta nel 1998, prima della conferenza dei servizi, che ha interessato 170 fabbricati e alcune opere ferroviarie. I fabbricati sono stati censiti raccogliendo per ciascuno di essi gli elaborati descrittivi, quando disponibili, oppure si è ricorso ad un rilievo diretto documentando attraverso schede riassuntive dell'esame visivo lo stato conservativo, la tipologia strutturale e la destinazione d'uso. Nell'ambito di suddetta campagna è stato eseguito un rilievo di dettaglio per il complesso monumentale di Fortezza da Basso per il quale oltre alla geometria e alle dimensioni delle strutture e delle fondazioni sono stati investigati in dettaglio terreni di fondazione e le caratteristiche meccaniche delle murature.

Quaranta fabbricati sono distribuiti lungo il tratto a Nord della Fortezza mentre la restante parte è concentrata prevalentemente ai margini di Viale Lavagnini e nell'abitato tra Via Masaccio e P.zza della Libertà, dove le costruzioni insistono direttamente sull'impronta delle gallerie.

Sulla base dell'eredità acquisita dal P.D., che contiene un importante e dettagliato studio sull'influenza dello scavo sugli edifici interferenti effettuato sotto la supervisione e con la collaborazione di un team di esperti di elevata e provata competenza ed esperienza nel settore geotecnico e in particolare dello scavo delle gallerie in ambiente urbano, costituito dai proff. Jamiolkowsky del Politecnico di Torino, J.B. Burland dell' "Imperial College" e R.T. Mair della "University of Cambridge", sono state sviluppate approfondite e dettagliate analisi sulla valutazione del danno degli edifici ricadenti nell'area interferente.

Il metodo di analisi, descritto nella specifica relazione "sulla valutazione delle subsidenze e verifica degli effetti indotti sulle opere in superficie", ha confermato gli esiti scaturiti dallo studio eseguito in fase di P.D. fornendo una stima delle possibili conseguenze sugli edifici in funzione di diversi stati di efficienza dello scavo meccanizzato e della variabilità delle condizioni geotecniche. In questo contesto si intende per efficienza dello scavo meccanizzato la sua capacità di ridurre le deformazioni in superficie. Il parametro rappresentativo dell'efficienza dello scavo meccanizzato è il così detto "volume perso", per la cui definizione si rimanda alla citata relazione.

Sebbene il valore atteso dovrebbe mantenersi sotto il valore di 0.5%, le analisi di danno sono state svolte anche con volumi persi maggiori e pari a 1% e 1.5%. Ciò al fine di valutare gli effetti sulle opere anche in condizioni di efficienza dello scavo non ottimali (volume perso 1%) o critiche (volume perso 1.5%) e fornire, in tal modo, una mappatura del "rischio di danno" individuando le zone e le

Committente Principale <b>RFI</b>	Alta Sorveglianza <b>ITALFERR</b>	Contraente Generale <b>NODAVIA s.c.p.a.</b>
<b>PASSANTE – LOTTO 2</b> GALLERIE NATURALI RELAZIONE TECNICO-DESCRITTIVA GENERALE		<b>PROGETTO ESECUTIVO DI I LIVELLO</b>

interferenze maggiormente sensibili. E' importante chiarire che aver simulato condizioni di funzionamento fuori da quelle richieste (volumi persi maggiori di 0.5%), non corrisponde ad una accettazione di una ridotta efficienza e si sottolinea che i limiti di cedimento che devono essere rispettati sono sempre quelli corrispondenti a un volume perso minore dello 0.5%.

L'interazione tra cedimenti del terreno e le strutture è un fenomeno di elevatissima complessità influenzato da numerosissimi parametri spesso di incerta definizione. Il metodo utilizzato per sviluppare le analisi si basa su ipotesi semplificate che, a vantaggio di sicurezza, conducono a risultati in generale più pessimistici di quanto in realtà accade. Pertanto il metodo non è stato applicato come uno strumento per la valutazione deterministica dei danni, ma è stato utilizzato come supporto per una prima classificazione delle interferenze più critiche. La verifica delle interferenze giudicate più sensibili è completata da un ulteriore approfondimento sulla base delle caratteristiche peculiari della strutture, di dati desunti da esperienza e di fattori legati alla posizione e all'importanza dell'opera. Con tale criterio sono state sottoposte a verifica tutte le interferenze e sono state individuate le opere da espropriare o su cui intervenire con lavori di salvaguardia e consolidamento. L'analisi è stata, inoltre, utile, per individuare gli edifici da sottoporre a monitoraggio in corso d'opera come meglio si illustrerà nel paragrafo dedicato al monitoraggio.

I risultati delle analisi e l'elenco delle opere sottoposte ad interventi di salvaguardia sono consegnati nella relazione già citata.

Stimate l'intensità e la probabilità dell'evento di danno, il criterio seguito per l'individuazione delle opere da sottoporre a consolidamento prende in esame la facilità di riparazione del danno, l'importanza dell'edificio e le condizioni al contorno per la fattibilità dei lavori di salvaguardia.

L'intensità di danno viene assegnata confrontando le distorsioni indotte nell'edificio con i limiti della scala di Boscardin e Cording (vedi relazione già citata). Nelle categorie da 0 a 2 rientrano i danni lievi che possono essere riparati con semplici interventi assimilabili a quelli di una normale manutenzione ordinaria. Nelle categorie da 3 a 5 rientrano i danni da moderati a molto severi che coinvolgono anche le strutture. Quando la categoria di danno calcolata è risultata superiore o uguale a 3 si è effettuata un'analisi critica per verificare la rispondenza delle ipotesi a base del metodo alla condizione reale dell'edificio che in qualche caso (per esempio edificio 22) ha indotto a ritenere troppo severo il risultato numerico e ad escludere, quindi, l'intervento.

La probabilità dell'evento è stimata in funzione del volume perso, delle coperture, delle situazioni geotecniche, delle condizioni strutturali e di conservazione dell'edificio e della posizione del fabbricato rispetto alla partenza della fresa.

In pratica si è deciso di intervenire dove sussistono rischi di danno strutturale (categoria  $\geq 3$ ) per la condizione più cautelativa di scavo poco efficiente (volume perso=1%), tollerando il rischio di conseguenze non strutturali e, quindi facilmente riparabili, su tutte quelle opere interferite che non rivestono una particolare importanza o valore storico-artistico. La decisione deriva, quindi, da un giudizio sulla "convenienza" economica che tiene conto anche della facilità dell'intervento di consolidamento in relazione alla disponibilità di spazi, alla configurazione e importanza dell'edificio, prevedendo, a seconda dei casi, l'eventuale riparazione dopo il passaggio degli scavi (edifici 22 e 24) o l'esproprio, in luogo dell'intervento di consolidamento preventivo (edifici 1D e 1E).

