

COMMITTENTE



PROGETTAZIONE:



DIREZIONE TECNICA

U.O. GALLERIE

PROGETTO DEFINITIVO

Nuova linea Ferrandina - Matera La Martella per il collegamento di Matera con la rete ferroviaria nazionale

NUOVA LINEA FERRANDINA – MATERA LA MARTELLA

Misure e controlli contro i pericoli associati all'ingresso di metano in galleria durante l'esercizio ferroviario

SCALA:

-

COMMESSA LOTTO FASE ENTE TIPO DOC. OPERA/DISCIPLINA PROGR. REV.

I A 5 F 0 1 D 0 7 R H G N 0 0 0 0 0 0 9 A

Rev.	Descrizione	Redatto	Data	Verificato	Data	Approvato	Data	Autorizzato Data
A	EMISSIONE DEFINITIVA	P. Berry	luglio 2019	M. Ricci <i>M. Ricci</i>	luglio 2019	F. Gernone <i>F. Gernone</i>	luglio 2019	A. Sciotti luglio 2019
								ITALFERR S.p.A. U.O. GALLERIE Dott. Ing. Alessandra Sciotti Ordine degli Ingegneri di Roma n° 13846

File: IA5F01D07RHGN000009A

n. Elab.:

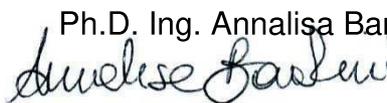
GALLERIA MIGLIONICO

**MISURE E CONTROLLI DI SICUREZZA
CONTRO I PERICOLI ASSOCIATI ALL'INGRESSO DI METANO
IN GALLERIA DURANTE L'ESERCIZIO FERROVIARIO**

Prof. Ing. Paolo Berry

già Ordinario della Cattedra di “Arte Mineraria” ed “Ingegneria e Sicurezza degli Scavi”
Scuola di Ingegneria e Architettura, Alma Mater Studiorum – Università di Bologna



Ph.D. Ing. Annalisa Bandini


Ph.D. Ing. Carlo Cormio


Bologna, Luglio 2019

Nuova Linea Ferrandina – Matera La Martella
Galleria Miglionico.
Misure e controlli di sicurezza contro i pericoli associati all'ingresso di metano in
galleria durante l'esercizio ferroviario



Pagina intenzionalmente bianca

Competenze di SERENGEO nel settore ingegneria e sicurezza degli scavi

SERENGEO S.r.l., spin-off accreditato dell'Alma Mater Studiorum – Università di Bologna, è costituito da Professori universitari e Dottori di Ricerca che trasferiscono lo stato delle conoscenze tecniche e scientifiche più avanzate al settore dell'Ingegneria degli scavi.

SERENGEO svolge attività di consulenza, progettazione, ricerca scientifica avanzata, determinazione di valori delle caratteristiche fisico – meccaniche di materiali ed ammassi rocciosi con prove di laboratorio ed in situ.

SERENGEO detiene il know how tecnico – scientifico più avanzato che ha sviluppato in ambito universitario, collaborando con Istituti di Ricerca italiani ed esteri, pubblici e privati nello sviluppo ed applicazione di soluzioni innovative nei settori dell'ingegneria mineraria, ambientale e della sicurezza, della meccanica delle rocce e della geotermia.

Sono numerose (oltre 300) le pubblicazioni scientifiche redatte dai soci di SERENGEO sui diversi temi di Geo-Ingegneria di cui sono competenti.

Tra le pubblicazioni su riviste e gli atti di conferenze nazionali ed internazionali, sono da citare i seguenti contributi rilevanti sul tema dell'ingegneria e la sicurezza degli scavi in sottterraneo:

- Berry P., Dantini E.M., Martelli F., Sciotti M. (1999) **Emissioni di metano durante lo scavo di gallerie**. Atti del Convegno Nazionale su: Attualità e problematiche degli scavi di gallerie in Italia, Verona, pp. 5 ÷ 28 e 132 ÷ 135, marzo 1999.
- Berry P., Dantini E.M., Martelli F., Sciotti M. (2000) **Emissioni di metano durante lo scavo di gallerie**. Quarry and Construction, anno XXXVIII, n° 1, pp. 37 ÷ 64, gen. 2000
- Berry P. — **Alta velocità in sicurezza. Il ruolo dell'Università di Bologna**. Quarry and Construction, anno XXXVIII, n° 9, pp. 60 ÷ 64, set. 2000.
- Berry P., Calzolari F., Martelli F., Obici C., Paggi P., Pavone V. (2001) Studio e ricerca interregionale di soluzioni tecniche atte a rendere sicure macchine operatrici ed impianti utilizzati nella costruzione delle gallerie grisutose della Linea Ferroviaria "Alta Velocità" nel tratto appenninico Firenze. Monografia stampata in proprio dalla ASL Bologna Sud, Regione Emilia Romagna, Bologna.
- Berry P. (2001) **Rapporto tra scienza, tecnica e normativa di sicurezza**. Atti del Convegno Internazionale "La sicurezza nella realizzazione di grandi opere in sottterraneo", pp. 66-70 Bologna, 20-21 Settembre 2001.
- Bandini A., Berry P., Calzolari F., Colaïori M., Cormio C., Lisardi A. (2014) **Nascita ed evoluzione delle NIR**. Atti Workshop Nazionale "NIR 2013 – Note Interregionali di Ingegneria della Sicurezza nello scavo di gallerie". Bologna 4-5 Luglio 2014, Alma Mater Studiorum Università di Bologna, AMS Acta, p. 7-16, ISBN: 9788898010202.
- Bandini A., Berry P., Colaïori M., Cormio C., Lisardi A. (2014) **Il franco di sicurezza nello scavo di gallerie grisutose**. Atti Workshop Nazionale "NIR 2013 – Note Interregionali di Ingegneria della Sicurezza nello scavo di gallerie". Bologna 4-5 Luglio 2014, Alma Mater Studiorum Università di Bologna, AMS Acta, p. 63-77, ISBN: 9788898010202.
- Bandini A., Berry P., Cormio C. (2014) **Soluzioni ingegneristiche introdotte dalla NIR 41**. Atti Workshop Nazionale "NIR 2013 – Note Interregionali di Ingegneria della Sicurezza nello scavo di gallerie". Bologna 4-5 Luglio 2014, Alma Mater Studiorum Università di Bologna, AMS Acta, p. 113-124, ISBN: 9788898010202.
- Selleri A., Berry P., Messina L., Bandini A., Cormio C. (2014) S-574. **Progettazione, costruzione e primi riscontri di una fresa idonea ad operare in ambienti grisutosi**. Atti Workshop Nazionale "NIR 2013 – Note Interregionali di Ingegneria della Sicurezza nello scavo

di gallerie”. Bologna 4-5 Luglio 2014, Alma Mater Studiorum Università di Bologna, AMS Acta, p. 183-192, ISBN: 9788898010202.

Il Prof. Ing. Paolo Berry, già Ordinario della Cattedra di “Arte Mineraria” ed “Ingegneria e Sicurezza degli Scavi” della Scuola di Ingegneria e Architettura, Alma Mater Studiorum – Università di Bologna, è co-autore delle Note Interregionali per la sicurezza nello scavo di gallerie (Standard di sicurezza per la realizzazione delle Grandi Opere Infrastrutturali) emanate dalle Regioni Emilia Romagna e Toscana a partire dal 1998, oggi riviste in forma di Linee Guida Nazionali approvate dal gruppo di lavoro Grandi Opere del Coordinamento Tecnico Interregionale PSAL delle Regioni e delle Province Autonome.

Con riferimento al tema della sicurezza nello scavo di gallerie civili e minerarie in formazioni grissute, sono da richiamare alcune tra le più importanti attività svolte dai soci di SERENGEO:

- classifica tecnica (in fase di progetto), in relazione al rischio gas metano, delle gallerie:
 - del progetto Treno Alta Velocità, tratta Bologna – Firenze;
 - delle gallerie del progetto Variante Autostradale di Valico, tratta Bologna – Firenze;
 - delle gallerie del progetto Terza Corsia Autostradale, Autostrada A1 tratta Barberino – Incisa e Autostrada A14 tratta Senigallia – Ancona Nord;
 - delle gallerie del progetto DG41 – 3° megalotto della S.S. 106 Jonica, tratta S.S. 534 – Roseto Capo Spulico;
 - delle gallerie dell’Asse viario Marche-Umbria e Quadrilatero di penetrazione interna Maxilotto n. 2 – Pedemontana delle Marche, tratto "Fabriano – Muccia/Sfercia";
 - della galleria ferroviaria Miglionico, tratta Ferrandina – Matera (Progetto Esecutivo 2006);
- progettazione degli interventi per lo scavo in condizioni di sicurezza:
 - della galleria ferroviaria Miglionico, tratta Ferrandina – Matera (Progetto Esecutivo 2006);
 - della galleria acquedottistica Pavoncelli Bis (realizzata con tecnica di scavo meccanizzato – EPB-TBM), tratto Caposele – Conza della Campania, progetto di integrazione del canale principale dell’Acquedotto Pugliese;
 - delle gallerie (realizzate con tecnica di scavo meccanizzato – TBM) del progetto Tunnel di Base del Brennero, Lotto Mules 2-3 (in fase di gara).

Indice dei contenuti

1. Premessa	1
2. Documentazione consultata.....	3
3. Inquadramento dell'opera ed interventi stabiliti dal Progetto Definitivo.....	4
4. Studi, ricerche ed indagini sulle formazioni grisutose attraversate dal tracciato della Galleria e della Finestra	9
5. Metodi e controlli a tutela della sicurezza nella galleria in esercizio	10
5.1. Compartimentazione idraulica della Galleria e della Finestra.....	11
5.2. Ottimizzazione delle geometrie di intradosso della Galleria.....	13
5.3. Monitoraggio delle concentrazioni di metano	15
5.3.1. Innovativi rilievi di gas in Galleria e Finestra con spettroscopia laser	16
5.3.2. Linea di alimentazione elettrica.....	22
5.3.3. Linea di trasmissione del segnale	22
5.3.4. Acquisizione, elaborazione e visualizzazione dati	22
5.3.5. Allarmi e procedure di sicurezza	22

Nuova Linea Ferrandina – Matera La Martella
Galleria Miglionico.
Misure e controlli di sicurezza contro i pericoli associati all'ingresso di metano in
galleria durante l'esercizio ferroviario



Pagina intenzionalmente bianca

1. Premessa

Italferr S.p.A. (nel seguito Italferr) ha affidato a SERENGEO S.r.l. (nel seguito SERENGEO) l'incarico tecnico – scientifico di supportarla nella redazione del Progetto Definitivo per gli interventi nella Galleria Miglionico (nel seguito Galleria) e per la costruzione della Finestra Miglionico (nel seguito Finestra), opera della nuova linea ferroviaria Ferrandina – Matera.

Il supporto di SERENGEO è focalizzato a realizzare soluzioni di Ingegneria degli Scavi idonee a garantire condizioni di massima sicurezza in ordine a:

- quantità di metano e sua origine nelle formazioni grisutose limitrofe al tracciato della Galleria;
- pericoli associati a miscele aria – metano generate da afflussi (“inrush”) di gas nell’atmosfera della Galleria e della Finestra.

Considerati i risultati degli studi, ricerche e valutazioni del Prof. Paolo Berry (1999 – 2006), le vigenti Norme, Buone Pratiche e Linee Guida, l'incarico stabilisce le soluzioni specialistiche idonee ad annullare i pericoli di detonazioni / deflagrazioni di miscele aria – metano, nel corso di:

- realizzazione della Finestra, del camerone di manovra e della zona filtro;
- lavori di completamento degli interventi di ripristino ed ammodernamento della Galleria;
- esercizio ferroviario.

