

ALMA MATER STUDIORUM – UNIVERSITÀ DI BOLOGNA

---

FACOLTÀ DI INGEGNERIA

**Corso di Laurea Magistrale in  
Ingegneria per l'ambiente ed il territorio**

CURRICULUM GEOINGEGNERIA

**BUONE PRATICHE DI INGEGNERIA E SICUREZZA NELLO  
SCAVO DI GALLERIE IN ATMOSFERA IPERBARICA**

**Tesi di Laurea Magistrale in  
Ingegneria e sicurezza degli scavi**

RELATORE:

Ph.D. Ing. Carlo Cormio

CANDIDATO:

Manuele Acciarri

ANNO ACCADEMICO 2018-2019  
SESSIONE III

|   |           |
|---|-----------|
| <b>ABSTRACT</b> .....   | <b>1</b>  |
| <b>ORGANIZZAZIONE DEI CONTENUTI</b> .....   | <b>2</b>  |
| <b>1. INTRODUZIONE</b> .....  | <b>3</b>  |
| <b>2. PRINCIPI DI INGEGNERIA DEGLI SCAVI PER LA REALIZZAZIONE DI GALLERIE IN AMBITO URBANO</b> 5  |           |
| 2.1 METODO MILANO .....   | 7         |
| 2.1.1 <i>Realizzazione dei diaframmi in calcestruzzo armato</i> .....   | 8         |
| 2.1.2 <i>Impermeabilizzazione</i> .....   | 10        |
| 2.2 SCAVO DI GALLERIE SUPERFICIALI IN PRESENZA DI FALDE ACQUIFERE .....   | 12        |
| 2.2.1 <i>Sistemi di drenaggio (wellpoint)</i> .....   | 12        |
| 2.2.2 <i>Jet grouting</i> .....   | 14        |
| 2.2.3 <i>Iniezioni di miscele</i> .....   | 16        |
| 2.2.4 <i>Congelamento</i> .....   | 18        |
| 2.2.5 <i>Scavo in atmosfera iperbarica</i> .....  | 21        |
| <b>3. STATO DELL'ARTE DELLO SCAVO DI GALLERIE IN ATMOSFERA IPERBARICA</b> .....   | <b>24</b> |
| 3.1 ESPERIENZE SIGNIFICATIVE DI GALLERIE REALIZZATE IN ATMOSFERA IPERBARICA .....   | 25        |
| 3.1.1 <i>Emmequerung tunnel</i> .....   | 26        |
| 3.1.2 <i>Audi tunnel</i> .....  | 27        |
| 3.1.3 <i>Linea ferroviaria bassa valle dell'Inn (BBT). Applicazione del jet grouting per scavi sottofalda in condizioni iperbariche</i> .....             | 29        |
| 3.2 EFFETTI DELL'ESPOSIZIONE PROLUNGATA AD ATMOSFERE IPERBARICHE IN AMBIENTE DI LAVORO .....  | 31        |
| 3.3 QUADRO NORMATIVO PER LO SCAVO IN ATMOSFERA IPERBARICA .....   | 34        |
| 3.3.1 <i>Normative e Linee guida nazionali</i> .....  | 35        |
| 3.3.2 <i>Normative e Linee guida internazionali</i> .....   | 35        |
| <b>4. PROPOSTA DI BUONE PRATICHE DI INGEGNERIA E SICUREZZA DEGLI SCAVI PER LA PROGETTAZIONE E REALIZZAZIONE DI GALLERIE IN ATMOSFERA IPERBARICA</b> ..... | <b>40</b> |
| 4.1 CARATTERIZZAZIONE DEI TERRENI E DEGLI ACQUIFERI .....   | 42        |
| 4.1.1 <i>Indagini Geologiche e caratterizzazione dei terreni</i> .....  | 42        |
| 4.1.2 <i>Idrogeologia</i> .....   | 45        |
| 4.2 MODALITÀ DI SCAVO .....   | 45        |
| 4.3 FIGURE PROFESSIONALI SPECIALISTICHE .....   | 47        |
| 4.4 DOTAZIONI IMPIANTISTICHE.....   | 49        |
| 4.4.1 <i>Camere di compensazione</i> .....  | 50        |
| 4.4.2 <i>Calcolo portata d'aria necessaria ed impianto di ventilazione</i> .....  | 50        |
| 4.4.3 <i>Impianto di produzione e di distribuzione dell'aria compressa</i> .....  | 55        |
| 4.4.4 <i>Requisiti dei mezzi d'opera</i> .....  | 56        |
| 4.4.5 <i>Impianto elettrico</i> .....   | 57        |

|           |  |            |
|-----------|--|------------|
| 4.4.6     | <i>Sistema di monitoraggio della qualità dell'aria e dei valori di sovrappressione</i>                                 | 59         |
| 4.4.7     | <i>Sistema di comunicazione e di allarme</i>   | 61         |
| 4.5       | PROCEDURE DI INGRESSO E DI USCITA DALLA CAMERA DI LAVORO   | 63         |
| 4.5.1     | <i>Tabelle di decompressione</i>   | 65         |
| 4.6       | MONITORAGGIO DEI LIVELLI DI FALDA  | 69         |
| 4.7       | COMUNICAZIONE/COORDINAMENTO SICUREZZA  | 74         |
| 4.8       | PROCEDURE DI EMERGENZA E SOCCORSO  | 75         |
| 4.8.1     | <i>Allagamento</i>   | 76         |
| 4.8.2     | <i>Aumento o diminuzione incontrollata dei livelli di pressurizzazione</i>   | 76         |
| 4.8.3     | <i>Allarme incendio</i>  | 77         |
| <b>5.</b> | <b>CASO STUDIO: LINEA AV NAPOLI – BARI, TRATTA NAPOLI-CANCELLO, GALLERIA CASALNUOVO 80</b>                             |            |
| 5.1       | ELABORATI PROGETTUALI CONSULTATI   | 83         |
| 5.2       | INQUADRAMENTO GENERALE DELL'OPERA  | 84         |
| 5.2.1     | <i>Inquadramento Geologico strutturale</i>   | 85         |
| 5.2.2     | <i>Inquadramento idrogeologico</i>   | 88         |
| 5.3       | PROGETTO ESECUTIVO DELLA GALLERIA CASALNUOVO. DESCRIZIONE E ANALISI CRITICA CON APPLICAZIONE DELLE BUONE PRATICHE      | 91         |
| 5.3.1     | <i>Modello idrogeologico e monitoraggio della falda acquifera</i>  | 100        |
| 5.3.2     | <i>Realizzazione dei diaframmi</i>   | 105        |
| 5.3.3     | <i>Calcolo della portata d'aria e dimensionamento del sistema di pressurizzazione</i>                                  | 107        |
| 5.3.4     | <i>Camere di compensazione per il personale, per i mezzi e vasche per la raccolta temporanee del materiale scavato</i> | 115        |
| 5.3.5     | <i>Sistema di smarino e trasporto</i>  | 118        |
| 5.3.6     | <i>Impermeabilizzazione della galleria</i>   | 119        |
| 5.3.7     | <i>Taglio diaframma</i>  | 123        |
| 5.3.8     | <i>Procedure di accesso-uscita e tabelle di decompressione utilizzate</i>  | 127        |
| 5.3.9     | <i>Sistema di Gestione e Piano delle emergenze</i>   | 128        |
| 5.3.9.1   | Comunicazione e coordinamento sicurezza  | 128        |
| 5.3.9.2   | Prevenzione e protezione dal rischio d'incendio  | 130        |
| <b>6.</b> | <b>CONCLUSIONI</b>   | <b>132</b> |
|           | <b>RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI</b>   | <b>134</b> |
|           | SITI INTERNET  | 135        |