Fatta eccezione per gli edifici che saranno sottoposti a lavori di consolidamento (165 e 166) e quelli già riportati nel capoverso precedente (22, 24, 1D e 1E), il rischio di danno lieve o trascurabile è risultato pressoché nullo per volumi persi inferiori allo 0.4% e si presenta su circa 60 fabbricati solo per

Committente Principale <b>RFI</b>	Alta Sorveglianza <b>ITALFERR</b>	Contraente Generale <b>NODAVIA s.c.p.a.</b>
<b>PASSANTE – LOTTO 2</b> GALLERIE NATURALI RELAZIONE TECNICO-DESCRITTIVA GENERALE		<b>PROGETTO ESECUTIVO DI I LIVELLO</b>

volumi persi uguali all'1.0%. Il riscontro in corso d'opera di volumi persi prossimi all'1.0% è atteso come evento eccezionale e contenuto nell'ambito di limitati tratti.

Con ciò si vuole sottolineare che sebbene il progetto non preveda l'insorgenza di danni strutturali e pericolosi per la stabilità di tutti i fabbricati interferiti, fino a volumi persi dell'1.5%, non si può escludere completamente la comparsa di danni lievi, di facile riparabilità, nel caso in cui lo scavo proceda anche con volumi persi inferiori all'1.0%. Alla prima categoria (danno strutturale riparabile con difficoltà) afferiscono le classi  $\geq 3$  della scala di Boscardin e Cording presa a riferimento nell'analisi, alla seconda (danno riparabile) le classi  $< 3$ .

In definitiva si sono presi in esame tutti gli edifici che presentano un danno di categoria  $\geq 3$  per la condizione limite di  $V_p=1.0\%$ , nell'ipotesi, cautelativa, di non perfetta esecuzione dello scavo. Successivamente si sono esaminati nel dettaglio le situazioni in cui si verifica tale condizione per valutare, sia la convenienza dell'intervento in relazione all'importanza e valore dell'edificio, sia la rispondenza delle ipotesi semplificative a base del metodo alla configurazione reale dell'interferenza. I criteri utilizzati per l'individuazione dei fabbricati su cui intervenire hanno preso in considerazione oltre alle condizioni geotecniche e di copertura, anche l'importanza dell'edificio, la tessitura strutturale, lo stato di conservazione e posizione rispetto alle prime fasi di taratura della macchina.

Per gli edifici di modesta importanza tale criterio non è stato applicato, ritenendo l'intervento di riparazione o l'esproprio meno oneroso di quello di consolidamento.

L'analisi è stata svolta su tutti i fabbricati valutando gli effetti dello scavo delle singole gallerie. Dopo questo primo passo sugli edifici più "sensibili" si è anche valutato il danno prodotto dalla sovrapposizione degli effetti delle due gallerie.

Fatta eccezione per gli edifici 1D, 1E, 24, 165, 166 i risultati dell'analisi possono essere così sintetizzati

- non sussistono gravi pericoli di stabilità degli edifici anche per condizioni di scavo critiche (Volumi persi = 1.5%);
- il numero di edifici con categoria di danno lieve in condizioni di scavo attese (Volume perso inferiore o uguale allo 0.4%) è trascurabile;
- per condizioni di scavo di scarsa efficienza (volumi persi prossimi a 1%) la probabilità di danno lieve interessa un numero elevato di edifici (circa 60).

In generale emerge un quadro molto confortante degli effetti indotti e su 170 fabbricati e si è deciso di intervenire solo in due casi (edifici 165 e 166 subito dopo l'imbocco di Campo di Marte) e di espropriare due fabbricati in corrispondenza dell'ultimo tratto a Rifredi (edifici 1D e 1E). Per i restanti edifici non si esclude una probabilità di danno nei termini sopra descritti e, nella eventualità, sono previsti interventi di riparazione.

Per la loro specificità le interferenze con le altre opere: il ponte viario "Al Pino" sulla ferrovia subito dopo l'imbocco Sud, la Fortezza da Basso, e i binari in esercizio lato Rifredi, sono state trattate con analisi particolari. Il ponte è una struttura ad arco in acciaio ed è interferito da una sola canna che ne sottopassa una spalla determinando rotazioni che potrebbero mettere in crisi l'appoggio costituito da un vincolo unilaterale. Per la Fortezza è stata eseguita un'analisi dei cedimenti lungo tutta la cinta muraria dei Bastioni determinando secondo il metodo precedente i valori massimi di distorsione. L'analisi mostra che in condizioni di normale funzionamento della macchina di scavo il livello di danno è potenzialmente molto basso, ma per l'importanza storico-artistica del monumento si prevede, comunque, la messa in opera di un intervento protettivo di salvaguardia. Per i binari in esercizio

Committente Principale <b>RFI</b>	Alta Sorveglianza <b>ITALFERR</b>	Contraente Generale <b>NODAVIA s.c.p.a.</b>
<b>PASSANTE – LOTTO 2</b> GALLERIE NATURALI RELAZIONE TECNICO-DESCRITTIVA GENERALE		<b>PROGETTO ESECUTIVO DI I LIVELLO</b>

sottopassati prima della stazione di Rifredi si è eseguita una analisi dei cedimenti trasversali e longitudinali volta a valutare gli spostamenti relativi tra le rotaie e verificare che il valore dello sghembo tra di esse non superi i limiti di sicurezza. Tale verifica ha fornito valori superiori ai limiti di accettazione nella zona interessata da basse coperture (fino a 5.3 metri) in prossimità dell'imbocco di Rifredi sebbene considerando un  $V_p \geq 1.5\%$ . Suddetta contingenza ha imposto la realizzazione di interventi di consolidamento colonnare a limitare i cedimenti a piano campagna.

In definitiva l'analisi ha condotto all'individuazione di interventi di salvaguardia e di misure precauzionali su un numero limitato di interferenze di cui si dirà nel paragrafo successivo.