In breve, SERENGEO ha determinato le soluzioni tecniche di sicurezza sviluppando i seguenti temi ed attività:

- esame di documenti storici sulle caratteristiche delle formazioni grisutose nell’area di studio;
- zonizzazione dei tratti di galleria potenzialmente soggetti ad “afflussi di metano”, in base ai dati storici, alle geo-strutture, ai recenti rilievi sperimentali;
- classifica del livello di pericolo associato a miscele aria – metano nei cantieri, considerando la normativa vigente ed i riferimenti tecnici per lo scavo di gallerie “grisutose”, i risultati degli studi sui dati storici, i modelli geo-strutturali riconducibili a potenziali veicoli / trappole di metano, i recenti rilievi sperimentali e le geometrie delle opere in sotterraneo;
- Linee Guida da adottare per la redazione delle procedure di sicurezza nello scavo di formazioni grisutose;
- pianificazione del monitoraggio, automatico e manuale, idoneo a determinare le caratteristiche fisiche della miscela aria – metano nel cantiere sotterraneo durante l’esercizio dell’opera.

Per la redazione del Progetto Definitivo SERENGEO ha condotto tre distinte fasi di Studi e Ricerche, i cui risultati sono descritti e commentati nei documenti:

1. Risultati dell'attività svolta dal Tecnico Specialista per la ricerca e caratterizzazione di trappole e flussi di metano e per la determinazione della classe da attribuire alla Finestra Miglionico;
2. Misure e procedure di sicurezza da adottare per realizzare gli interventi di ripristino della galleria;
3. Misure e controlli contro i pericoli associati all'ingresso di metano in galleria durante l'esercizio ferroviario.

Le soluzioni tecniche e le procedure ingegneristiche, elaborate per la redazione del Progetto Definitivo, da adottare per impedire o gestire, in condizioni di massima sicurezza, inneschi di miscele aria – metano, traggono origine dall'indiscutibile certezza che la Galleria e la Finestra sono "immerse" in una formazione grisutosa piuttosto ampia e profonda.

La presenza di metano nella Galleria è stata sottolineata dal Progetto Costruttivo (1984 – 1985) ed è stata resa evidente con la costruzione dei tratti della Galleria a doppio binario (1986 – 1990) e di quello a singolo binario (1993 – 1998), dalla rapida ed importante fessurazione del rivestimento definitivo in calcestruzzo armato, dalle conseguenti attività di ricerca, indagini e valutazioni per risanare e portare a termine la costruzione della Galleria (1999 – 2006).

Le fasi progettuali e realizzative dell'opera hanno confermato la definizione di "grisutosa" attribuita alla Galleria. Infatti, sono stati registrati continui afflussi di gas dai sondaggi esplorativi e geognostici e nel cantiere sotterraneo. A scavo terminato, la presenza di metano si è in parte ridotta nei tratti con rivestimento definitivo parzialmente impermeabile. Il deterioramento (fessurazioni) ed i ridotti spessori del rivestimento, misurati localmente durante i rilievi eseguiti dal 1999 al 2005, hanno favorito l'ingresso del gas nella Galleria.

Per garantire condizioni di massima sicurezza in presenza di prevedibili miscele aria – metano nella Galleria durante l'esercizio ferroviario, il progetto elaborato da Italferr nel 2006 stabiliva:

- posa in opera dell'impermeabilizzazione "full round" (i.e. ad anello chiuso);
- realizzazione di un pozzo di ventilazione;
- installazione, nel pozzo, di un ventilatore per i casi in cui la ventilazione naturale non garantisce le portate d'aria necessarie per diluire il metano penetrato in galleria per difetto di impermeabilizzazione;
- l'installazione del monitoraggio delle concentrazioni di metano con sensori catalitici, con passo di 100 m, lungo l'intero tracciato della galleria.

Il Progetto Definitivo del 2019 revisiona sostanzialmente il sistema di sicurezza sviluppato con lo studio redatto dal Prof. Berry nel 2004.

In particolare, elimina il pozzo di ventilazione ed il sistema di ventilazione forzata, imponendo l'adozione di soluzioni tecnologiche in grado di rilevare concentrazioni di metano nell'intero tracciato della Galleria e della Finestra, con una risoluzione adeguata al contesto ed al conseguimento di condizioni di massima sicurezza nella fase di esercizio ferroviario.

I capitoli successivi contengono:

- l'elenco dei documenti consultati ed analizzati (capitolo 2);
- una breve descrizione dell'opera e degli interventi previsti dal Progetto Definitivo (capitolo 3);
- una sintesi dei risultati degli studi, ricerche ed indagini sulle formazioni grisutose attraversate dal tracciato della Galleria e della Finestra (capitolo 4);
- i criteri progettuali e le soluzioni tecniche, tecnologiche e procedurali da adottare per garantire condizioni di massima sicurezza contro inneschi di miscele aria – metano nella Galleria e nella Finestra in esercizio (capitolo 5);

2. Documentazione consultata

Per adempiere l'incarico sono stati consultati i seguenti elaborati, forniti da Italferr, ai quali si farà riferimento citando, di volta in volta, il numero d'ordine che è stato loro attribuito nell'elenco che segue:

- [1] Elaborati del Progetto Definitivo:
 - [1.1] Galleria Miglionico. Profilo geotecnico (codice elaborato: IA5F01D07F5GN0100001A);
 - [1.2] Galleria Miglionico. Tratte a singolo binario - Sezioni tipo di intradosso (codice elaborato: IA5F01D07WBGN0100001A);
 - [1.3] Galleria Miglionico. Tratte a doppio binario - Sezioni tipo di intradosso (codice elaborato: IA5F01D07WBGN0100002A);
 - [1.4] Galleria Miglionico. Sezione tipo 1 - Scavo, consolidamenti e carpenteria (codice elaborato: IA5F01D07BBGN0100001A);
 - [1.5] Galleria Miglionico. Sezione tipo 2, 2 bis - Scavo, consolidamenti e carpenteria (codice elaborato: IA5F01D07BBGN0100002A);
 - [1.6] Galleria Miglionico. Sezione tipo 3, 3 bis - Scavo, consolidamenti e carpenteria (codice elaborato: IA5F01D07BBGN0100003A);
 - [1.7] Galleria Miglionico. Sezione tipo 4 - Scavo, consolidamenti e carpenteria (codice elaborato: IA5F01D07BBGN0100004A);
 - [1.8] Galleria Miglionico. Sezione tipo 5 - Scavo, consolidamenti e carpenteria (codice elaborato: IA5F01D07BBGN0100005A);
 - [1.9] Galleria Miglionico. Sezione tipo 6 – Scavo, consolidamenti e carpenteria (codice elaborato: IA5F01D07BBGN0100006A);
 - [1.10] Galleria Miglionico. Nicchia tipo QdT in nicchia esistente tipo A – Carpenteria, scavo e consolidamenti (codice elaborato: IA5F01D07BBGN0100008A);
 - [1.11] Finestra Miglionico. Planimetria e profilo longitudinale (codice elaborato: IA5F01D07L7GN0200001A)
 - [1.12] Finestra carrabile. Impianto controllo fumi ed estrazione gas di scarico – Layout impiantistico (codice elaborato: IA5F00D17PBAI0707001A);
 - [1.13] Studio per la presenza di gas. Risultati dell'attività svolta dal Tecnico Specialista per la ricerca e caratterizzazione di trappole e flussi di metano e per la determinazione della classe da attribuire alla Finestra Miglionico (codice elaborato: IA5F01D074RHGN0000F07A)
 - [1.14] Studio per la presenza di gas. Misure e procedure di sicurezza da adottare durante la realizzazione degli interventi di ripristino della galleria (codice elaborato: IA5F01D074RHGN0000F08A);

Inoltre, è stato considerato lo stato dell'arte sulle tecnologie più innovative per il monitoraggio automatico delle concentrazioni di metano nelle gallerie in costruzione ed in esercizio.

3. Inquadramento dell'opera ed interventi stabiliti dal Progetto Definitivo

La Galleria ferroviaria Miglionico (Figura 1) è l'opera di maggiore importanza della linea Ferrandina – Matera, lunga circa 20 km, che si collegherà con la linea Battipaglia – Potenza – Metaponto.

La Galleria, realizzata negli anni '80 – '90, attraversa, con direttrice WSW – ENE, il valico spartiacque dei bacini dei fiumi Bradano e Basento, con un tracciato di 6463,44 m che da pk 2+390,45 (imbocco lato Ferrandina) raggiunge pk 8+853,89 (imbocco lato Matera). Una limitata porzione del tracciato (192,50 m), ripartita tra i due imbocchi, è realizzata in artificiale (Tabella 1).

Planimetricamente, il tracciato, in gran parte rettilineo, presenta una curvatura nel tratto prossimo all'imbocco Matera, a partire dalla pk 7+005 circa.

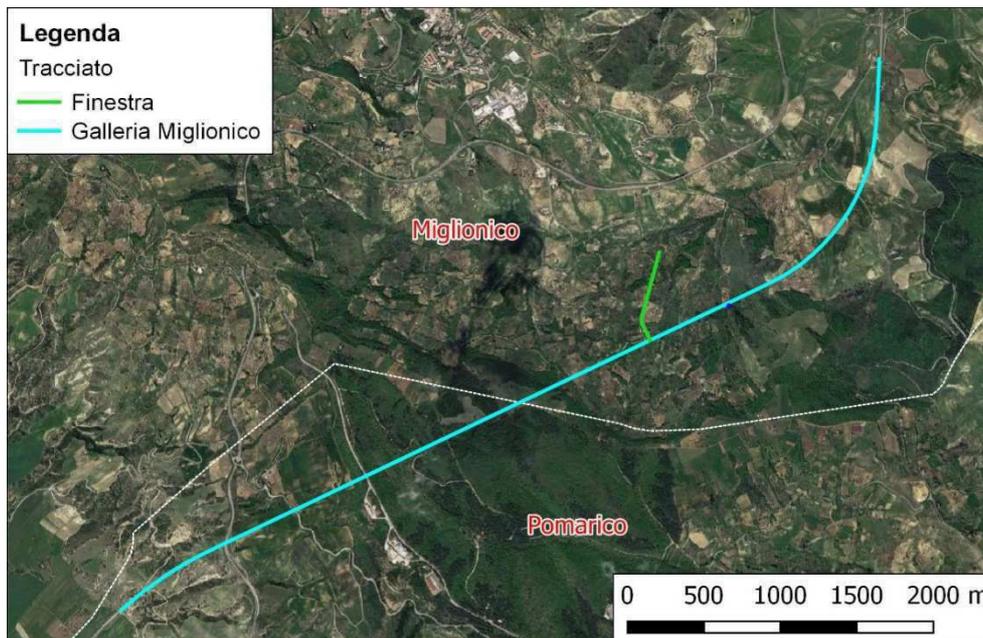


Figura 1. Tracciato della Galleria

Tabella 1. Caratteristiche generali della Galleria

Galleria Miglionico	
Lunghezza (m)	6463,44
Lunghezza tratti galleria artificiale (m)	192,50
Lunghezza galleria naturale (m)	6270,94
Pk imbocco galleria artificiale lato Ferrandina	2+390,45
Pk imbocco galleria naturale lato Ferrandina	2+437,95
Pk imbocco galleria naturale lato Matera	8+708,89
Pk imbocco galleria artificiale lato Matera	8+853,89

Il profilo altimetrico (Figura 2), a schiena d'asino, sale debolmente dai due imbocchi verso il centro della Galleria.

Del Progetto Definitivo si riportano, perché fondamentali per l'incarico, la lunghezza e le sezioni di intradosso dei tratti a singolo e doppio binario (Tabella 2, Figura 3, Figura 4 e Figura 5) che hanno, rispettivamente, raggio equivalente di 3,35 m e 4,50 m.