## **ABSTRACT**

La tecnica dello scavo in atmosfera iperbarica, utilizzata nella costruzione di gallerie che interagiscono con la falda acquifera, sfrutta l'applicazione di aria compressa come metodo per effettuare le operazioni di scavo e di rivestimento in condizioni asciutte. Tale tecnica porta con sé sia vantaggi economici ed ambientali che problematiche relative alla salute e sicurezza dei lavoratori, esposti all'atmosfera iperbarica. L'elaborato di tesi ha lo scopo di proporre, tramite un'analisi dettagliata delle fasi progettuali e realizzative, "Buone Pratiche" di Ingegneria e Sicurezza per lo scavo di gallerie in atmosfera iperbarica.

Nell'ambito della tesi è stata inizialmente effettuata un'analisi del metodo costruttivo utilizzato (Metodo Milano) e delle tecnologie di pretrattamento alternative allo scavo iperbarico. Successivamente, in mancanza di una normativa italiana sull'argomento, è stata eseguita un'analisi delle normative e linee guida internazionali che disciplinano gli scavi in atmosfera iperbarica, da cui sono state estrapolate le misure di prevenzione e protezione da adottare per garantire condizioni di massima sicurezza. Inoltre, sono stati approfonditi gli aspetti tecnici ed indicati gli approcci da utilizzare nella progettazione e realizzazione dell'opera. Tali misure ed approcci, in parte già adottati nel progetto dello scavo di un tratto della Galleria Casalnuovo (Linea ferroviaria AV-AC Napoli-Bari), prima applicazione della tecnica sul territorio nazionale, sono state integrate con il lavoro di tesi, che illustra i risultati conseguiti nella forma di Buone Pratiche. Il progetto della Casalnuovo è stato analizzato criticamente, verificando che gli approcci e le soluzioni adottate fossero coerenti con le Buone Pratiche ed illustrando criteri di calcolo e misure di prevenzione introdotti con il presente lavoro (ad esempio per dimensionare l'impianto di pressurizzazione e ventilazione e per monitorare i livelli piezometrici).

## **ORGANIZZAZIONE DEI CONTENUTI**

Il presente elaborato è stato articolato in 6 capitoli:

Il capitolo 1 introduce le origini e l'evoluzione tecnica e tecnologia dello scavo di opere in sotterraneo, illustra brevemente le problematiche che possono giustificare l'adozione della tecnica di scavo di gallerie in atmosfera iperbarica e introduce gli obiettivi del presente lavoro.

Il capitolo 2 descrive i principi ingegneristici per la realizzazione di gallerie sotterranee superficiali in ambito urbano, il metodo costruttivo "Milano" e le principali tecniche e tecnologie di pretrattamento del terreno utilizzate negli scavi in presenza di falda.

Il capitolo 3 illustra lo stato dell'arte nello scavo di gallerie in presenza di falda con la tecnica dell'atmosfera iperbarica, riporta alcuni casi applicativi rilevanti e fornisce un'analisi delle principali normative e linee guida (nazionali ed internazionali) che disciplinano l'argomento.

Nel capitolo 4 vengono proposte delle Buone Pratiche di Ingegneria e Sicurezza per lo scavo in atmosfera iperbarica, analizzando criticamente e dettagliatamente gli aspetti progettuali e costruttivi per la realizzazione delle opere in condizioni di massima sicurezza.

Il capitolo 5 analizza criticamente il progetto della Galleria Casalnuovo, parte della nuova linea AV-AC Napoli-Bari, applicando le buone pratiche illustrate nel capitolo 4.

Il capitolo 6 riassume i principali risultati ottenuti con il presente lavoro, illustrati in dettaglio nei capitoli precedenti.

## 1. INTRODUZIONE

La storia della realizzazione di opere sotterranee è assai lunga in quanto già gli antichi egizi scavarono tunnel di collegamento per le tombe collocate al di sotto delle piramidi, mentre i greci riuscirono a scavare con metodi manuali una galleria di oltre 1 km considerata la più lunga di tutta l'antichità.

Solo negli ultimi 200 anni però si può parlare di ingegneria delle gallerie poiché in questo periodo sono andate pian piano affinandosi le metodologie di scavo, il calcolo delle opere di sostegno e rivestimento e il controllo dei fattori ambientali.

L'esigenza di costruzione di gallerie sotterranee di collegamento è iniziata dalla realizzazione delle prime tratte ferroviarie sviluppate nella seconda metà del XIX secolo, proseguendo con le gallerie stradali che hanno contraddistinto lo sviluppo mondiale delle reti autostradali e metropolitane del XX secolo sino ad arrivare ai giorni nostri con la realizzazione delle lunghe gallerie transalpine per l'interconnessione delle direttrici ferroviarie europee.

Il continuo sviluppo della società moderna amplifica sempre più la necessità di realizzazione di infrastrutture di collegamento veloci e ad alta capacità per il trasporto di mezzi e persone. A causa della crescente carenza di spazio in superficie, spesso dovuta ad espansione non pianificata delle città che ha provocato un elevato consumo di suolo, ed alla maggiore attenzione riguardo l'impatto ambientale delle opere, si è ricorso sempre più all'uso di gallerie sotterranee sia per i collegamenti infrastrutturali (strade, ferrovie, metropolitane) sia per i servizi (acquedotti, fognature, reti tecnologiche, stoccaggio rifiuti radioattivi) scavate sempre più in condizioni geologiche ed idrologiche difficili, spesso proibitive, oppure in aree fortemente popolate, con sezioni e geometrie di scavo maggiormente impegnative.