#### 4.4 Interventi di salvaguardia

Dall'analisi delle probabili conseguenze degli scavi sulle opere in superficie illustrata nel paragrafo precedente emerge la necessità di interventi sulle seguenti opere:

1. Edificio - Via Pacinotti 1/A (edificio adibito a servizi – sede dopolavoro ATAF- n.165 del censimento delle opere interferenti eseguito da Italferr);
2. Edificio - Via del Pratellino 19 (edificio di civile abitazione- n.166 del censimento delle opere interferenti eseguito da Italferr);
3. La spalla Nord del "Ponte al Pino";
4. Bastioni Rastriglia e Cavaniglia del Monumento storico di Fortezza da Basso;
5. Sede ferroviaria sottopassata prima dello sbocco nel pozzo di uscita lato Rifredi.

Inoltre si prevedono misure precauzionali per tutti i binari sottopassati dalle frese consistenti in rallentamenti dei convogli ferroviari durante le operazioni di scavo.

Gli interventi 1,2 e 3 sono collocati a poco più di 100 metri dall'imbocco di Campo di Marte. In questa zona, attraversata dalle frese poco dopo l'avvio dello scavo, gli effetti combinati di basse coperture (6 m di copertura sotto le fondazioni per l'edificio 166, 14 m per l'edificio 165, appena 4 m per la spalla del Ponte) e di una minor affidabilità delle procedure di scavo nelle fasi iniziali, non permettono di escludere, in assenza di interventi di presidio, cedimenti non compatibili con la funzionalità e l'integrità strutturale delle opere interferite. La presenza di questo rischio è confermata dall'analisi del danno che fornisce, in corrispondenza di un volume perso dell'1%, per l'edificio 165 un danno 3 e per l'edificio 166 un danno 4 (valori che nella scala utilizzata indicano conseguenze sulle strutture).

Nel caso della Fortezza da Basso, le analisi di rischio mostrano una probabilità di danni alle mura dei bastioni molto limitata e, peraltro, inerente solo aspetti estetici, ma vista l'importanza storico-artistica del monumento e in accordo alle intese intercorse con la Soprintendenza dei Beni Artistici e Culturali di Firenze, è stato comunque, previsto, un intervento di protezione. In tal caso l'opera di salvaguardia si configura esclusivamente come presidio verso eventuali e remoti risentimenti estetici delle strutture murarie, essendo la sicurezza strutturale pienamente garantita anche nel caso di andamento non ottimale della macchina di scavo.

L'intervento di consolidamento allo sbocco di Rifredi trova la principale motivazione nella salvaguardia dell'esercizio ferroviario dei binari posti sopra le gallerie che saranno operativi al momento dell'arrivo delle frese, nonostante i rassicuranti risultati delle analisi sulla geometria dei binari a seguito dei

Committente Principale <b>RFI</b>	Alta Sorveglianza <b>ITALFERR</b>	Contraente Generale <b>NODAVIA s.c.p.a.</b>
<b>PASSANTE – LOTTO 2</b> GALLERIE NATURALI RELAZIONE TECNICO-DESCRITTIVA GENERALE		<b>PROGETTO ESECUTIVO DI I LIVELLO</b>

cedimenti prodotti dallo scavo. La sicurezza dei binari potrebbe essere compromessa da alti valori di cedimento e probabili fenomeni di instabilità dovuti alla scarsa profondità delle gallerie e nella ridotta distanza reciproca che esse raggiungono per convergere nel pozzo di uscita.

Gli interventi di salvaguardia degli edifici e del ponte sono descritti più approfonditamente nella specifica relazione tecnica illustrativa, nel seguito si fornisco informazioni sugli aspetti più salienti.

#### 4.5 Compensation Grouting per gli edifici 165,166 e i bastioni della Fortezza Da Basso

Per gli edifici 165, 166 e Fortezza da basso il progetto prevede l'applicazione della tecnologia del compensation grouting. Per questi edifici è stato necessario ricorrere ad un sistema che, oltre ad essere affidabile, permettesse di intervenire senza arrecare disturbo alle funzioni degli edifici e senza richiedere espropri temporanei degli stessi. Gli usuali interventi di consolidamento "passivi", come trattamenti dei terreni o sottofondazioni degli edifici, sono, come noto, molto invasivi e spesso di dubbia efficacia se la galleria sottopassa direttamente le fondazioni. Infatti in tal caso la sottofondazione, attraversata dalla galleria non riesce a trasferire i carichi in zone non interessate dalle deformazioni dello scavo.

L'intervento di compensation è di tipo "attivo". Esso consiste nel compensare i cedimenti mediante iniezioni cementizie eseguite nel terreno compreso tra le gallerie e le fondazioni dell'opera. In pratica non appena si sviluppano cedimenti delle strutture e, prima che gli stessi superino i limiti predefiniti, il sistema permette di ristabilire la quota iniziale delle fondazioni con l'apporto di materiale in pressione nelle quantità e nelle posizioni tali da compensare i volumi di terreno confluiti in galleria. Il metodo è stato già applicato con successo sotto numerosi edifici monumentali nel centro di Londra, inclusa la Torre del Big Ben, durante la costruzione della metropolitana "jubilee line".

A differenza dei tradizionali sistemi "passivi" di consolidamento o sottofondazione il compensation non richiede nessun intervento diretto ed invasivo sulle strutture di fondazione dell'edificio, permettendone la normale fruizione durante i lavori di scavo delle gallerie. Tutte le operazioni si svolgono all'esterno delle strutture non compromettendone l'estetica e la funzionalità, né durante le operazioni preliminari, né nel corso dello scavo delle gallerie. Tale aspetto è risultato fondamentale soprattutto per la Fortezza Da Basso per evidenti motivi.

Uniche costruzioni esterne, peraltro di limitato disturbo e a carattere temporaneo, sono costituite da modesti pozzi, posti nelle prossimità degli edifici e dalle relative aree di cantiere a loro servizio. Le aree di cantiere sono necessarie per posizionare prima le macchine di consolidamento e scavo dei pozzi e successivamente gli impianti di iniezione. Fatta eccezione per le lavorazioni di scavo dei pozzi, tutte le attività, costituite prevalentemente da perforazioni e iniezioni, si svolgeranno all'interno del pozzo e non produrranno alcun disturbo al di fuori delle aree di cantiere. Dopo il passaggio della fresa i pozzi verranno riempiti e i luoghi restituiti nelle condizioni originarie.