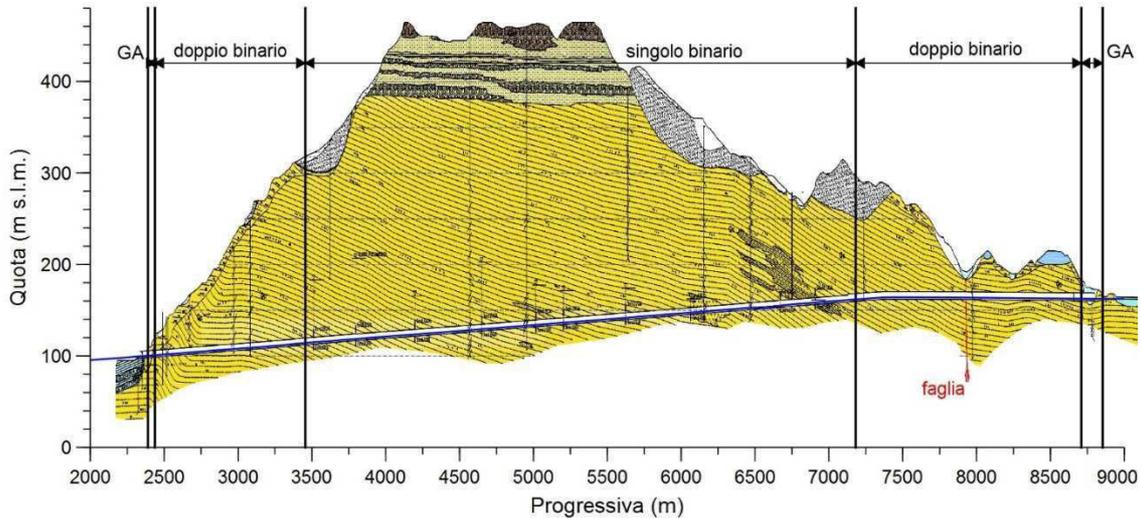


Figura 2. Profilo altimetrico della Galleria e tratti a singolo e a doppio binario (GA: galleria artificiale) (da [1.1])

Tabella 2. Sezioni della Galleria. Il progetto Definitivo estende i tratti in artificiale, allungando il tracciato della Galleria di circa 95 m

Pk inizio	Pk fine	Lunghezza (m)	Sezione Galleria	Raggio equivalente intradosso (m)
2+345,30	2+438,45	93,15	circolare a singolo binario	3,35
2+438,45	3+353,30	914,85	policentrica a doppio binario	4,50
3+353,30	7+334,47	3981,17	circolare a singolo binario	3,35
7+334,47	8+709,39	1374,92	policentrica a doppio binario	4,50
8+709,39	8+904,39	195,00	circolare a singolo binario	3,35

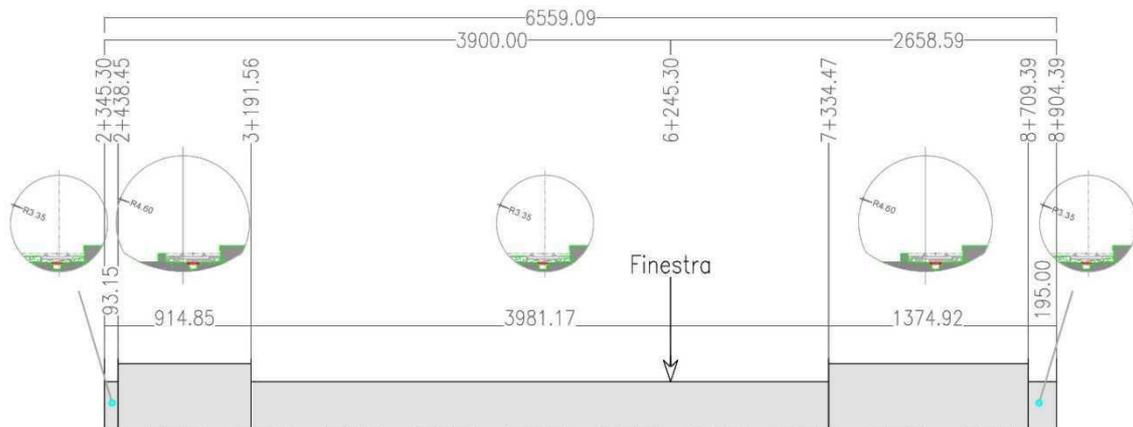


Figura 3. Schema dell'estensione dei tratti con sezione di intradosso a singolo e doppio binario

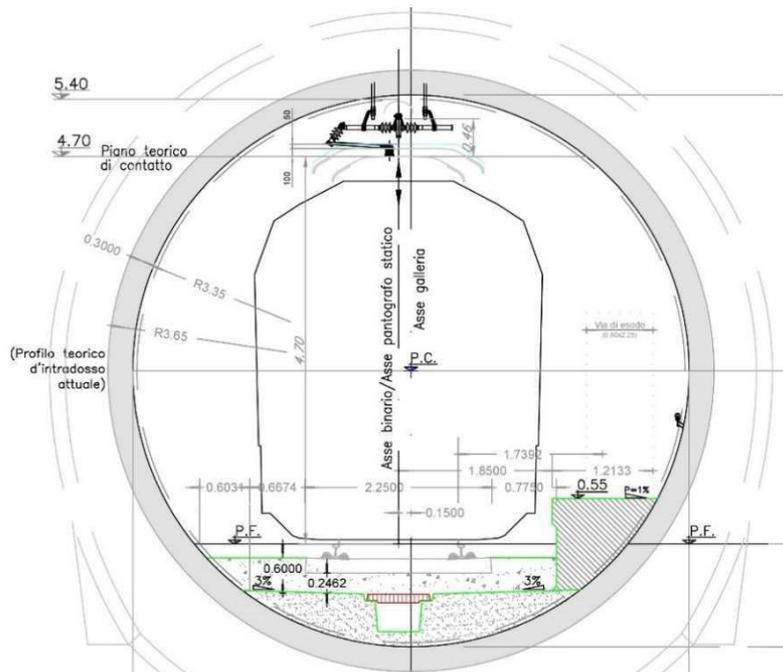


Figura 4. Sezione di intradosso nei tratti a singolo binario (da [1.2]) ed elementi costruttivi (staffe di supporto) dell'impianto di alimentazione elettrica in corrente continua (linea aerea).

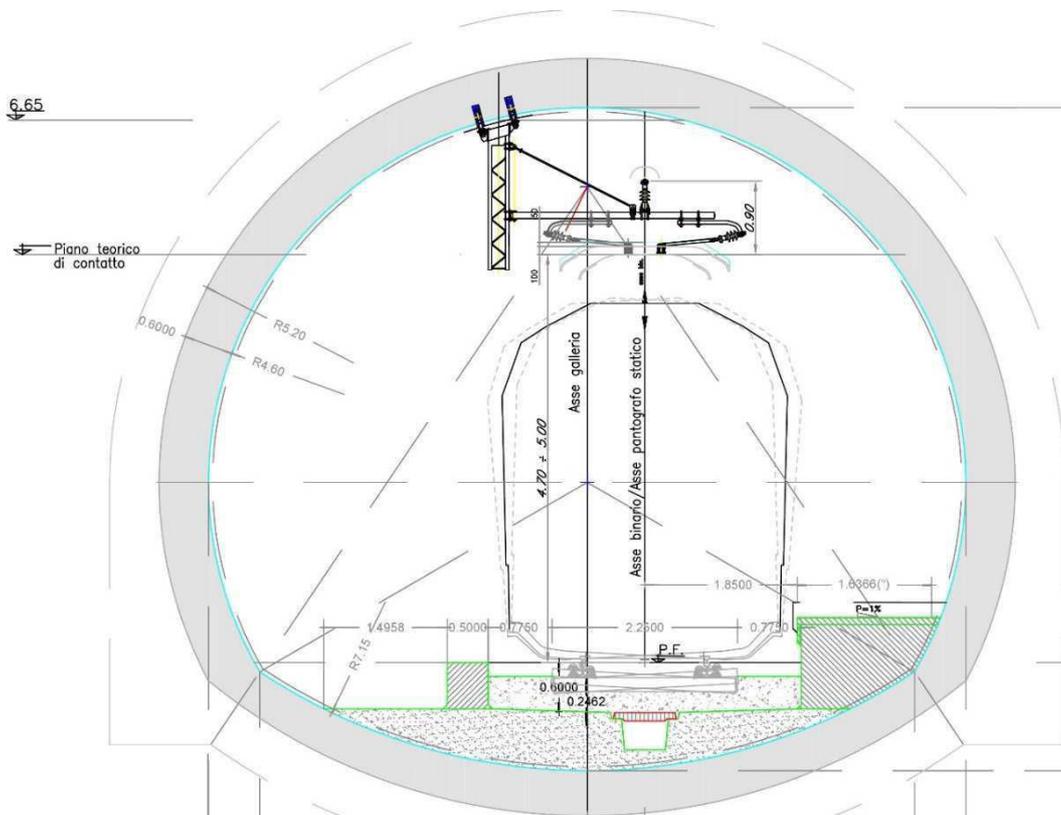


Figura 5. Sezione di intradosso nei tratti a doppio binario (da [1.3]) ed elementi costruttivi (staffe di supporto) dell'impianto di alimentazione elettrica in corrente continua (linea aerea).

Il Progetto Definitivo riguarda anche la realizzazione di (Figura 6 e Figura 7, cfr. elaborato [1.11]):

- una finestra di accesso (Finestra Miglionico) alla Galleria:
 - lunga circa 577 m, di cui 541,5 m circa in naturale e 35,5 m in artificiale all'imbocco;
 - che interseca la Galleria alla pk 6+245,30;
 - divisa in due tratti (zona di esodo e zona di transizione, Figura 7) da uno sbarramento intermedio;
- un camerone lungo circa 23 m, per la manovra dei mezzi di soccorso, in prossimità dell'innesto della Finestra con la Galleria (Figura 8, Figura 9 e Figura 10, cfr. elaborato [1.12]);
- una "zona filtro" antincendio lunga circa 10 m, che collega il camerone di manovra alla Galleria (Figura 8, Figura 9 e Figura 10, cfr. elaborato [1.12]).

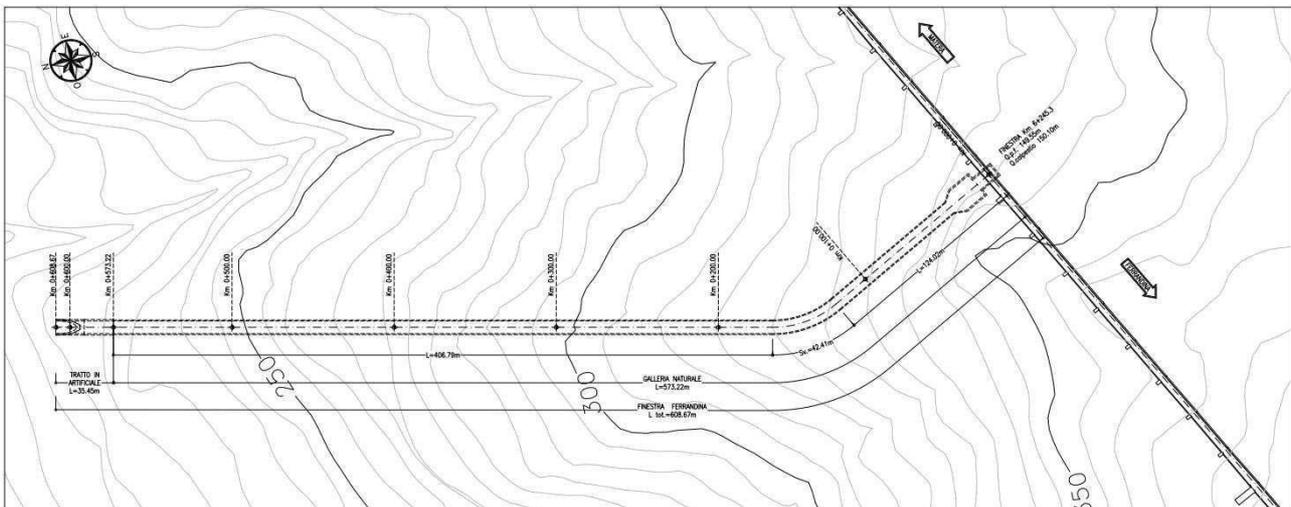


Figura 6. Planimetria della Finestra, del camerone di manovra e della zona filtro (da [1.11])