Questa esigenza ha determinato un continuo sviluppo delle tecnologie e dei macchinari utilizzati in fase di realizzazione delle opere, passando da una condizione di scavo per lo più manuale (XIX secolo), all'invenzione di macchine completamente automatizzate in grado di scavare e rivestire contemporaneamente la galleria (TBM), permettendo così un'ottimizzazione dei tempi di realizzazione e un aumento delle condizioni di sicurezza dei lavoratori.

Le particolari condizioni che si riscontrano nella realizzazione di gallerie in terreni sotto falda acquifera ha portato allo sviluppo di tecniche di pretrattamento del volume di terreno

da scavare con lo scopo di migliorare le caratteristiche di stabilità e di bloccare, o quantomeno limitare, il flusso di acqua verso l'interno della galleria. Le più diffuse in ambito sotterraneo sono il jet grouting, l'iniezione di miscele cementizie o polimeriche ed il congelamento, le quali però possono provocare un deturpamento e un inquinamento della qualità delle risorse idriche oltre ad una variazione della dinamica originaria della falda.

La maggior concentrazione sugli aspetti ambientali, oltre a normative sempre più restrittive, ha portato alla definizione di tecnologie meno impattanti come lo scavo in atmosfera iperbarica il quale è in grado di garantire un minor impatto sulle condizioni qualitative della falda, una minor subsidenza in superficie ed una minor influenza sulle condizioni di deflusso originarie della falda rispetto ai classici sistemi di pretrattamento.

Questa tecnologia sfrutta l'applicazione di una sovrappressione all'interno del volume da scavare per controbilanciare la pressione idrostatica dell'acqua di falda e garantire così l'esecuzione dello scavo in condizioni asciutte.

D'altro canto, lo scavo iperbarico porta con sé le problematiche di sicurezza legate all'esposizione ed al lavoro in atmosfera pressurizzata. Occorre quindi effettuare un'analisi esaustiva dei fattori di rischio in maniera tale da minimizzare l'incidenza di malattie barotraumatiche ed aumentare i livelli di sicurezza per i lavoratori coinvolti nelle operazioni.

## 2. PRINCIPI DI INGEGNERIA DEGLI SCAVI PER LA REALIZZAZIONE DI GALLERIE IN AMBITO URBANO

La realizzazione di opere sotterranee, quali gallerie o stazioni metropolitane e ferroviarie, è soggetta a determinati vincoli che dipendono dalle condizioni del luogo e dalla tipologia di opera da costruire. Durante la fase di progettazione e costruzione di tali opere devono essere presi in considerazione diversi aspetti, tra cui:

- **Litologia:** questo parametro influisce sulla scelta della tecnica di scavo e sui pretrattamenti da effettuare per poter garantire le condizioni di stabilità e di sicurezza durante la fase di scavo;
- **Interferenze superficiali:** la presenza di manufatti ed infrastrutture prossime agli scavi (edifici, ponti, strade, linee ferroviarie, ecc.) condiziona la scelta della tecnica di scavo, che deve prevenire e minimizzare la subsidenza in superficie;
- **Idrogeologia:** la presenza di falde acquifere può comportare problemi di allagamento e di instabilità del fronte e delle pareti di scavo;
- **Interferenze sotterranee:** opere e manufatti presenti nel sottosuolo (sottoservizi, fondazioni, piani interrati, ecc.), possono condizionare la scelta del tracciato, la scelta della tecnica di scavo e la velocità di avanzamento.

I principali metodi di scavo utilizzati per la realizzazione di gallerie in ambito urbano sono:

1. Scavo a foro cieco;
2. Scavo a cielo aperto (cut and cover).

Lo scavo a foro cieco è una soluzione largamente utilizzata per la realizzazione di opere con elevata copertura di terreno ed in presenza di strutture o aree densamente urbanizzate che non consentono di realizzare l'intervento dalla superficie.

La fase di scavo può avvenire attraverso l'uso di due principali tecniche:

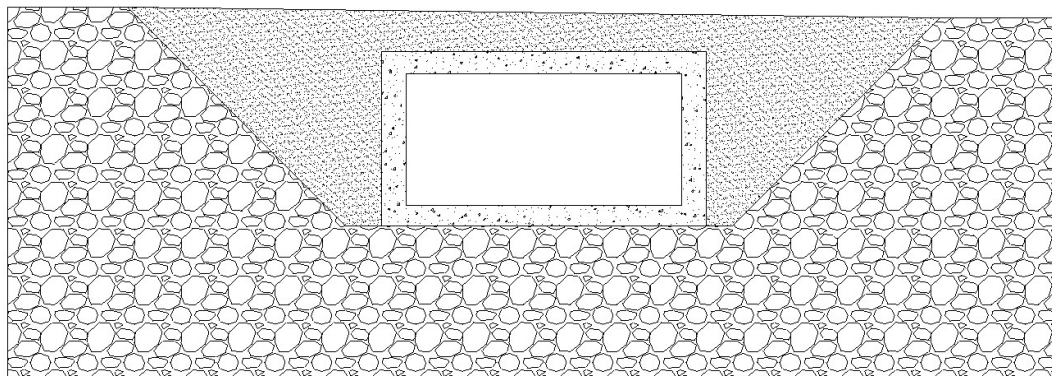
- **Scavo tradizionale:** realizzato a sezione intera o parzializzata tramite l'utilizzo di martello demolitore, fresa puntuale, esplosivo o benna rovescia a seconda delle caratteristiche del terreno attraversato; dopo lo scavo viene applicato un rivestimento di prima fase per garantire le condizioni di stabilità della galleria fino alla successiva fase di realizzazione del rivestimento definitivo.



- **Scavo meccanizzato con TBM** (Tunnel Boring Machine), che consente la meccanizzazione sia della fase di scavo che di rivestimento della galleria, permettendo così la continuità delle fasi realizzative ed un notevole incremento delle velocità di avanzamento, a scapito della flessibilità di adattamento del cantiere in presenza di condizioni impreviste.