Le iniezioni sono effettuate attraverso perforazioni orizzontali eseguite a partire dai pozzi posti nell'intorno degli edifici. In totale sono previsti 6 pozzi 2 per gli edifici in zona Campo di Marte e 4 per la Fortezza, due per ciascun Bastione. Le perforazioni vengono eseguite prima dell'arrivo delle gallerie e raggiungono il terreno posto al di sotto delle fondazioni per un primo trattamento di iniezione, volto a intasare i vuoti del terreno. In questa fase si attua anche una prima taratura del sistema, verificando la risposta delle strutture alle iniezioni in pressione per mezzo di misure di livellazione. In tal modo tutto l'impianto è predisposto per essere attivato durante il transito delle frese. Con l'ausilio di un dettagliato sistema di monitoraggio, che fornisce in tempo reale li valori di cedimento e deformazione della

Committente Principale <b>RFI</b>	Alta Sorveglianza <b>ITALFERR</b>	Contraente Generale <b>NODAVIA s.c.p.a.</b>
<b>PASSANTE – LOTTO 2</b> GALLERIE NATURALI RELAZIONE TECNICO-DESCRITTIVA GENERALE		<b>PROGETTO ESECUTIVO DI I LIVELLO</b>

struttura, vengono decise rapidamente le azioni da attuare (iniezioni di compensazione) per prevenire ogni danno.

Il monitoraggio rappresenta un elemento di fondamentale importanza per il successo del compensation grouting. La sua affidabilità, precisione, velocità di lettura e trasferimento dei dati in tempo reale sono requisiti indispensabili per il controllo dell'evoluzione dei cedimenti e per determinare le relazioni di causa-effetto tra le iniezioni e le deformazioni delle strutture e del terreno al contorno.

La strategia di compensazione dei cedimenti è diversa per gli edifici di Campo di Marte e la Fortezza da Basso. Nel primo caso si procederà alla iniezioni contestualmente allo scavo per compensare tutti i cedimenti prodotti dalle gallerie e prevenire ogni risentimento strutturale degli edifici. Nel secondo le iniezioni verranno attivate solo nel caso in cui si misureranno cedimenti superiori ad alcune soglie e prima che possano raggiungere livelli tali da compromettere l'integrità anche estetica delle mura dei Bastioni.

Dettagli sulle operazioni previste e sulle modalità esecutive sono contenuti nelle "Specifiche tecniche di esecuzione di compensation grouting".

#### **4.6 Intervento di sottofondazione spalla del Ponte Al Pino**

A circa 100 m dall'imbocco di Campo di Marte la fresa del binario pari sottopassa il lato esterno della spalla Nord del ponte stradale sulla ferrovia noto come Ponte al Pino. L'area interessata da tale problematica di interferenza si individua alla confluenza tra Via Pacinotti e Via del Pratellino.

Il ponte è costituito da una travata ad arco ribassato in acciaio di 28 m di luce circa vincolata a cerniera sulle spalle in muratura la cui costruzione risale all'inizio del secolo.

La struttura è di tipo iperstatico e risulta particolarmente sensibile agli spostamenti orizzontali dei vincoli a cerniera che possono essere indotti dallo scavo della galleria. L'entità di tali spostamenti è stata stimata nella relazione sulla valutazione della subsidenza.

Per la scarsa copertura e la posizione laterale della galleria, l'intervento di compensation grouting risulterebbe poco efficace. Mentre sia la rigidità della spalla, che la possibilità di intervenire senza limitare la funzionalità dell'opera, rendono molto efficace la sottofondazione mediante micropali che vanno ad ancorarsi in profondità oltre l'area di scavo della galleria.

L'intervento di tipo "passivo" è stato dimensionato in modo da scaricare tutte le reazioni vincolari del ponte e il peso proprio della spalla stessa oltre il piano della galleria, nell'ipotesi che la fondazione diretta della spalla, al seguito delle deformazioni indotte dello scavo della galleria, non sia più in grado di garantire l'assenza di cedimenti.

Le deformazioni del ponte saranno tenute sotto stretto controllo attraverso un accurato piano di monitoraggio. Qualora gli spostamenti relativi tra spalla e terreno di fondazione fossero tali da annullare l'azione di fondazione diretta, a fine scavo della galleria è prevista una iniezione di intasamento sotto la fondazione per ristabilire lo stato di coazione tra il terreno e la fondazione.

L'intervento è stato progettato prevedendo la completa funzionalità viaria e ferroviaria del ponte ed è prevista la parzializzazione del traffico viario solo durante l'esecuzione dei micropali.

Committente Principale <b>RFI</b>	Alta Sorveglianza <b>ITALFERR</b>	Contraente Generale <b>NODAVIA s.c.p.a.</b>
PASSANTE – LOTTO 2 GALLERIE NATURALI RELAZIONE TECNICO-DESCRITTIVA GENERALE		<b>PROGETTO ESECUTIVO DI I LIVELLO</b>

#### 4.7 Consolidamento per lo sbocco a Rifredi

I terreni allo sbocco di Rifredi, attraversati dagli ultimi 125 metri di scavo delle frese saranno consolidati mediante trattamento colonnare dall'alto. La porzione di terreno consolidata interessa tutto l'intorno delle gallerie, tranne l'arco rovescio. Una parte dell'intervento sarà necessariamente effettuato contestualmente alla costruzione delle opere di imbocco, per la porzione di terreno che stà al di sotto dei nuovi binari che occuperanno parzialmente anche l'impronta del pozzo, prima della loro realizzazione (realizzazione che è compresa fra le opere dell'imbocco). Durante tali lavori l'area d'intervento sarà priva di binari in esercizio.

La zona di intervento dall'alto è a forma di trapezio con i lati minori delimitati a Nord dalla parete di testata del pozzo e a Sud dalla cabina degli impianti di sicurezza. I lati maggiori sono delimitati ad Est dal muro di recinzione dell'istituto farmaceutico militare e ad Ovest dal binario in esercizio dell'impianto di Rifredi (deviata della linea Bologna Firenze per Campo di Marte) dal quale le lavorazioni dovranno arretrare di tre metri. Le perforazioni saranno inclinate dal lato del binario per raggiungere il lato Ovest della galleria pari.

#### 4.8 Monitoraggio in corso d'opera

Il monitoraggio in corso d'opera rappresenta un'attività di fondamentale importanza per il successo dello scavo delle gallerie in ambiente urbano. Ad essa bisognerà dedicare estrema attenzione nella progettazione esecutiva e, in corso d'opera, risorse adeguate per numero e competenza affinché i dati rilevati siano affidabili e efficaci alla sicurezza della costruzione dell'opera.