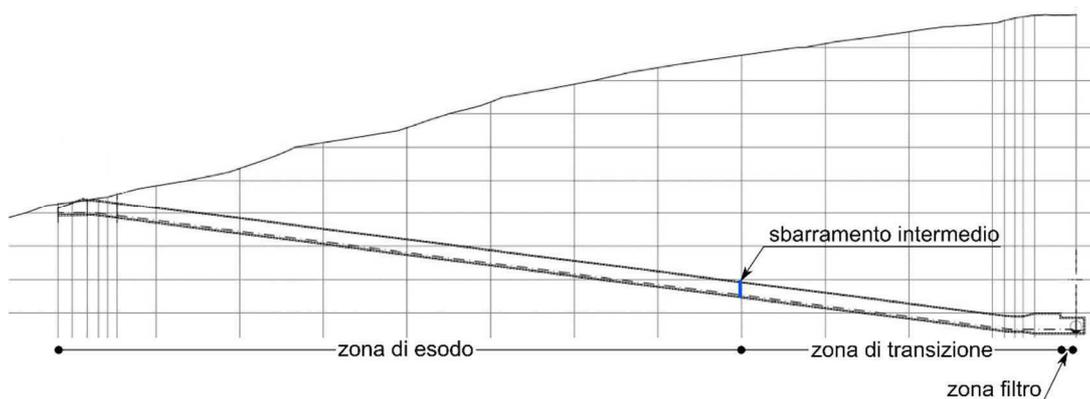


Figura 7. Profilo altimetrico della Finestra (modificato da [1.11])

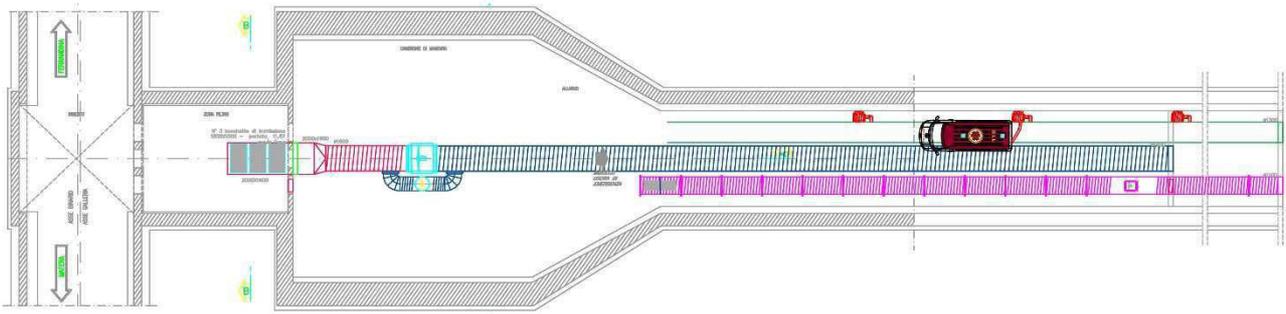


Figura 8. Planimetria del camerone di manovra e della zona filtro (da [1.12])

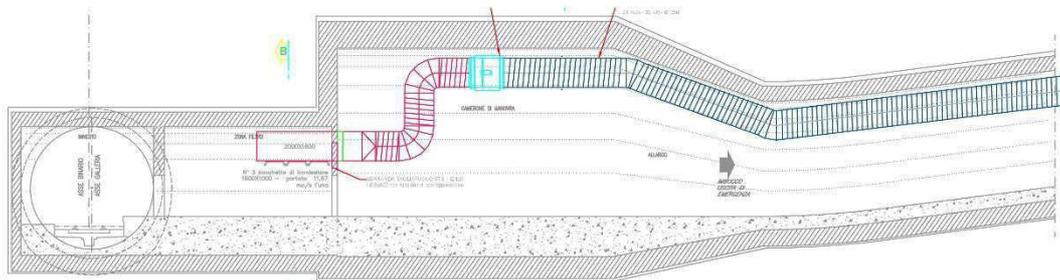


Figura 9. Sezione longitudinale del camerone di manovra e della zona filtro (da [1.12])

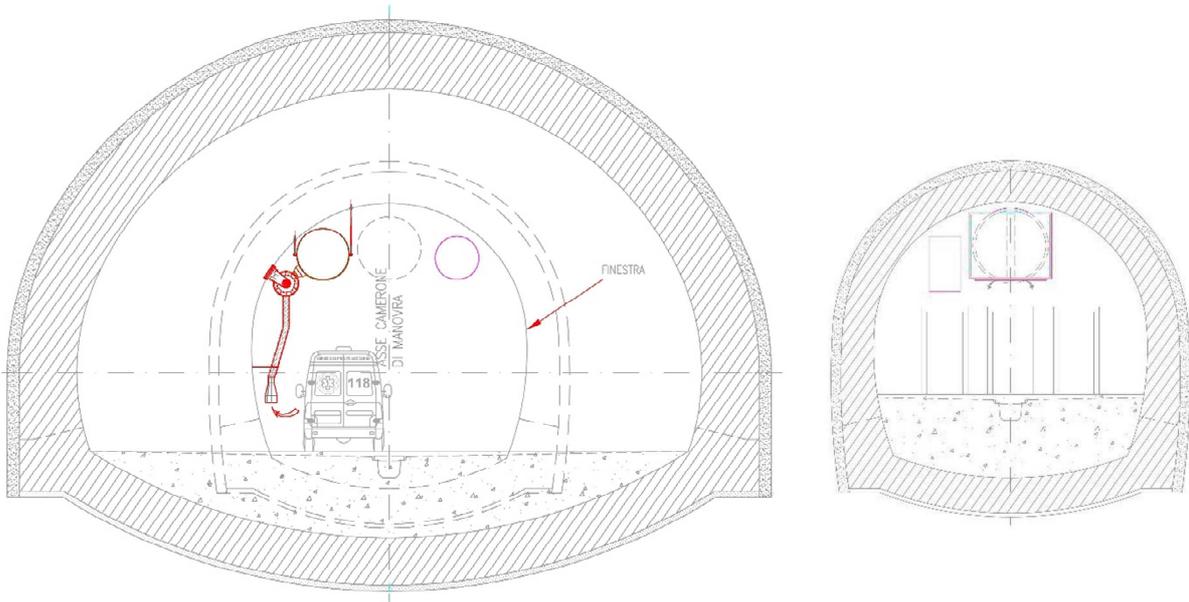


Figura 10. Sezioni trasversali del camerone di manovra (a sinistra) e della zona filtro (a destra) (da [1.12])

4. Studi, ricerche ed indagini sulle formazioni grisutose attraversate dal tracciato della Galleria e della Finestra

La previsione che, nel corso dell'esercizio ferroviario, possano verificarsi afflussi di metano nella Galleria o nella Finestra, si basa sui risultati delle ricerche ed indagini rappresentati dettagliatamente nell'elaborato [1.13] e sui dati dei rilievi storici eseguiti durante il progetto e la costruzione dell'opera negli anni '80 e '90, acquisiti:

- prima dell'avvio della costruzione della Galleria;
- durante i lavori di scavo;
- successivamente alla costruzione, nel corso dei sopralluoghi effettuati e durante le attività di monitoraggio in Galleria propedeutiche agli interventi di messa in sicurezza.

I principali elementi che dimostrano la presenza di gas nell'ammasso a tergo del rivestimento della Galleria nell'intero tracciato sono illustrati in dettaglio negli elaborati [1.13] e [1.14].

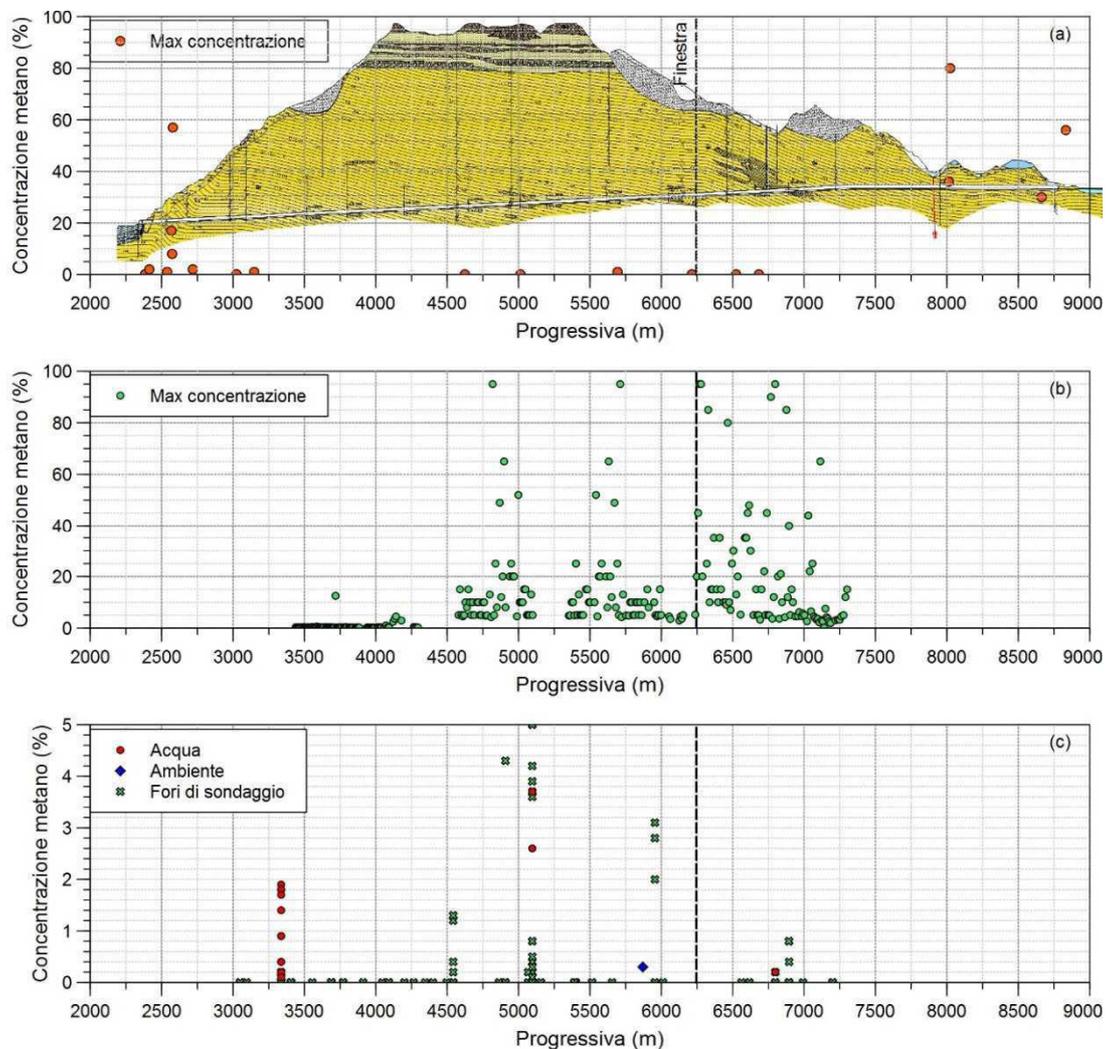


Figura 11. Concentrazioni volumetriche di metano misurate a boccaforo dei sondaggi geognostici (a) e dei fiori di consolidamento (b), ed in Galleria nel corso delle indagini propedeutiche agli interventi di ripristino (c) (da [1.13])

In sintesi, le ricerche bibliografiche ed il complesso dei rilievi e delle indagini passate e recenti eseguite nella Galleria:

- dimostrano che è immersa in terreni inequivocabilmente “grisutosi”;
- indicano che le formazioni attraversate possono esercitare, in alcuni tratti, uno stato di sollecitazione tale da provocare danni strutturali al rivestimento della galleria, condizionando potenziali afflussi di metano.

5. Metodi e controlli a tutela della sicurezza nella galleria in esercizio

Le soluzioni progettuali, presentate da SERENGEO nei paragrafi seguenti, stabiliscono metodi per impedire pericolosi inneschi di miscele aria – metano, nella Galleria, durante l'esercizio ferroviario.

Il Tecnico Specialista, in base alla sua specifica esperienza pluridecennale, ad approfonditi studi, ricerche scientifiche ed indagini in situ, ha stabilito che è indispensabile realizzare e garantire la compartimentazione idraulica della Galleria e della Finestra, impermeabilizzando full-round (i.e. ad anello chiuso) il rivestimento definitivo in calcestruzzo armato.