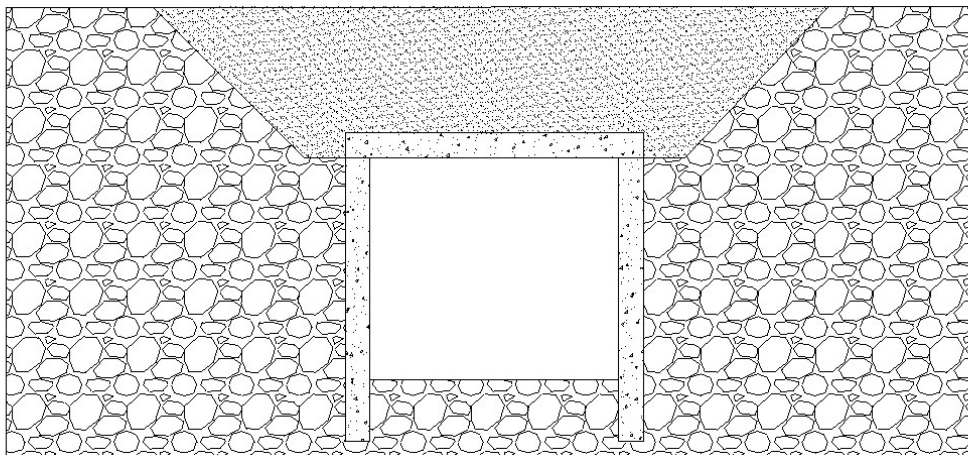
Il metodo “cut and cover”, invece, viene maggiormente impiegato nella realizzazione di opere con bassa copertura ed in attraversamento di ambiti urbani meno edificati (quasi sempre periferici).

Fino alla metà degli anni 50', lo scavo con il metodo cut and cover consisteva nella realizzazione di trincee con scarpate ad angolo naturale di riposo del terreno e la successiva posa di uno scatolare prefabbricato in calcestruzzo sul fondo dello scavo, (Figura 2-1) successivamente ricoperto in modo da ripristinare il piano campagna originario. In questa maniera si occupavano grandi superfici durante tutta la durata dei lavori che, soprattutto in zone urbanizzate, potevano creare disagi sia alla circolazione che ai manufatti presenti in prossimità del tracciato.



*Figura 2-1: Galleria realizzata con metodo “cut and cover”*

Nel 1957, in occasione della realizzazione della metro M1 di Milano, fu introdotto il “metodo Milano”, che permetteva di effettuare lo scavo della galleria dopo aver ripristinato la viabilità e le attività in superficie (Figura 2-2).



*Figura 2-2: Galleria realizzata con metodo Milano*

I principali fattori che il progettista deve considerare nella scelta di una metodologia o una tecnica di scavo rispetto ad un'altra sono la lunghezza dell'opera, le litologie attraversate, la copertura, le interferenze (superficiali e sotterranee) presenti lungo il tracciato, i tempi ed i costi di realizzazione.

## 2.1 METODO MILANO

Rispetto allo scavo cut & cover, tale tecnica prevede una diversa sequenza operativa in grado di minimizzare le interferenze in superficie.

Le fasi costruttive sono (Figura 2-3):

1. Spostamento dei sottoservizi preesistenti lungo il tracciato della galleria e scavo a cielo aperto fino alla quota di copertura;
2. Realizzazione di due diaframmi verticali paralleli al tracciato della galleria;
3. Preparazione del terreno con posa armature e getto del calcestruzzo per la realizzazione del solettone di copertura;
4. Rinterro dello scavo fino piano campagna con susseguente ripristino della circolazione in superficie;
5. Scavo della galleria sotto il solettone di copertura e tra i due diaframmi;
6. Posa dell'impermeabilizzazione e del rivestimento definitivo.

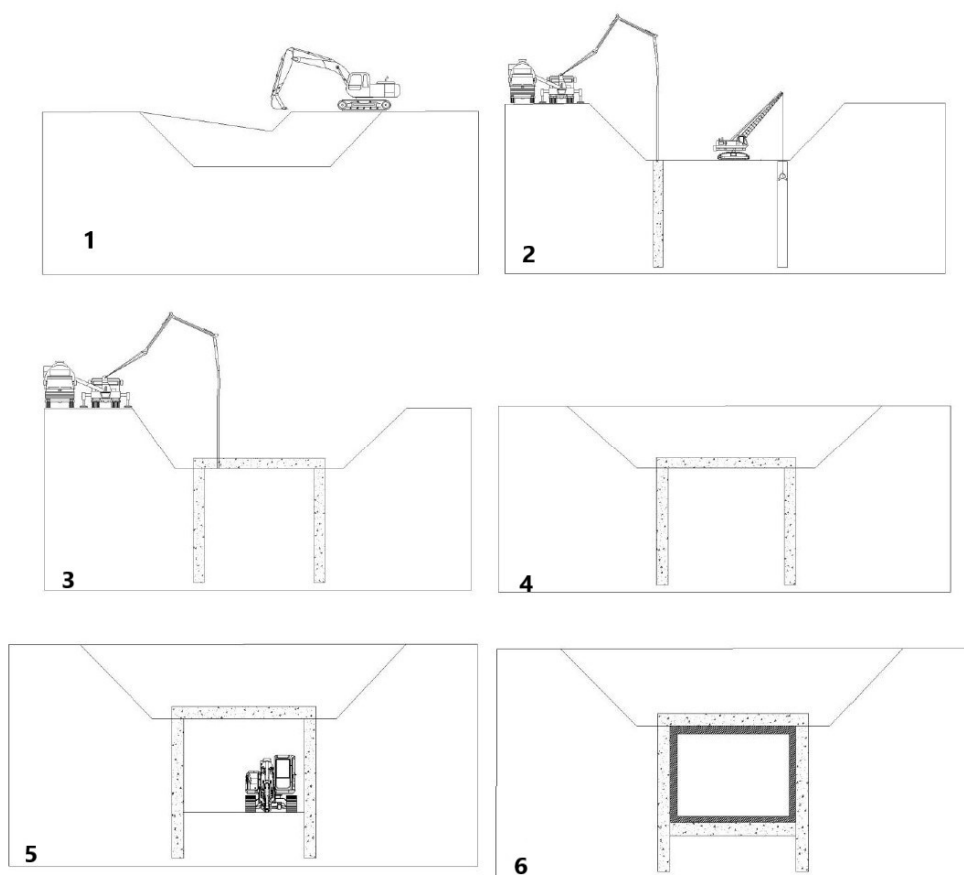


Figura 2-3: Fasi realizzative del metodo Milano

Nei seguenti paragrafi vengono analizzate in dettaglio due delle principali fasi costruttive:

- la realizzazione dei diaframmi, che permettono di contrastare la spinta del terreno e dell'acqua verso la sezione della galleria da scavare, e consentono di ridurre l'occupazione di suolo in superficie;
- l'impermeabilizzazione della galleria, che assume importanza rilevante in presenza di falde acquifere e deve interessare gli stessi diaframmi ed il solettone di copertura, per consentire lo scavo della galleria e la funzionalità dell'opera.