Il monitoraggio geotecnico dello scavo delle gallerie in ambiente urbano è volto al controllo di due principali insiemi di fenomeni correlati tra loro da un rapporto causa-effetto: attività di scavo e i risentimenti in superficie. Da una parte si misurano le cause (monitoraggio al fronte di scavo) e dall'altra gli effetti (monitoraggio dei cedimenti in superficie e sulle opere preesistenti). Le misure devono essere effettuate e interpretate in maniera più rapida possibile per verificare che gli effetti siano contenuti all'interno di limiti di accettabilità prestabiliti e, qualora tali limiti siano in procinto di essere superati, valutare tempestivamente le azioni da compiere per agire sulle cause che li determinano.

Pertanto il progetto del monitoraggio è suddiviso in due parti: la prima riguardante il controllo delle lavorazioni al fronte di scavo (monitoraggio interno) e la seconda riguardante gli effetti dello scavo (monitoraggio esterno). La prima parte è trattata nelle specifiche dello scavo meccanizzato, la seconda negli elaborati grafici e nella relazione di monitoraggio esterno.

#### 4.9 Monitoraggio interno

Il monitoraggio interno ha come scopo il controllo della buona esecuzione delle lavorazioni di scavo, attraverso l'analisi e l'elaborazione dei dati provenienti dai vari sensori di cui la macchina è fornita.

I parametri di maggior importanza da cui dipendono i detensionamenti e quindi le deformazioni in superficie in caso di non corretta esecuzione sono:

- la pressione al fronte
- le pressioni e i volumi di delle miscele di intasamento

Committente Principale <b>RFI</b>	Alta Sorveglianza <b>ITALFERR</b>	Contraente Generale <b>NODAVIA s.c.p.a.</b>
<b>PASSANTE – LOTTO 2</b> GALLERIE NATURALI RELAZIONE TECNICO-DESCRITTIVA GENERALE		<b>PROGETTO ESECUTIVO DI I LIVELLO</b>

– il volume ed il peso del materiale estratto.

Di notevole importanza per prevenire fenomeni di instabilità è il controllo dei volumi e dei pesi di materiale estratto dal fronte. Allo scopo le frese devono essere dotate di bilance e di scanner sui nastri per la misura dei pesi e dei volumi. Queste misure vanno associate costantemente all'avanzamento del fronte per verificare il bilancio tra materiale scavato e materiale estratto. Nel caso di sopravanzo del materiale estratto rispetto a quello scavato, segno di risucchio di terreno da zone intorno al fronte, devono essere attivati allarmi per arrestare il fenomeno. Questi ed altri parametri devono essere trasmessi in tempo reale sia nella cabina di comando che in altre sedi dove devono essere analizzati costantemente su tutti i turni da personale adeguatamente istruito e competente.

#### 4.10 Monitoraggio esterno

Le deformazioni del terreno e i conseguenti cedimenti della superficie del piano campagna sono i principali effetti dello scavo delle gallerie superficiali. Il monitoraggio esterno è volto prevalentemente al controllo di questi effetti e alle relative conseguenze sulle opere preesistenti.

Il progetto definitivo sono individuate:

- le grandezze fisiche da monitorare;
- la strumentazione da installare e la sua collocazione;
- le frequenze di misura;
- la definizione di parametri significativi al controllo;
- l'elaborazione dei dati per il calcolo dei parametri;
- I limiti di accettabilità e le soglie di intervento;
- azioni da compiere al superamento delle soglie;

Si rimanda alla specifica relazione di monitoraggio per il dettaglio. Qui si pone l'attenzione sul fatto che i principali parametri di controllo a cui sono associate delle soglie e quindi delle azioni al loro superamento sono il "volume perso" e il rapporto di inflessione dei fabbricati. Il primo parametro è associabile alla qualità dello scavo il secondo alle distorsioni indotte negli edifici. Tutte le misure devono essere convogliati verso una unità di raccolta ed elaborazione che con l'ausilio di un supporto informatico provvede a calcolare i parametri e a confrontarli con i valori di soglia. I dati, validati, devono quindi essere trasmessi sottoforma di grafici immediatamente interpretabili alla direzione lavori, all'ufficio tecnico dell'Appaltatore, al committente ed eventualmente ad altri utenti preposti al controllo.

#### 4.11 Cunicoli di collegamento

I cunicoli di by-pass saranno realizzati in modo da collegare le due gallerie ferroviarie lungo tutto il loro sviluppo, ad una distanza massima l'uno dall'altro di minimo 410 m. Sono previsti 5 cunicoli nel tratto compreso tra Rifredi e la Stazione AV, e ulteriori 6 tra la Stazione AV e Campo di Marte.

I cunicoli saranno comunicanti con le gallerie di linea tramite porte tagliafuoco e tagliafumo REI 120. Sarà garantito il mantenimento all'interno del cunicolo stesso di una sovrappressione sufficiente ad

Committente Principale <b>RFI</b>	Alta Sorveglianza <b>ITALFERR</b>	Contraente Generale <b>NODAVIA s.c.p.a.</b>
<b>PASSANTE – LOTTO 2</b> GALLERIE NATURALI RELAZIONE TECNICO-DESCRITTIVA GENERALE		<b>PROGETTO ESECUTIVO DI I LIVELLO</b>

evitare l'ingresso di eventuale fumo nel momento in cui le porte vengono aperte in situazione di emergenza: in questo modo sarà possibile che ogni canna diventi luogo sicuro nei confronti dell'altra.

Le problematiche legate alla stabilità del cavo e del fronte in presenza di tali battenti idrici, la necessità di limitare quanto più possibile i cedimenti in superficie, l'eterogeneità delle formazioni da affrontare lungo tutto lo sviluppo delle gallerie naturali, la necessità di impermeabilizzare il contorno del cavo hanno portato a individuare nel congelamento il miglior sistema in grado di garantire l'esecuzione del lavoro in piena sicurezza.