L'impermeabilizzazione, correttamente messa in opera, impedisce al gas di penetrare in galleria. Eccezionalmente, possono verificarsi ingressi di metano attraverso limitate ed imprevedibili fessure determinate da:

- degradazione dei materiali nel tempo;
- stati di sollecitazione, vibrazioni, sismi in grado di danneggiare il rivestimento.

È noto, ma vale la pena di ricordare, che la Nota Interregionale n° 28 “Grisù 3^a edizione” (nel seguito NIR 28) ed il suo aggiornamento (Linea Guida Grisù, del Luglio 2014, redatta dalla Conferenza delle Regioni e delle Province Autonome) sono valide per scavare, in condizioni di sicurezza, gallerie di grande diametro, con metodo a piena sezione e tecnologia tradizionale. Non sono, quindi, riferibili a gallerie già realizzate ed in esercizio. Ma si può comunque correttamente fare riferimento ai due documenti poiché sottolineano che, per opere quali by pass, finestre, nicchie, gallerie di sezione medio – piccola o da realizzare con metodo a sezione parzializzata si devono definire specifiche soluzioni di ingegneria degli scavi e di organizzazione del cantiere, procedure e sistemi di controllo che tengano conto delle peculiarità dell'opera. Il Tecnico Specialista ritiene lecito, e conforme a quanto dettato dalla Linea Guida Grisù, seguirne le indicazioni per progettare e realizzare soluzioni di sicurezza per la Galleria in esercizio, potenzialmente soggetta a penetrazione di metano.

Pertanto, è fondamentale l'adozione, in linea con l'approccio multi-barriera delle Direttive ATEX ed i contenuti della Linea Guida Grisù, di un sistema per rilevare automaticamente, continuamente e tempestivamente l'ingresso di metano, in qualsiasi punto del tracciato, con la registrazione della sua concentrazione, anche di modesta entità.

Affinché il monitoraggio sia efficace, è necessario che gli interventi per il restauro della Galleria, nicchie, nicchioni e la costruzione della Finestra realizzino un “disegno” del rivestimento che eviti condizioni di ristagno della miscela grisutosa e ne favorisca il deflusso verso i sensori di rilevamento disposti in calotta.

Infine, è necessario che si adottino specifiche procedure di intervento e soluzioni tecnologiche per:

- interrompere la circolazione ferroviaria;
- ispezionare la Galleria e la Finestra per l'identificazione della sorgente emissiva;
- ripristinare le condizioni di sicurezza (impermeabilizzazione della galleria).

5.1. Compartimentazione idraulica della Galleria e della Finestra

Il Progetto Definitivo, che intende risolvere i problemi strutturali del rivestimento definitivo ed impedire ingressi di metano (cfr. elaborato [1.14]) nell'atmosfera della Galleria, innescabili da scintille prodotte dal contatto pantografo – linea elettrica e ruote – rotaie con il transito del convoglio ferroviario, ha stabilito 6 sezioni tipo di ripristino (elaborati da [1.4] a [1.9]), da realizzare in 3 fasi principali (Figura 12):

1. parziale/totale demolizione del rivestimento definitivo;
2. messa in opera dell'impermeabilizzazione "full round";
3. getto del rivestimento definitivo (arco rovescio e calotta).

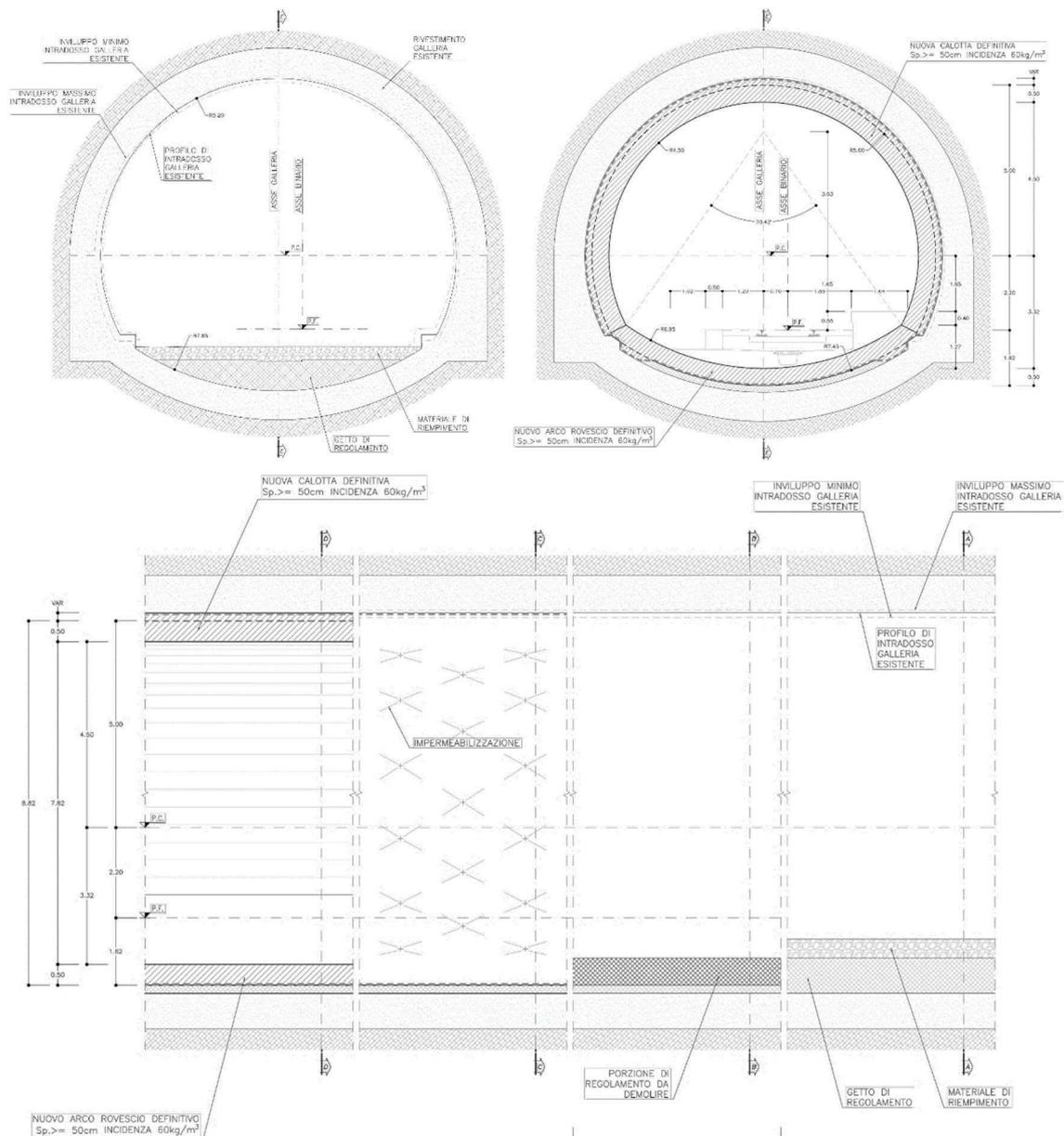


Figura 12. Sezione trasversale attuale (in alto a sinistra) e di progetto (in alto a destra) e profilo longitudinale (in basso) della Galleria con indicazione degli interventi previsti, a titolo esemplificativo, nei tratti a doppio binario (da [1.4])

L'impermeabilizzazione full round di Galleria e Finestra (Figura 13) è la principale e più importante misura che impedisce la filtrazione del metano dall'ammasso grisutoso.

Pertanto, è necessario porre particolare attenzione alle:

- caratteristiche dei teli impermeabili, che devono essere di tipo multistrato e garantire l'impermeabilità a gas ed acqua per un periodo pari alla vita utile della galleria;
- modalità di messa in opera e di giunzione dei teli, tali da garantire la tenuta dell'impermeabilità lungo il tracciato. Tenuta che non deve essere pregiudicata dalla realizzazione del rivestimento definitivo (ad esempio prevedendo la messa in opera di un telo protettivo in TNT o specifiche procedure operative);
- modalità di collaudo dell'impermeabilizzazione, prima e dopo la messa in opera dei rivestimenti definitivi (operazione che potrebbe danneggiare i teli) per accertare che non siano possibili ingressi di metano in Galleria a lavori ultimati;
- modalità di impermeabilizzazione delle riprese di getto del rivestimento definitivo. Posto che si adotti ogni accorgimento in grado di garantire l'efficacia dell'impermeabilizzazione full round, per minimizzare il pericolo di flussi di gas attraverso le discontinuità che si formano tra due getti consecutivi del rivestimento definitivo in calcestruzzo, il Tecnico Specialista raccomanda di adottare giunti impermeabili, waterstop o iniezioni di materiale sigillante (Figura 14).



Figura 13. Esempi di impermeabilizzazione full round: arco rovescio, murette e nicchie (a sinistra); calotta, murette e nicchie (a destra)



Figura 14. Esempi di sistemi per l'impermeabilizzazione delle discontinuità tra getti successivi: membrana adesiva (a sinistra); cordolo bentonitico idroespansivo (al centro); waterstop (a destra)

5.2. Ottimizzazione delle geometrie di intradosso della Galleria

Se durante lo scavo di una galleria vengono registrate, ad ogni progressiva, le modalità emissive delle formazioni grisucose attraversate dal fronte in avanzamento, si possono prevedere i possibili percorsi favorevoli a penetrazioni del metano nell'atmosfera della galleria in fase di esercizio, che rapidamente andranno ad accumularsi in chiave di volta, nella sommità delle nicchie, nelle variazioni di sezione della volta. Pertanto, già in fase di progettazione è possibile adottare soluzioni di misure e controlli della miscela aria – metano con sensori.

Il metano che penetra in Galleria, attraverso fessure / fratture (anche micrometriche) generatesi nel rivestimento definitivo, avendo densità molto inferiore a quella dell'aria segue rapidamente il suo naturale deflusso verso l'alto.

Pertanto, flussi di metano in Galleria potranno verificarsi in corrispondenza dell'arco rovescio e dei piedritti. Solo in caso di serbatoi a pressione molto elevata l'ingresso di gas potrebbe registrarsi in qualunque punto della circonferenza del rivestimento definitivo.

La concentrazione del metano, pari al 100% in corrispondenza del punto di emissione (nella roccia all'estradosso) si riduce rapidamente (prima, parzialmente, attraversando il rivestimento e poi, maggiormente, in Galleria) grazie all'istantanea, automatica miscelazione con l'atmosfera e migra, in pochi secondi, verso la chiave di volta in relazione a portata e condizioni atmosferiche (temperatura, pressione, velocità dell'aria).

Per favorire il deflusso della miscela aria – metano verso la chiave di volta, il Progetto realizza:

- raccordi svasati del rivestimento definitivo, nel passaggio da singolo a doppio binario e viceversa;
- il rivestimento delle nicchie sagomandone la volta con una pendenza orientata verso la calotta della Galleria (Figura 16).

Se gli elementi costruttivi ostacolano il percorso della miscela grisucosa verso la chiave di volta e la sua diluizione con la ventilazione naturale, potrebbero formarsi atmosfere esplosive nella zona di accumulo (ad esempio nei passaggi da doppio a singolo binario).

Conseguentemente, il Tecnico Specialista fissa la posizione dei sensori di monitoraggio:

- nella chiave di volta, lungo tutto il tracciato;
- in corrispondenza delle prevedibili zone di accumulo.