### 2.1.1 Realizzazione dei diaframmi in calcestruzzo armato

I diaframmi sono sostanzialmente elementi di sostegno temporaneo o permanente, che possono essere utilizzati anche come barriere impermeabili. La loro realizzazione prevede uno scavo a sezione obbligata successivamente riempito di calcestruzzo armato. In alcuni casi, si può aggiungere al calcestruzzo una percentuale di bentonite per rendere il diaframma maggiormente impermeabile. La bentonite inoltre può essere anche utilizzata per la stabilizzazione delle pareti dello scavo in modo da creare un diaframma con una

superficie esterna più regolare. Questa stabilizzazione si può ottenere tramite l'applicazione del fango bentonitico (soluzione di acqua e bentonite al 5-6% con eventuali additivi per aumentare la densità della soluzione) il quale crea un film impermeabile (cake) sul bordo dello scavo, mentre nel caso di terreno a granulometria grossolana il materiale penetra nella porosità del terreno stesso creando uno strato gelatinoso con la stessa funzione del cake (Russo, 2005).

La posa in opera avviene in 4 fasi principali:

- **Realizzazione dei muri guida** che hanno la funzione di stabilizzazione degli strati di terreno più superficiali, per garantire l'allineamento dell'opera e per fungere da supporto alle gabbie di armatura fino all'indurimento del calcestruzzo;
- **Realizzazione dello scavo:** realizzato tramite benna idraulica o meccanica oppure con idrofresa a seconda delle caratteristiche del terreno da scavare. Lo scavo può anche essere rivestito con delle sponde in modo da ottenere un diaframma con una superficie maggiormente regolare;
- **Dissabbio, pulizia dello scavo e inserimento delle gabbie di armatura metallica:** sono operazioni necessarie alla preparazione dello scavo alla fase successiva di getto del calcestruzzo;
- **Fase di getto:** effettuato a gravità con l'ausilio di tubi getto posti fino al fondo scavo da cui viene rilasciato il calcestruzzo, che riempiendo lo scavo spinge in superficie il fango presente.

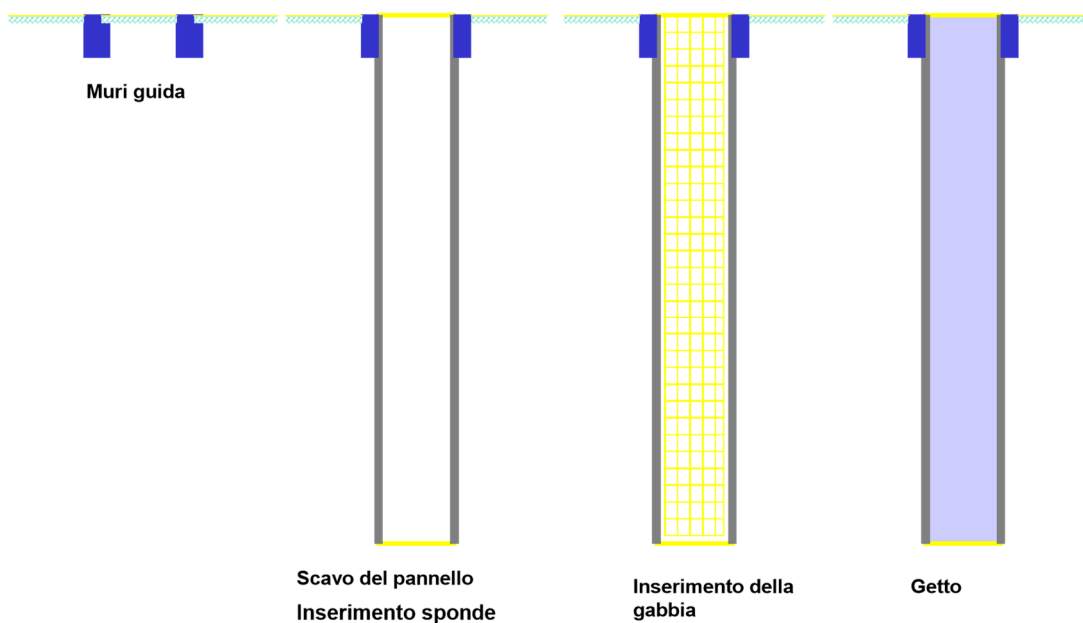


Figura 2-4: Fasi della realizzazione di diaframmi in calcestruzzo armato (Russo, 2005)

I diaframmi sono formati da elementi di forma rettangolare accostati fra loro in modo da formare una parete continua impermeabile. La realizzazione richiede una sequenza ben precisa, che prevede la realizzazione dello scavo ed il getto di due pannelli (primari) seguito dallo scavo ed il getto di quello (secondario) posto fra i due.

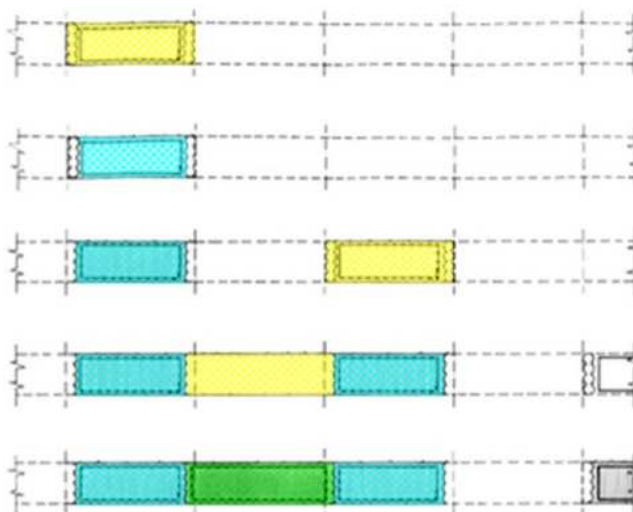


Figura 2-5:: Sequenza costruttiva dei pannelli che formano i diaframmi. In giallo le fasi di scavo dei pannelli, in azzurro la fase di armatura e di getto dei pannelli primari, in verde la fase di scavo e getto del pannello secondario. (Vingiani, 2014.)

### 2.1.2 Impermeabilizzazione

Affinché i diaframmi assolvano alla funzione di barriera impermeabile, soprattutto in presenza di una falda acquifera, è necessario realizzare a regola d'arte i giunti tra i pannelli primari e secondari e le riprese di getto, poiché proprio in questi punti è massima la possibilità di infiltrazione dell'acqua di falda.