Committente Principale <b>RFI</b>	Alta Sorveglianza <b>ITALFERR</b>	Contraente Generale <b>NODAVIA s.c.p.a.</b>
<b>PASSANTE – LOTTO 2</b> GALLERIE NATURALI RELAZIONE TECNICO-DESCRITTIVA GENERALE		<b>PROGETTO ESECUTIVO DI I LIVELLO</b>

## 5. GALLERIE A DOPPIO BINARIO DI PRECEDENZA

### 5.1 Sezione tipo

In entrata e in uscita della stazione AV le gallerie di linea devono ospitare oltre al binario di corsa anche il binario di precedenza, il tronchino per la chiusura del circuito del binario di precedenza e la comunicazione tra i due binari. Sono state quindi progettate quattro gallerie a doppio binario, due a nord (pari e dispari) e due a sud della stazione.

Queste gallerie saranno realizzate in parte in allargò dopo il passaggio della fresa ed è il caso dei tratti sud e nord lungo il binario pari ed il tratto sud lungo il binario dispari mentre il tratto di galleria di precedenza nord lato binario dispari sarà realizzato in tradizionale a piena sezione prima dell'arrivo della fresa all'interno della quale verrà traslata facendola scorrere su un opportuna sella gettata a supporto dell'operazione. La macchina dovrà subire anche una traslazione trasversale di circa 1.0 m per portare il proprio asse in coincidenza con l'asse della galleria a singolo binario in occasione della ripartenza per lo scavo del tratto nord del binario dispari. Suddetta manovra sarà effettuata all'interno di una apposita camera denominata per l'occasione "camera di manovra" ricavata allargando di circa 2.0 m la sezione di galleria doppio binario lato dispari tratto nord per gli ultimi 30.0 m prima di giungere nel pozzo costruttivo e di ventilazione nord.

Per motivi costruttivi sarà realizzato, in anticipo rispetto alle gallerie a doppio binario e quindi anche rispetto all'arrivo delle frese, il pozzo costruttivo Nord della stazione, in corrispondenza del passaggio da doppio a singolo binario. A Nord il pozzo sarà unico e ospiterà entrambi gli imbocchi delle gallerie a doppio binario.

Gli intradossi delle gallerie a doppio binario sono quindi due: il primo ha la calotta circolare con raggio interno di 5.45 m, ed è applicato alle gallerie sud, la pari nord e la metà della dispari nord in continuità con la stazione AV; il secondo, applicato solo alla camera di manovra, ha la calotta costituita da due archi con raggio interno 5.45 m raccordati in chiave da un paramento orizzontale di 1.80 m. Questa configurazione è tale da consentire l'uso del medesimo cassero per i due intradossi.

Il marciapiede è previsto dal lato del binario di corsa, di larghezza al netto delle nicchie pari a 120 cm e altezza 25 cm sopra il piano del ferro, in continuità con quello delle gallerie a semplice binario. Annegati nel getto del marciapiede sono previste le tubazioni per passaggio cavi, interrotti ogni 25 m circa da un pozzetto. Il marciapiede alloggia anche il tubo dell'impianto anti-incendio all'interno di una trincea, rimanendo accessibile in ogni punto grazie alla copertura continua in botole di cls prefabbricate. Tutti gli elementi descritti sono la naturale prosecuzione di quelli previsti nella sezione a singolo binario.

Dal lato del binario di precedenza è previsto un marciapiede di servizio, largo circa 62 cm, a 25 cm dal piano del ferro, che ospita al suo interno tubazioni per il passaggio dei cavi elettrici di media tensione (MT), limitatamente alle sole gallerie dispari.

Il getto di riempimento dell'arco rovescio per la galleria binario dispari tratto nord sarà svolto in due fasi: in una prima fase si realizzerà una sella che alloggiando un binario permetterà la traslazione delle frese; la seconda fase provvederà a realizzare il piano di regolamento su cui insiste l'armamento tradizionale (ballast e traverse da 2.60 m).

Committente Principale <b>RFI</b>	Alta Sorveglianza <b>ITALFERR</b>	Contraente Generale <b>NODAVIA s.c.p.a.</b>
<b>PASSANTE – LOTTO 2</b> GALLERIE NATURALI RELAZIONE TECNICO-DESCRITTIVA GENERALE		<b>PROGETTO ESECUTIVO DI I LIVELLO</b>

## 5.2 Scelta del metodo di scavo e consolidamento

La sequenza stratigrafica dei terreni in prossimità della stazione AV è costituita da: terreni di riporto, supersintema dell'Arno, supersintema del Lago. Le gallerie naturali dovranno essere scavate a cavallo della superficie suborizzontale che separa i due supersintemi: la calotta è interessata dalle ghiaie e dai livelli sabbiosi del supersintema dell'Arno, i piedritti e l'arco rovescio sono interessati dalle argille limose del supersintema del Lago. La superficie piezometrica si attesta a circa 6m sopra la calotta. La discreta permeabilità dello strato superiore ( $10^{-5} \div 10^{-6}$  m/s), la presenza del battente idrico, il delicato tessuto urbano in superficie, la necessità di operare in assoluta sicurezza hanno imposto come tecnica di consolidamento il congelamento preventivo del terreno.

Il congelamento si ottiene con l'assorbimento di calore dal terreno tramite una serie di sonde in cui circola una sostanza refrigerante. In particolare il metodo scelto nell'ambito del presente progetto è quello "a circolazione inversa", o "a salamoia", in cui una soluzione di acqua ed elementi salini viene raffreddata da appositi frigoriferi per essere poi canalizzata all'interno di sonde congelatrici. Queste sono costituite dall'accoppiamento coassiale di due tubi, così da creare una camera esterna in cui passa il liquido alimentato dai frigoriferi, e una interna in cui ritorna il liquido ad una temperatura più alta.

Affinché il trattamento abbia successo è necessario che l'acqua presente nel terreno interessato dall'intervento sia pressoché ferma, o si muova tanto lentamente da non trasportare via le frigorifiche scambiate dalle sonde. Allo scopo quindi di diminuire la permeabilità dei terreni in calotta è stato previsto un trattamento a base di iniezioni cementizie, limitatamente alla porzione di calotta all'interno delle ghiaie del supersintema dell'Arno.

Il congelamento riguarderà una fascia di terreno di spessore pari a due metri, disposta a ferro di cavallo attorno alla galleria.

In fase di scongelamento, una volta che il cavo risulta impermeabilizzato e rivestito, sono previste delle iniezioni cementizie all'interno della facies argillosa, al fine di ricomprimere e compensare, quindi, eventuali fenomeni di rammollimento caratteristici di alcune argille sottoposte a cicli di gelo/disgelo.