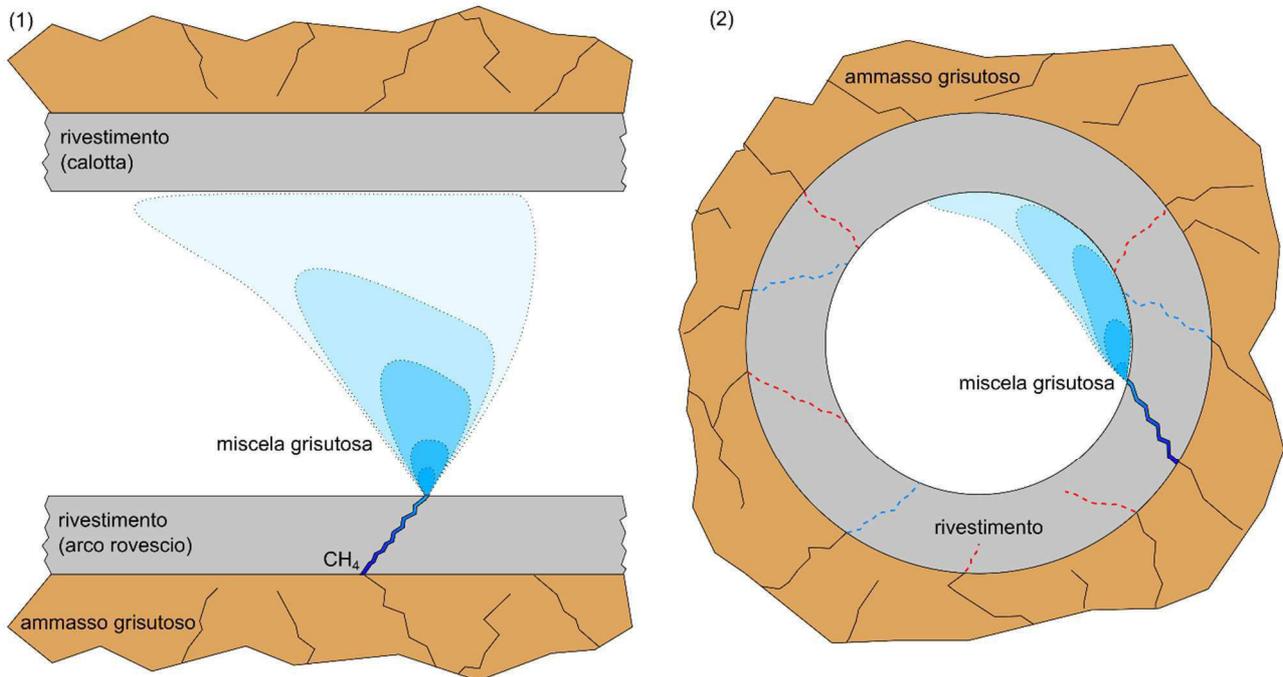


Figura 15. Schema pittorico esemplificativo della diffusione del metano in Galleria: 1) emissione dall'arco rovescio; 2) emissione dal paramento laterale (discontinuità nel rivestimento da cui può / non può fluire metano in Galleria indicate in celeste / rosso). La concentrazione si riduce man mano che il gas si disperde nell'atmosfera (miscela aria – metano).

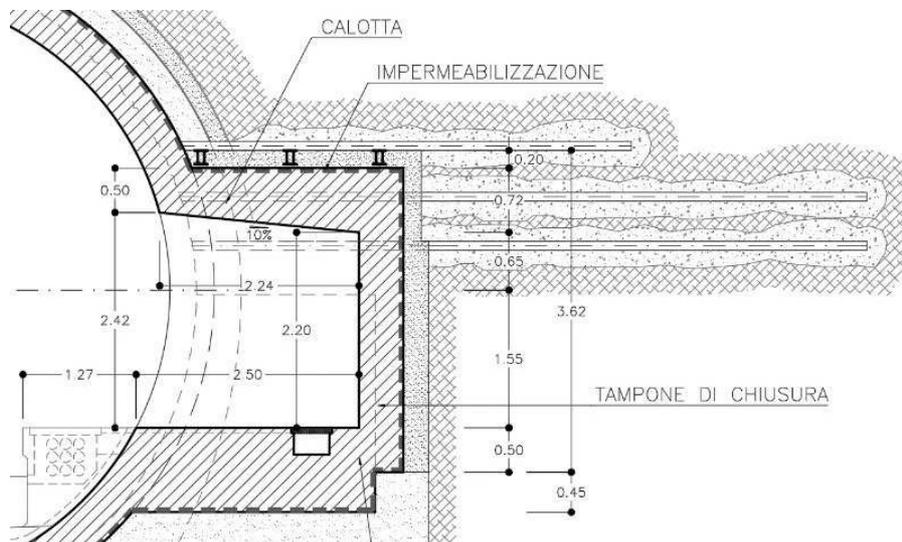


Figura 16. Esempio di nicchia (tipo QdT, cfr. elaborato [1.10]) con profilo di intradosso sagomato per favorire il deflusso del metano verso la calotta della Galleria.

5.3. Monitoraggio delle concentrazioni di metano

Il Progetto Definitivo realizza:

- una Finestra carrabile per l'evacuazione della Galleria in caso d'incendio o d'incidente. All'innesto tra Finestra e Galleria c'è un portale e si impedisce il contatto tra l'atmosfera delle due gallerie con una "zona filtro" in sovrappressione (cfr. capitolo 3).
- un sistema di monitoraggio automatico e continuo che individua tempestivamente, lungo il tracciato, la presenza di miscela aria – metano.

Il sistema di monitoraggio è costituito da (Figura 17):

1. rilevatori di gas con spettroscopia infrarossa (nel seguito rilevatori IR):
 - a percorso aperto (open path), che monitorano l'intero tracciato della Galleria;
 - puntuali, per monitorare la Finestra e le zone di accumulo;
2. linea di alimentazione in corrente continua a 24 V;
3. linea di trasmissione del segnale, con cablaggi in fibra ottica;
4. dispositivi di acquisizione e decodifica dati (centralina, controller di stringa, ecc.);
5. sistema di registrazione, elaborazione, visualizzazione dati e gestione allarmi.

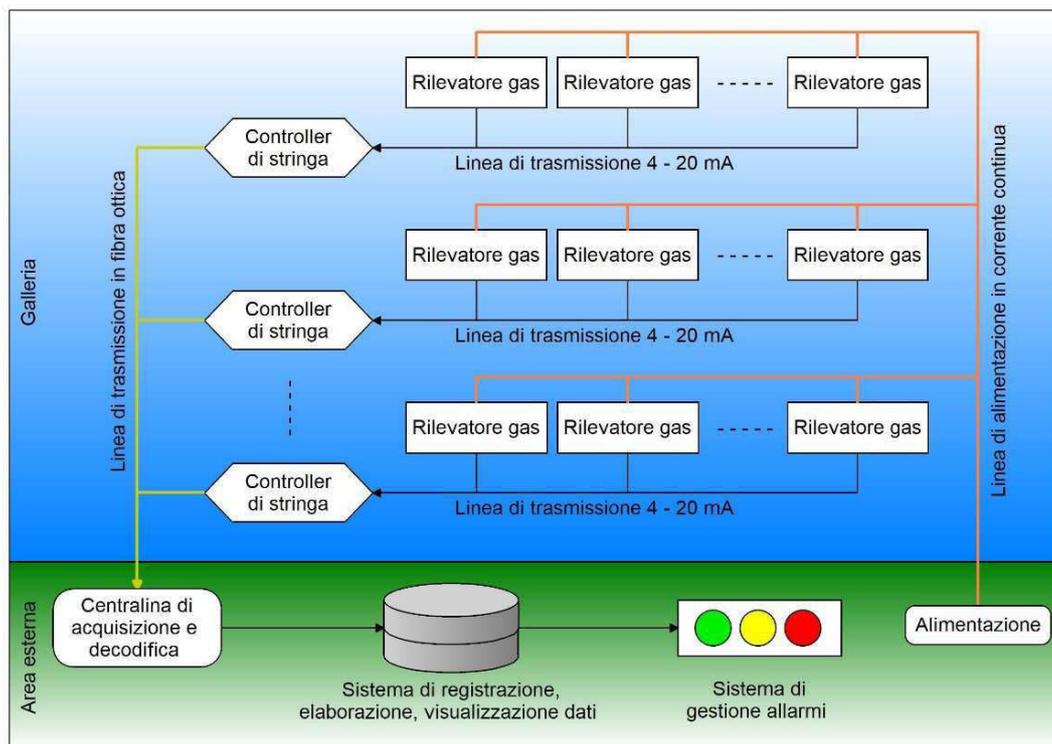


Figura 17. Rappresentazione schematica del sistema di monitoraggio

L'intero sistema di monitoraggio deve essere realizzato, come indicato dalla NIR 28 e dalla Linea Guida Grisù, con apparecchi che possono funzionare anche in presenza di atmosfera esplosiva (ovvero nella "condizione pericolosa 1" secondo la definizione della Norma EN 1127-2). Tale

condizione è soddisfatta sia dagli apparecchi del gruppo I, categoria M1 che dai dispositivi del gruppo II, categoria 1 e 2 (Direttiva Europea 2014/34/UE, nel seguito Direttiva ATEX), poiché garantiscono le stesse barriere di sicurezza.

5.3.1. Innovativi rilievi di gas in Galleria e Finestra con spettroscopia laser

I rilevatori di metano con spettroscopia infrarossa (o spettroscopia laser) sono adottati negli impianti industriali (impianti petrolchimici, piattaforme petrolifere, centrali a gas, impianti di trattamento acque, discariche, ecc.) sin dalla fine degli anni '80.

La tecnica di misura si basa sull'assorbimento della radiazione infrarossa (lunghezze d'onda comprese tra 0,75 μm e 1000 μm) da composti chimici, che per le molecole di metano si verifica ad una lunghezza d'onda di circa 3,4 μm .

I rilevatori IR, di tipo puntuale od a percorso aperto (open path), sono costituiti da:

- un trasmettitore (nel seguito anche trasmittente o Tx), che genera la radiazione infrarossa (raggio laser emesso da una lampada allo xeno o un diodo laser sintonizzabile) alla lunghezza d'onda assorbita dal gas che si vuole rilevare (nel seguito gas target);
- un ricevitore (nel seguito anche ricevente o Rx), che rileva l'intensità della radiazione generata dal trasmettitore.

Il valore dell'attenuazione dell'intensità della radiazione fornisce la concentrazione. Maggiore è il numero di particelle di metano, maggiore è l'assorbimento.

La misura è espressa come segnale analogico in corrente continua (mA), con valori compresi tra 4 e 20 mA, convertito da un microprocessore nel corrispondente valore di concentrazione di metano (4 mA = assenza di metano, 20 mA = concentrazione pari al fondo scala). Valori inferiori a 4 mA indicano una condizione di malfunzionamento, valori superiori a 20 mA indicano una concentrazione di metano superiore al fondo scala.

Rispetto ai sensori catalitici, i rilevatori IR presentano i seguenti vantaggi:

- sono intrinsecamente sicuri (qualsiasi condizione di guasto o malfunzionamento viene rilevata automaticamente in base al valore del segnale analogico);
- hanno un'elevata velocità di risposta (3 secondi);
- non risentono delle variazioni di temperatura ed umidità;
- non sono soggetti a saturazione e non richiedono calibrazioni in situ;
- la manutenzione è estremamente limitata (pulizia delle lenti, richiesta quando l'oscuramento è superiore al 90%).

In un rilevatore puntuale la distanza trasmittente – ricevente (percorso di misura) è di pochi centimetri e la concentrazione di metano viene espressa in %LEL, %vol o ppm.

Nei rilevatori a percorso aperto il trasmettitore ed il ricevitore sono installati ad una distanza di diversi metri (decine o centinaia) e consentono di rilevare il metano presente lungo il percorso di misura come un unicum (Figura 18). La concentrazione è espressa in LEL per metro (1 LEL·m equivale all'attenuazione dell'intensità della radiazione elettromagnetica prodotta da una miscela aria – metano con concentrazione del 100 %LEL su un percorso di misura di 1 m) o in ppm per metro (ppm·m).