Questi giunti possono essere realizzati principalmente attraverso tre metodologie:

1. Con palancola metallica (stop-end) (Figura 2-6) che può essere a perdere o da ritirare. Tale palancola metallica viene inserita nei lati esterni dei pannelli primari e permette la realizzazione di un incasso necessario alla formazione del giunto con il pannello secondario realizzato successivamente.
2. Con tubo spalla attraverso l'inserimento di tubi in pvc (a perdere) o metallici (da ritirare) (Figura 2-7) utilizzati in diaframmi perlopiù circolari. Questi tubi vengono alloggiati nei lati del pannello primario e poi vengono riempiti con del materiale granulare per evitare il loro schiacciamento causato dalla pressione idrostatica del cls.

3. Giunti con sistemi waterstop (Figura 2-8) realizzati attraverso l'inserimento di una membrana in gomma che funge da barriera impermeabile tra i pannelli adiacenti. Essa può essere posizionata tramite opportune palancole ritirabili o con travi in cls a perdere.

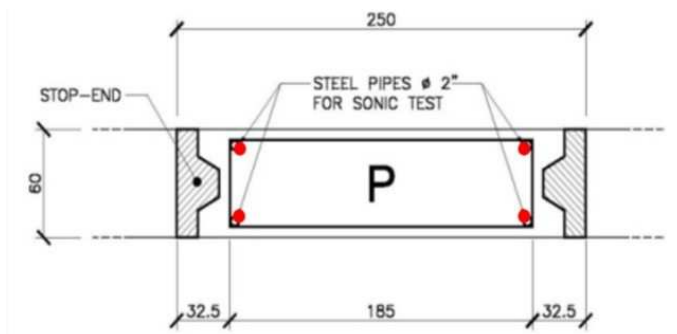


Figura 2-6: Palancola metallica per la realizzazione dei giunti (Vingiani, 2014).

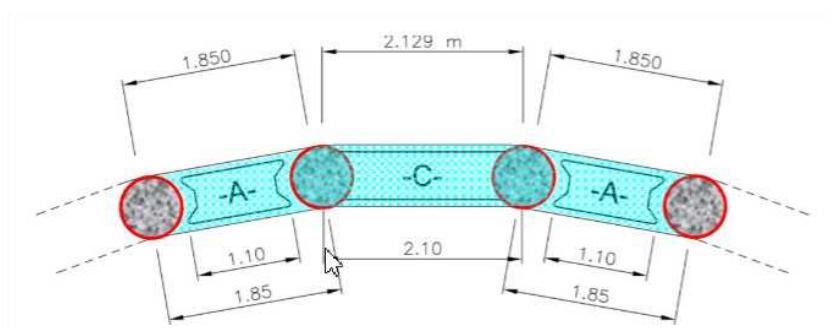


Figura 2-7: Tubi in PVC o in materiale metallico per la realizzazione dei giunti.(Vingiani, 2014).

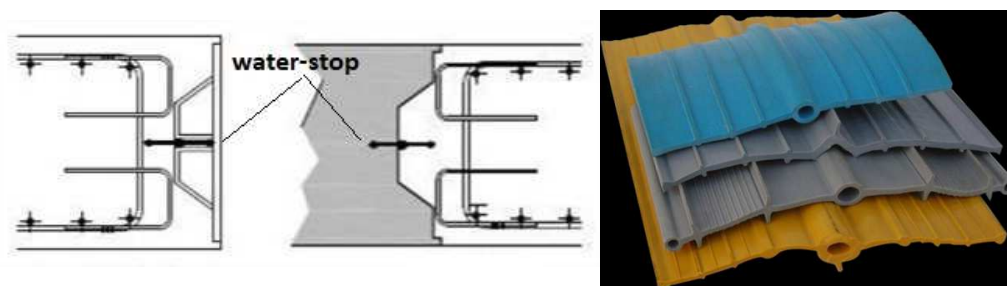


Figura 2-8: Sistemi waterstop per la realizzazione dei giunti. ([www.waterstops.it](http://www.waterstops.it))

## 2.2 SCAVO DI GALLERIE SUPERFICIALI IN PRESENZA DI FALDE ACQUIFERE

Nella realizzazione di una galleria in un'area urbanizzata ed in presenza di una falda acquifera è necessario ricorrere a misure speciali di pretrattamento della zona da scavare in modo da bloccare, o almeno limitare, il flusso di acqua verso l'interno della galleria.

La scelta della tecnica da adottare dipende da:

- il livello di falda;
- le proprietà fisiche e meccaniche del terreno attraversato;
- la tecnica di scavo adottata (tradizionale o meccanizzato).

I principali interventi di pretrattamento utilizzati nello scavo “cut and cover” comprendono:

- sistemi di drenaggio (wellpoint);
- jet grouting;
- iniezioni di miscele;
- congelamento del terreno.

Nei casi in cui, per motivi tecnici, economici o ambientali, non è possibile adottare le tecniche di pretrattamento elencate, si può ricorrere all'uso di aria compressa come mezzo per spiazzare l'acqua di falda. L'atmosfera all'interno del cantiere di scavo viene portata ad una pressione almeno pari a quella idrostatica di falda per garantire condizioni di scavo all'asciutto durante la realizzazione dell'opera.

### 2.2.1 Sistemi di drenaggio (wellpoint)

Gli impianti di wellpoint vengono utilizzati per l'emungimento di acqua di falda in maniera tale da abbassare il gradiente idraulico di pressione in una determinata porzione di terreno. Sono adoperati principalmente in terreni con una buona permeabilità come ghiaia o sabbia, mentre in terreni argilloso/coesivi è necessario creare una camera di prefiltro con sabbia che costituisce sia un'intercapedine a protezione dall'intasamento del filtro sia una comunicazione drenante nei terreni stratificati.

L'impianto è formato da:

- **Gruppo aspirante:** costituito da una o più pompe a vuoto autoadescanti in grado di aspirare acqua fino a prevalenze elevate;

- **Wellpoints:** punte aspiranti costituite da una serie di filtri in materiale plastico o metallico, che consentono di utilizzare portate di eduazione elevate senza provocare la movimentazione e l'asportazione di particelle solide del terreno;
- **Collettori di aspirazione:** tubazioni usate per collegare i wellpoints alle varie pompe;
- **Tubazione di scarico:** allontana l'acqua emunta dallo scavo e la convoglia ad un recettore finale.