Al fine di contenere l'errore di allineamento delle perforazioni e quindi il rispetto della geometria delle sonde congelatrici dovendo affrontare perforazioni lunghe anche 70 m, con riferimento alle due tratte di galleria doppio binario lato sud, si adotteranno sistemi guidati che consentono di rispettare le tolleranze prescritte. Lato nord le perforazioni verranno eseguite per metà della lunghezza dalla stazione A.V. e la restante parte dal pozzo nord limitando la lunghezza a circa 30 m consentendo di operare con tecnologie ordinarie nel rispetto delle tolleranze previste.

In definitiva sono previsti sei trattamenti di congelamento: quattro a partire dalla stazione AV e due a partire dal pozzo Nord.

## 5.3 Pozzo costruttivo nord

A valle della stazione AV, precisamente a cavallo della sezione di passaggio tra singolo e doppio binario, è previsto un pozzo costruttivo che in fase definitiva vestirà funzione quale pozzo di ventilazione, come brevemente descritto nei paragrafi precedenti. Lo scopo di tale pozzo è, in fase costruttiva, quello di consentire l'arrivo e la ripartenza della fresa una volta avvenuta la traslazione all'interno della stazione AV, nonché l'esecuzione dei consolidamenti previsti per la realizzazione delle

Committente Principale <b>RFI</b>	Alta Sorveglianza <b>ITALFERR</b>	Contraente Generale <b>NODAVIA s.c.p.a.</b>
<b>PASSANTE – LOTTO 2</b> GALLERIE NATURALI RELAZIONE TECNICO-DESCRITTIVA GENERALE		<b>PROGETTO ESECUTIVO DI I LIVELLO</b>

gallerie a doppio binario lato nord. Come precedentemente accennato in fase definitiva il pozzo Nord assolverà a funzione impiantistica.

Il pozzo costruttivo Nord ha una impronta rettangolare di 40 m x 15 m, disposto con l'asse maggiore trasversale ai binari, così da accogliere i quattro attacchi delle gallerie che vi fanno riferimento.

Lo scavo, eseguito per ribassi successivi, sarà sostenuto da una paratia di diaframmi in cls armato contrastata da profilati metallici disposti a puntone contro travi di ripartizione. Le ampie luci in gioco impongono una geometria dei puntone di tipo reticolare per evitare fenomeni di svergolamento. Al contempo si sono mantenuti sufficienti spazi liberi per la movimentazione verticale di materiale e macchinari dalla superficie.

La struttura definitiva è realizzata all'interno dello scavo, viene interamente impermeabilizzata e parte dal solettone di fondo per salire fino a piano campagna con solai successivi, i quali svolgono a lungo termine il ruolo di puntone. Fino a che la struttura definitiva non viene completata il solettone di fondo risulta essere permeabile grazie a dei pozzetti di aggettamento, così da eliminare la sottospinta dell'acqua.

La sistemazione definitiva del pozzo prevede una vasca di accumulo acque a servizio dell'impianto anti-incendio con relativi locali di servizio, un by-pass tra le due canne in prosecuzione degli analoghi realizzati in naturale lungo il resto del tracciato, un percorso di evacuazione dei fumi servito da ventilatori alloggiati nel solaio superiore ed in comunicazione con l'esterno tramite un grigliato metallico.

#### 5.4 Fasi esecutive

Al fine di comprendere a pieno il contesto nel quale si colloca lo scavo in tradizionale delle gallerie doppio binario con riferimento all'avanzamento dei lavori ed alle opere ad esse circostanti si descrivono brevemente e solo a titolo illustrativo gli step di avanzamento previsti per la realizzazione delle opere.

Nel dettaglio quanto segue:

1. Scavo e realizzazione del pozzo costruttivo e di ventilazione nord e contestualmente inizio dei lavori nell'area della nuova stazione A.V., nonché realizzazione del pozzo di montaggio frese a Campo di Marte e montaggio della TBM per lo scavo delle gallerie singolo binario;
2. Scavo della canna del binario pari con la TBM attraversando a "pieno" tutta l'area del camerone della nuova stazione A.V., che ancora non è stato interamente scavato;
3. Avanzamento dello scavo all'interno del camerone sino a quota +37.0 m.s.l.m. approfondendo localmente lo scavo a quota +30.0 m.s.l.m. in corrispondenza delle due testate nord e sud, contestualmente viene ultimato lo scavo della canna del binario pari lo smontaggio ed i rimontaggio della TBM a sud (Campo di Marte) per lo scavo della canna dispari;
4. Da quota +30.0 m.s.l.m. all'interno del camerone in corrispondenza degli imbocchi delle quattro gallerie di precedenza si procederà con la realizzazione degli interventi di consolidamento, eseguendo in questa fase unicamente le perforazioni nella zona di calotta (da quota +31.0 a quota + 34.0 m.s.l.m.), che si stendono per tutta la lunghezza delle gallerie di precedenza (pari a circa 70 m) mediante perforazioni guidate potendo controllare in avanzamento la direzionalità della perforazione dal cavo della galleria già realizzato con la TBM; Per risolvere le problematiche

Committente Principale <b>RFI</b>	Alta Sorveglianza <b>ITALFERR</b>	Contraente Generale <b>NODAVIA s.c.p.a.</b>
<b>PASSANTE – LOTTO 2</b> GALLERIE NATURALI RELAZIONE TECNICO-DESCRITTIVA GENERALE		<b>PROGETTO ESECUTIVO DI I LIVELLO</b>

connesse alla realizzazione delle perforazioni si intende procedere affidandosi ad una innovativa tecnologia che consente di garantire le precisioni richieste basata sulla già nota tecnica dell'HDD (Horizontal Directional Drilling). Il metodo prevede la generazione di un sistema di referenziamento basato su un campo magnetico artificiale di coordinate note. Nella batteria di perforazione viene alloggiato un dispositivo di rilevamento in grado di misurare e calcolare le coordinate della batteria rispetto al campo magnetico artificiale. In funzione del rilievo dell'andamento della perforazione e delle tolleranze di errore impostate, vengono effettuate le correzioni mediante speciali utensili asimmetrici.