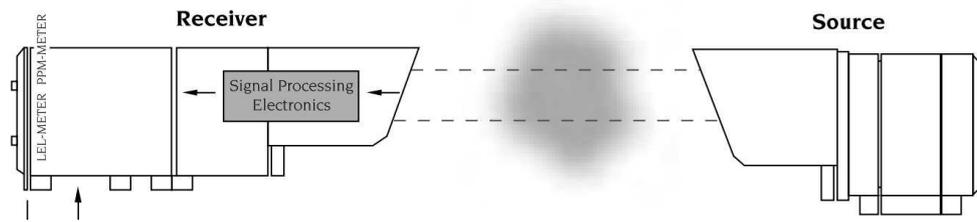


Figura 18. Esempio di rilevatore IR open path. Il dispositivo trasmittente (source) emette la radiazione infrarossa alla lunghezza d'onda assorbita dal metano. Se una miscela grisutosa attraversa il percorso di misura, l'assorbimento della radiazione rilevato dal ricevitore (receiver) viene convertito nel corrispondente valore di concentrazione in LEL·m.

Penetrazioni di metano in Galleria, generate da emissioni di trappole a pressione non troppo elevata, attraverso fratture / fessure, potrebbero verificarsi dall'arco rovescio e dai piedritti (Figura 19).

La miscela aria – metano, molto rarefatta ed estesa in lunghezza, sarà rilevata in calotta dal sistema di monitoraggio.

A titolo di esempio, un rilevatore open path con trasmettitore e ricevitore distanti 100 m misurerà 0,1 LEL·m in presenza di una miscela grisutosa che si estende in calotta per 50 m (condizione verosimile in questo contesto applicativo) con una concentrazione di 0,2 %LEL (0,01 %vol).

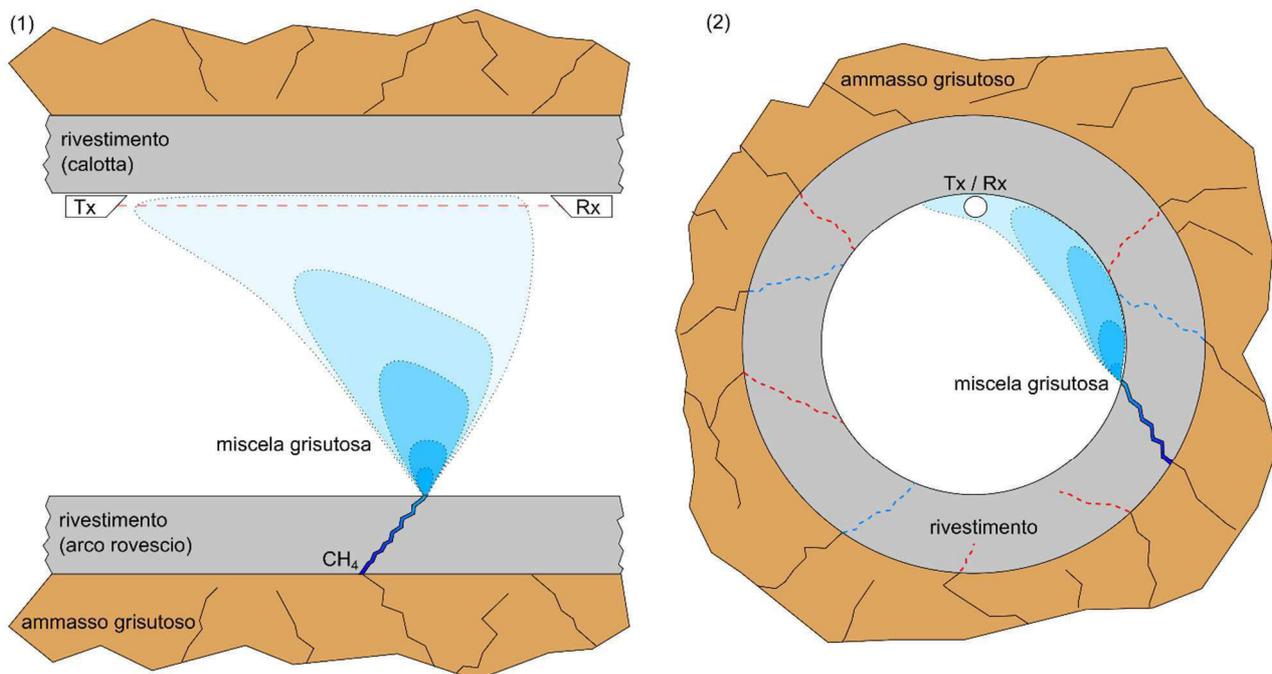


Figura 19. Schema pittorico della diffusione del metano in Galleria (cfr. Figura 15): 1) emissione dall'arco rovescio; 2) emissione dal paramento laterale. Il rilevatore IR misura la concentrazione di metano integrata sul percorso Tx – Rx.

Il progetto del sistema di monitoraggio con rilevatori a percorso aperto deve assicurare (affinché sia corretta la misura) che siano assenti:

- interferenze elettromagnetiche che alterano la radiazione infrarossa;

- vibrazioni e sovrappressioni che disallineano il sistema trasmittente – ricevente;
- ostruzioni lungo il percorso trasmittente – ricevente.

Il corretto dimensionamento del sistema impone l'accurata conoscenza di:

- dispositivi ed impianti elettrici ed elettronici in Galleria;
- vibrazioni e sovrappressioni prodotte dal passaggio dei treni;
- geometria e distribuzione degli elementi installati in calotta (staffe di supporto della linea elettrica, pendini, ecc.);
- geometria del tracciato (tratti rettilinei e curve);

che condizionano l'installazione dei rilevatori e il tratto di Galleria monitorato da ogni dispositivo (coppia Tx – Rx) nonché il loro numero complessivo.

Tenuto conto:

- delle esigenze di attrezzaggio della Trasmissione Elettrica (TE), che impediscono l'installazione di altri dispositivi entro una certa distanza dall'infrastruttura della linea aerea;
- della necessità di accedere ai rilevatori in condizioni di sicurezza durante le operazioni di manutenzione;
- che il metano fluirà verso la chiave di volta della Galleria

per garantire un efficace monitoraggio delle concentrazioni di metano, i rilevatori sono installati lungo due linee parallele a ridosso della chiave di volta, per tutta la lunghezza della Galleria nei tratti a singolo binario (Figura 20). Nei tratti a doppio binario la configurazione geometrica della linea aerea (e le relative strutture di supporto) consente di installare i rilevatori su un'unica linea in prossimità della chiave di volta (Figura 21).

La lunghezza dei percorsi di misura (distanza Tx – Rx) varia da 60 m nelle porzioni di tracciato con minor raggio di curvatura a 150 m nei tratti rettilinei. Pertanto, sono installati 88 rilevatori IR nei tratti di galleria naturale:

- 12 + 18 nei tratti a doppio binario;
- 58 nei tratti a singolo binario (29 per ognuna delle 2 linee).

Inoltre, sono installati 2 rilevatori IR puntuali, ognuno nel punto più alto delle due sezioni di raccordo tra Galleria a doppio ed a singolo binario.

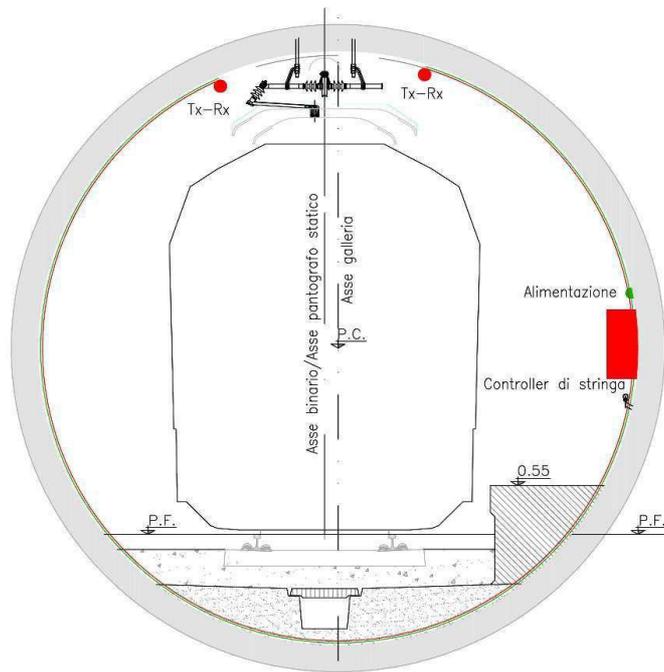


Figura 20. Disposizione dei rilevatori IR nella sezione a singolo binario (modificato da [1.2])

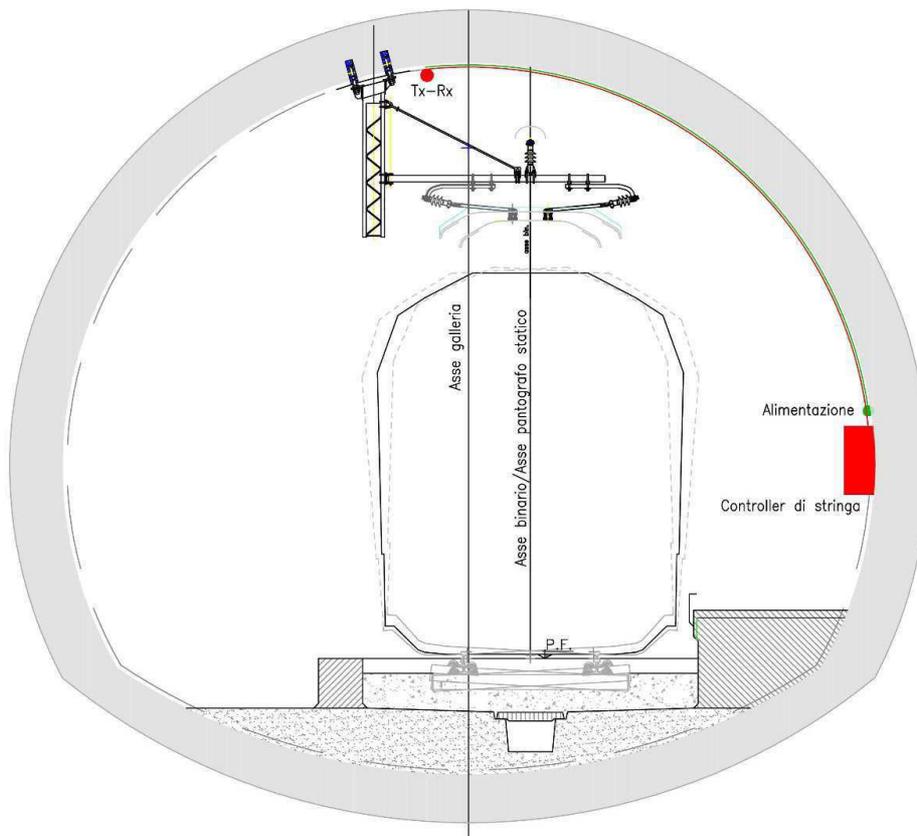


Figura 21. Disposizione dei rilevatori IR nella sezione a doppio binario (modificato da [1.3])