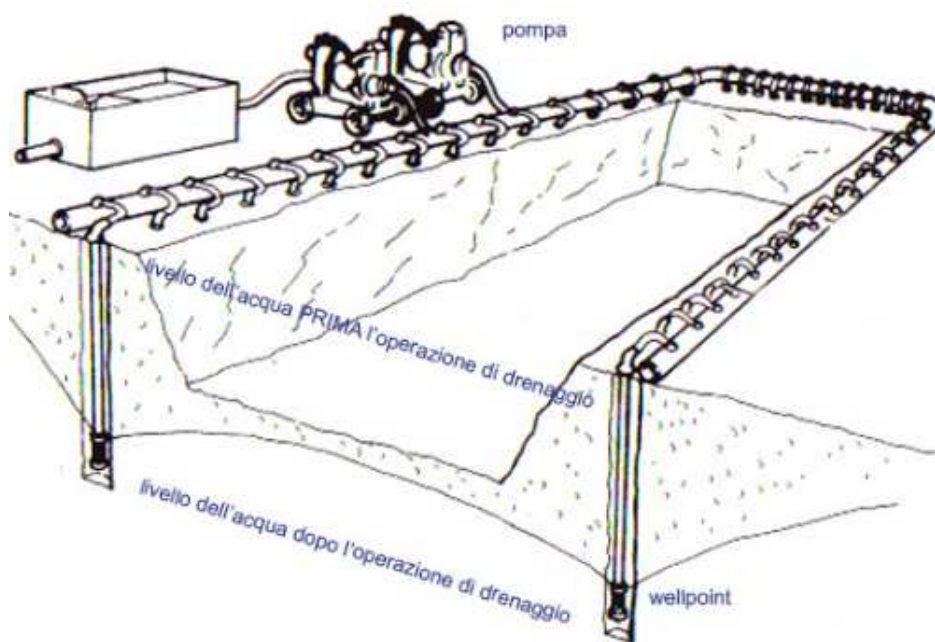


Figura 2-9: Impianto wellpoint ([www.besuttiscavi.it](http://www.besuttiscavi.it))

Tramite l'aspirazione dell'acqua da parte del gruppo aspirante, si genera un flusso di falda in direzione delle punte di wellpoint con un susseguente abbassamento dinamico della falda in corrispondenza dell'impianto. L'efficacia del sistema viene molto influenzata oltre che dalle caratteristiche di conducibilità idraulica della falda anche dalla disposizione geometrica, dalla profondità e dall'interdistanza tra le punte aspiranti nella porzione di terreno da trattare.

Nella realizzazione di gallerie superficiali i sistemi wellpoint possono essere utilizzati sia da soli per l'abbassamento del livello di pressione dal fondo dello scavo, oppure in ausilio ad altre tecnologie come aria compressa o congelamento in modo da massimizzare la resa e l'effetto di tali sistemi di pretrattamento.

Questi drenaggi possono essere provvisori, nel caso in cui vengono utilizzati solo per rendere possibile lo scavo della galleria in sicurezza, oppure definitivi se hanno lo scopo



di preservare le condizioni piezometriche prefissate intorno al manufatto finito, in relazione alle sue caratteristiche strutturali (*Baldovin, Cicolani, Gioda, 1992*).

In relazione alla quota del livello piezometrico ed alla copertura della galleria, il wellpoint può essere realizzato dal piano campagna (installato esternamente all'area di scavo) o dall'interno stesso della galleria (sul piano di calpestio seguendo l'avanzamento dello scavo).

### 2.2.2 Jet grouting

La tecnologia del "jet grouting" consiste nell'iniettare ad altissima pressione (200-700 bar) una miscela cementizia stabilizzante in modo da creare un elemento di terreno conglomerato (colonna di jetting) con caratteristiche meccaniche migliori rispetto alle condizioni iniziali.

Questo tipo di intervento, introdotto negli anni '60/'70 in Giappone, è largamente usato in opere civili in cui si rende necessario effettuare un consolidamento, un'impermeabilizzazione o un costipamento di terreni con scarse caratteristiche meccaniche oppure una riduzione della permeabilità in sito.

La sua grande versatilità e flessibilità lo rendono idoneo all'applicazione sia negli scavi in sotterraneo per la realizzazione di interventi di consolidamento in avanzamento del fronte di scavo, sia negli scavi a cielo aperto per il consolidamento di sottomurazioni o diaframmi d'impermeabilizzazione. Questo sistema è stato adottato, ad esempio, per la realizzazione della stazione Libia nella metropolitana di Roma (*Chiarelli, 2016*), per stabilizzare ed impermeabilizzare il terreno al di sotto del piano di scavo della galleria, creando un tampone di fondo.

Il procedimento classico di realizzazione si articola in due fasi successive:

- **Fase Top Down (TD):** Fase di perforazione fino alla profondità necessaria che viene eseguita con una testa autopercutente di diametro opportuno con l'utilizzo di acqua in pressione come fluido di perforazione in modo da asportare parte del materiale scavato;
- **Fase Down Top (DT):** Fase di iniezione ad alta pressione della miscela cementizia in risalita che può essere continua o a gradini di altezza predeterminati. Durante l'iniezione si ha sia l'azione disgregante che l'azione stabilizzante in cui

si effettua il mescolamento boiaccia-terreno necessario per conferire al materiale trattato caratteristiche meccaniche migliorate.