Per le due gallerie lato nord, vista la presenza del pozzo costruttivo e di ventilazione nord le perforazioni saranno eseguite per metà della lunghezza, pari a circa 30 m, dal pozzo nord e i restanti 30 m dal camerone di stazione senza la necessità di operare con perforazioni guidate garantendo altresì la direzionalità prevista;

5. Approfondimento degli scavi all'interno del camerone di stazione da quota +30.0 m.sl.m. sino a quota +19.0 m.s.l.m. e getto del solettone di fondo;
6. Completamento degli interventi di consolidamento lungo i piedritti di tutte e quattro le tratte delle gallerie di precedenza secondo quanto precedentemente definito per gli infilagli in calotta;
7. Scavo a piena sezione della galleria di precedenza binario dispari lato nord e getto del rivestimento definitivo avanzando dal camerone di stazione e contestualmente scavo della camera di manovra partendo dal pozzo costruttivo e di ventilazione nord e getto del rivestimento definitivo predisponendo la sella per la traslazione della TBM;
8. Contestualmente alle fasi 5, 6 e 7 procede lo scavo meccanizzato della canna dispari tratto sud sino al camerone di stazione, all'interno del quale, essendo ultimato lo scavo ed il getto del solettone di fondo, la TBM viene tralata così come avviene all'interno della galleria di precedenza binario dispari lato nord che deve essere ultimata prima del sopraggiungimento della fresa; la TBM stessa verrà tralata all'interno della camera di manovra, anch'essa ultimata prima della traslazione della fresa, per potersi allineare ed approssimare lo scavo della canna a singolo binario nord del binario dispari;
9. Contestualmente alla fase 8 si procederà allo scavo ed al getto del rivestimento definitivo delle tratte di gallerie di precedenza nord e sud del binario pari realizzando l'allargo alla sagoma doppio binario partendo dalla sezione già scavata dalla TBM;
10. Scavo in allargo e getto del rivestimento definitivo della galleria di precedenza binario dispari tratto sud.
11. Getto del riempimento di seconda fase dell'arco rovescio delle gallerie a doppio binario per realizzare piano di regolamento
12. Sistemazione definitiva dei pozzi Sud e Nord e della galleria costruttiva secondo gli allestimenti funzionali di progetto

Committente Principale <b>RFI</b>	Alta Sorveglianza <b>ITALFERR</b>	Contraente Generale <b>NODAVIA s.c.p.a.</b>
PASSANTE – LOTTO 2 GALLERIE NATURALI RELAZIONE TECNICO-DESCRITTIVA GENERALE		<b>PROGETTO ESECUTIVO DI I LIVELLO</b>

## 6. OPERE ACCESSORIE

### 6.1 Pozzo d'aggottamento

L'andamento altimetrico delle gallerie presenta in corrispondenza del lato Sud di Fortezza da Basso, alla confluenza di viale Spartaco Lavagnini e viale Filippo Strozzi, un punto di minimo, dove confluiranno le eventuali acque percolanti attraverso i giunti del rivestimento definitivo e gli accidentali sversamenti di liquidi inquinanti da parte di convogli merci.

E' stato quindi progettato un pozzo di aggottamento in asse alle gallerie, collegato ad esse tramite due cunicoli di piccolo diametro da realizzarsi con spingitubo. Per esigenze di accessibilità e costruibilità il pozzo è stato ubicato circa 35 m a nord del punto di minimo del piano ferro: dovrà quindi essere previsto un tratto di canaletta in contropendenza per riportare il punto di minimo idraulico in corrispondenza dell'asse pozzo.

Il pozzo ha dimensioni interne finite pari a 2.10 m x 4.60 m. La sua quota di fondo è 8.6 m più in basso del piano ferro, realizzando quindi una vasca di raccolta di circa 60 m<sup>3</sup> dove sono sistemate due pompe sommerse.

Per motivi strutturali è previsto il consolidamento del fondo scavo del pozzo mediante trattamento con Jet Grouting. Per assicurare la comunicazione tra i due scompartimenti è prevista la realizzazione di una finestra nel setto in prossimità del fondo del pozzo.

Entrambi gli scompartimenti sono accessibili ed ispezionabili tramite scale metalliche a pioli dotate di gabbia di protezione.

L'accesso dalla superficie viene garantito da un chiusino metallico, di dimensioni tali da permettere la movimentazione e la manutenzione delle pompe tramite argano.

L'acqua raccolta nella vasca in fondo al pozzo e sollevata dalle pompe sommerse viene recapitata in una vasca interrata di calma, situata in prossimità del pozzo, per poi confluire nel collettore fognario. In caso di incidente la vasca di calma commuta l'indirizzamento del flusso verso una vasca interrata di raccolta di grande dimensione, per evitare che eventuali liquidi inquinanti confluiscano nella rete fognaria.

### 6.2 Pozzo di ventilazione Sud

In prossimità dell'innesto tra la stazione AV e le gallerie a doppio binario del ramo Sud è prevista la realizzazione di un pozzo di ventilazione per l'estrazione fumi nell'eventualità di un incendio in galleria.

Il condotto verticale circolare, di diametro interno pari a 3.80 m, è collegato alle gallerie a doppio binario attraverso un cunicolo orizzontale che, come un bypass, collega le gallerie principali. Il condotto verticale s'innesta sul bypass, in calotta dello stesso, nell'interasse delle gallerie principali ed è

Committente Principale <b>RFI</b>	Alta Sorveglianza <b>ITALFERR</b>	Contraente Generale <b>NODAVIA s.c.p.a.</b>
<b>PASSANTE – LOTTO 2</b> GALLERIE NATURALI RELAZIONE TECNICO-DESCRITTIVA GENERALE		<b>PROGETTO ESECUTIVO DI I LIVELLO</b>

completato con un setto di separazione per indirizzare i flussi d'aria nelle giuste direzioni dalle gallerie ai locali che ospitano i ventilatori. Il condotto orizzontale sarà scavato dalle gallerie principali, mentre il camino verticale sarà realizzato scavando a partire dalla superficie successivamente allo scavo di sbancamento che porta il piano campagna a circa 41.00 m s.l.m. Per il consolidamento del terreno, l'intervento è di tipo colonnare dall'alto e viene realizzato contestualmente all'intervento previsto per lo sbocco della fresa del B.D. nel camerone di Stazione.

I fumi estratti confluiranno nel camino di ventilazione della stazione, attraverso due condotti a sezione rettangolare costruiti in fuori terra e poi ritombati in fase definitiva insieme alle altre opere previste nell'area a sud della stazione (by-pass torrente Mugnone, sottoservizi ecc.). I condotti, di dimensione pari a 2.20 m x 2.50 m, non sono comunicanti, al fine di evitare fenomeni di ritorno dei fumi.