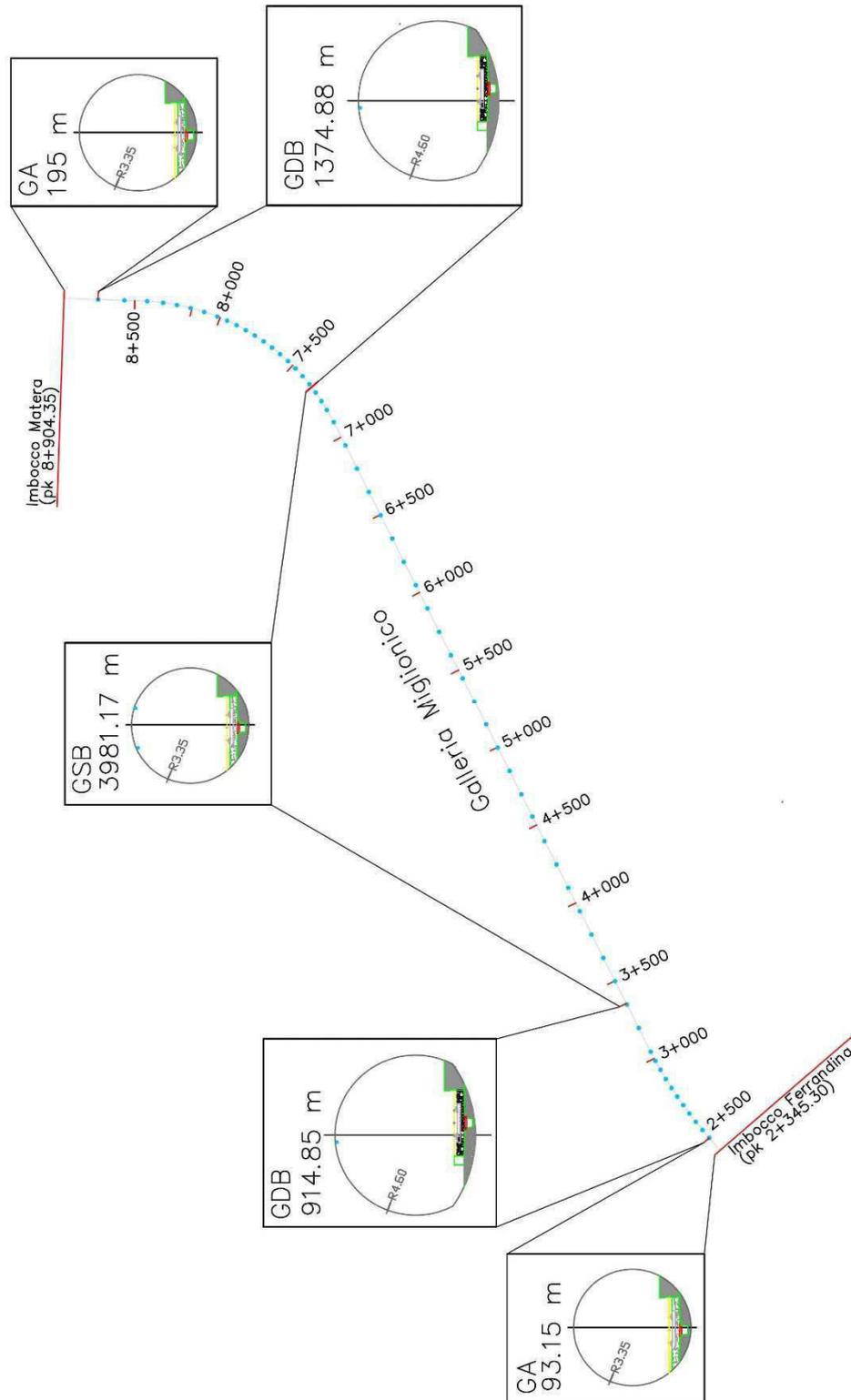


Figura 22. Disposizione dei rilevatori IR (punti in celeste) lungo il tracciato della Galleria. Sono indicati i tratti e le sezioni a singolo e a doppio binario. (GA: galleria artificiale; GDB: galleria doppio binario; GSB: galleria singolo binario)

In Finestra, camerone di manovra e zona filtro si installano rilevatori IR puntuali. I condotti di ventilazione ed i dispositivi in calotta impediscono il posizionamento e la manutenzione efficace dei rilevatori IR a percorso aperto. Inoltre, il gas penetrato in Finestra defluisce, lungo la chiave di volta, verso l'imbocco. Pertanto, devono essere presenti (Figura 23):

- 1 sensore nella zona filtro;
- 1 sensore nel camerone di manovra;
- 4 sensori lungo la Finestra:
 - 1 in corrispondenza dello sbarramento intermedio (nella zona di transizione), posto a circa 400 m dall'imbocco;
 - 1 ogni 100 m tra lo sbarramento intermedio e l'imbocco (nella zona di esodo).

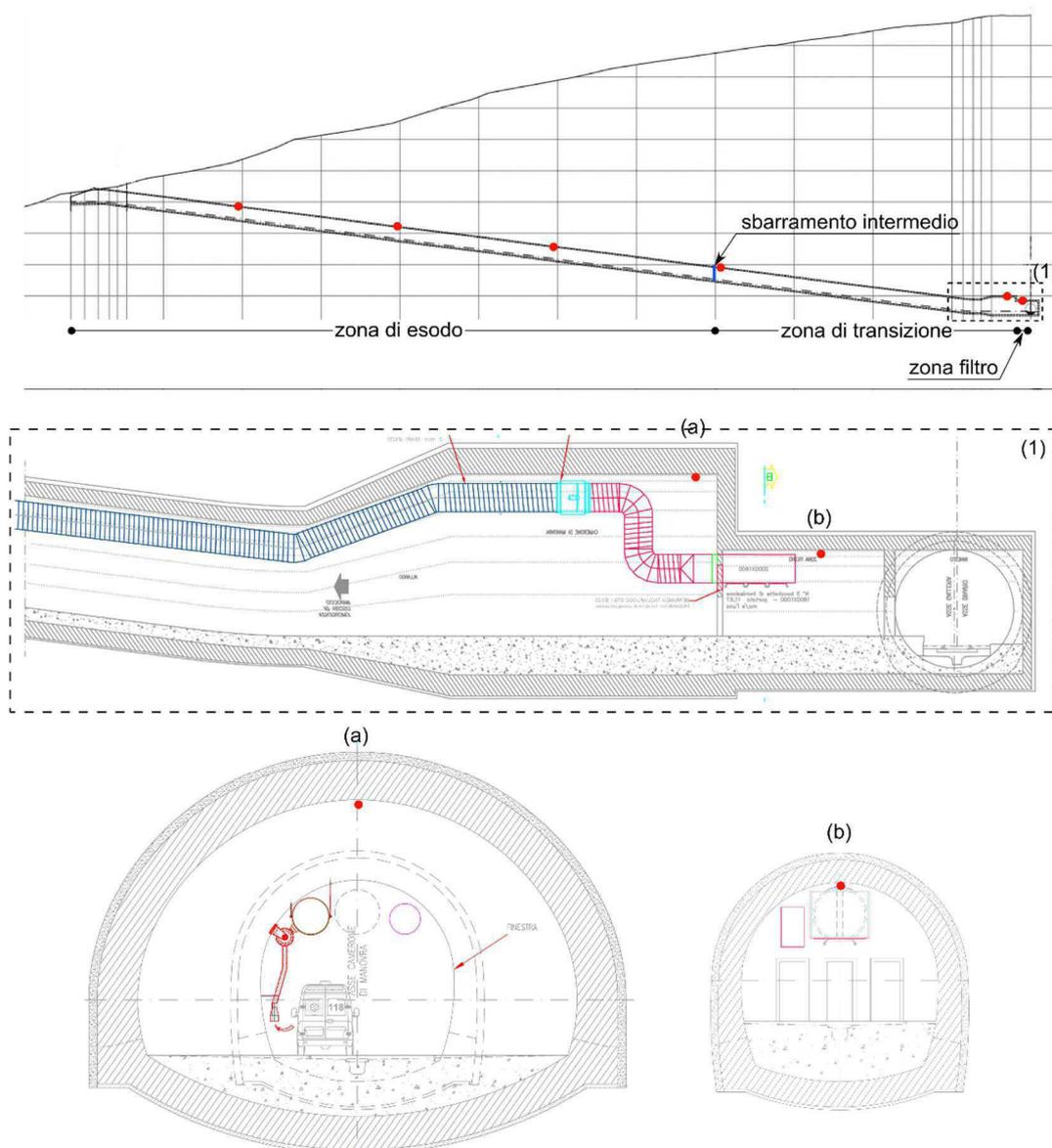


Figura 23. Tracciato altimetrico della Finestra e disposizione dei rilevatori IR (pallini rossi). Dettaglio del camerone e della zona filtro: sezione longitudinale (1) e sezioni trasversali del camerone (a) e della zona filtro (b).

5.3.2. Linea di alimentazione elettrica

I rilevatori IR sono alimentati in corrente continua a 24 V. In Galleria ed in Finestra (inclusi zona filtro e camerone) si deve installare la linea elettrica dedicata al sistema di monitoraggio, alimentato anche dopo il sezionamento degli altri impianti all'attivazione delle procedure di sicurezza.

La tensione di alimentazione deve avere valori sempre compresi nel range di funzionamento dei rilevatori (tipicamente $24\text{ V} \pm 6\text{ V}$, da verificare con il produttore del dispositivo scelto per l'installazione).

5.3.3. Linea di trasmissione del segnale

Il segnale analogico in corrente continua (nel range 4 – 20 mA) misurato dai rilevatori IR deve essere trasmesso al sistema di acquisizione ed elaborazione centrale (nel seguito sistema centrale).

Considerato che:

- la Galleria è lunga circa 6,5 km;
- la Finestra è lunga (compresi il camerone e la zona filtro) circa 600 m e interseca la Galleria ad una distanza di:
 - 3900 m dall'imbocco lato Ferrandina;
 - 2660 m dall'imbocco lato Matera;
- il sistema centrale deve essere installato fuori dalla Galleria (in zona sicura)

è necessario installare 6 – 8 controller di stringa che ricevono i segnali dai sensori e li inviano, con cavi in fibra ottica, al sistema centrale (riducendo notevolmente i cablaggi).

5.3.4. Acquisizione, elaborazione e visualizzazione dati

Il sistema centrale riceve, elabora e registra il segnale di ogni rilevatore IR installato in Galleria e in Finestra.

Inoltre, deve essere dotato di un software che:

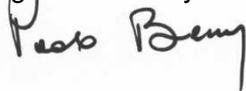
- visualizzi l'architettura del sistema (posizione dei rilevatori, collegamenti ai controller di stringa);
- stabilisca le soglie di allarme;
- configuri gli stati di allarme;
- notifichi gli allarmi al sistema RFI di controllo che attiva le procedure di sicurezza (sezionamento impianti, interruzione della circolazione ferroviaria, attivazione delle ispezioni, ecc.);
- identifichi le condizioni di malfunzionamento ed attivare specifici interventi manutentivi.

5.3.5. Allarmi e procedure di sicurezza

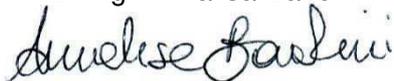
Per fronteggiare efficacemente il pericolo di esplosione / incendio di miscele aria – metano, innescabili da scintille prodotte dal contatto pantografo – linea elettrica e/o ruote – rotaie, si impedisce l'ingresso del treno in Galleria non appena uno dei rilevatori IR segnala la minima concentrazione di metano rilevabile (nell'ordine degli 0,01 LEL-m) e si attivano le procedure di sicurezza e di intervento. Solo il sistema di monitoraggio e l'illuminazione di emergenza restano attivi per controllare l'evoluzione del fenomeno.

Bologna, Luglio 2019

Prof. Ing. Paolo Berry



Ph.D. Ing. Annalisa Bandini



Ph.D. Ing. Carlo Cormio



Riferimenti normativi

Direttiva 2014/34/UE del Parlamento Europeo e del Consiglio, del 26 febbraio 2014, concernente l'armonizzazione delle legislazioni degli Stati membri relative agli apparecchi e sistemi di protezione destinati a essere utilizzati in atmosfera potenzialmente esplosiva (rifusione)

"Linee Guida. Scavi in sotterraneo con metodo a piena sezione e tecnica tradizionale in terreni grisutosi" (Linea guida Grisù), approvata il 05/09/2014 dal Coordinamento PISLL, Conferenza delle Regioni e delle Province Autonome, gruppo di lavoro "Edilizia", sottogruppo "Grandi Opere".

Nota Interregionale prot. n° ass/prc/05/1141 del 13/01/2005 (NIR n. 28 – "Grisù 3ª edizione"). "Lavori in sotterraneo. Scavo in terreni grisutosi. Grisù 3a edizione", Servizio Sanitario Regionale Regione Emilia Romagna, Servizio Sanitario Regionale Regione Toscana.

UNI EN 1127-2:2014, "Atmosfere esplosive. Prevenzione e protezione dalle esplosioni – parte 2: Concetti fondamentali e metodologia per attività in miniera"

CEI EN 50270:2014, "Compatibilità elettromagnetica – Costruzioni elettriche per la rilevazione e misura di gas combustibili, gas tossici o ossigeno"

CEI EN 50121:2018, "Applicazioni ferroviarie, tranviarie, filoviarie e metropolitane – Compatibilità elettromagnetica"