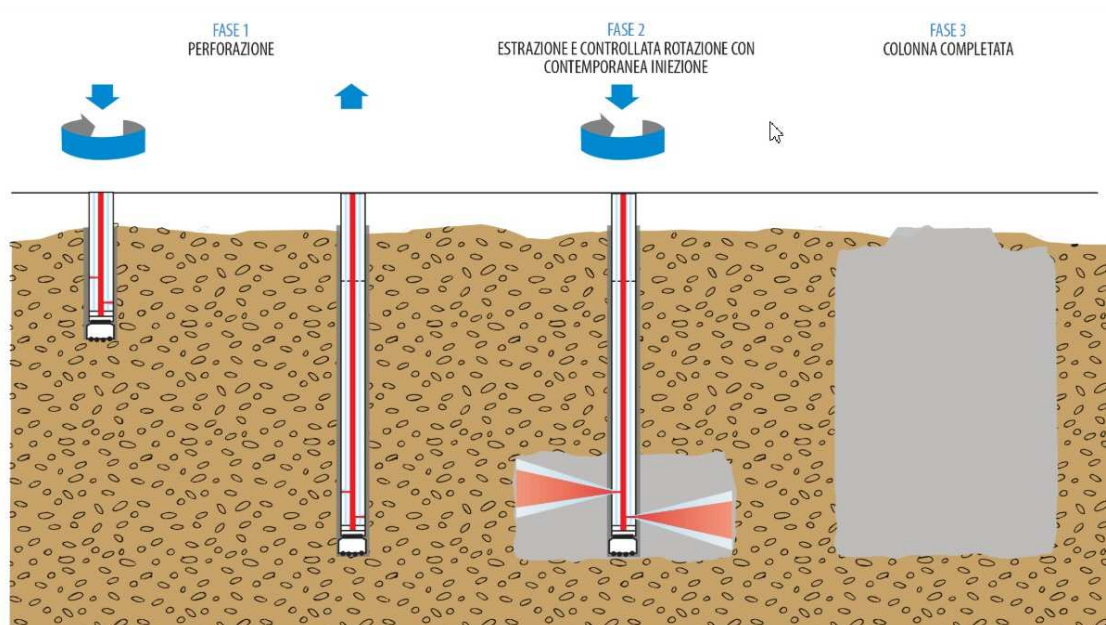


Figura 2-10: Fasi realizzative della tecnica del Jet-Grouting.( [www.trevispa.com](http://www.trevispa.com))

La miscela cementizia utilizzata può essere classificata in base al numero di materiali iniettati durante la realizzazione:

- **Sistema monofluido:** (Figura 2-11 a) utilizza un unico fluido, costituito da una sospensione cementizia, utilizzato sia per l'azione disagregante che per quella stabilizzante, il quale viene iniettato attraverso appositi ugelli posti sul fondo della batteria di perforazione;
- **Sistema bifluido:** (Figura 2-11 b) la disagregazione e la miscelazione avviene attraverso un getto ad alta pressione di miscela cementizia ed aria compressa che aumenta il raggio d'azione ed il potere penetrante della miscela nel terreno;
- **Sistema trifluido:** (Figura 2-11 c) si utilizzano anche getti d'acqua pressurizzata che insieme ai getti d'aria compressa provocano una parziale rimozione della frazione fine del terreno. Contemporaneamente attraverso ugelli sottostanti viene iniettata la miscela cementizia la quale funge da agente stabilizzante.

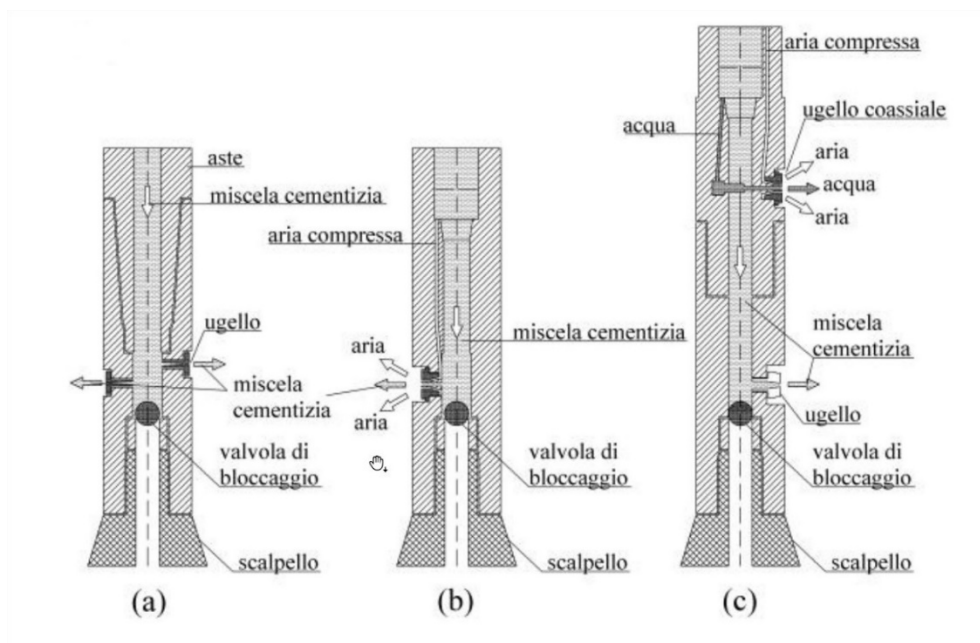


Figura 2-11: Sistemi d'iniezione Jet-Grouting: (a) monofluido; (b) bifluido, (c) trifluido. (Pietro Lunardi 1992.)

I principali criteri e parametri da tenere in considerazione per la scelta e il dimensionamento dell'intervento di jet grouting sono:

- Diametro e interasse tra le colonne di materiale consolidato;
- Resistenza meccanica e permeabilità del terreno da trattare;
- Velocità di perforazione e di ritiro delle aste;
- Pressione di iniezione della miscela cementizia;
- Composizione della miscela (rapporto A/C ed eventuale aggiunta di bentonite o di additivi fluidificanti).

Tutti questi parametri devono essere determinati prima della realizzazione dell'intervento attraverso l'esecuzione di sondaggi geognostici, prove penetrometriche e di permeabilità ed attraverso la disposizione di un campo prove necessario a determinare la migliore modalità di iniezione, il limite di rifiuto del terreno oltre che la composizione della miscela cementizia più idonea alle caratteristiche fisiche e meccaniche del terreno da trattare.

### 2.2.3 Iniezioni di miscele

La metodologia di trattamento del terreno mediante iniezioni di miscele nasce dall'esigenza di dover migliorare le caratteristiche di resistenza meccanica e d'impermeabilità di terreni porosi o di ammassi rocciosi. Il miglioramento può essere

realizzato con varie tecniche di iniezione classificabili in funzione del livello di pressione d'immissione ed in base alla tipologia di miscele utilizzate. Le iniezioni si differenziano dal processo di jet grouting poiché non producono un'asportazione e una miscelazione del terreno, ma solamente un intasamento dei pori e delle fratture presenti nell'ammasso.

Con l'immissione a bassi livelli di pressione si ha un processo di permeazione, cioè di riempimento della porosità del terreno da parte della miscela senza sostanziali modifiche allo scheletro solido del terreno; mentre con maggior pressione d'immissione si ha l'idrofratturazione, cioè la penetrazione della miscela in nuove fessure aperte dal processo stesso di iniezione.

Nel trattamento di terreni sciolti a granulometria grossolana o di rocce fessurate vengono utilizzate principalmente miscele a base cementizia alle quali possono essere aggiunti diversi tipi di additivi in maniera tale da modificare le proprietà (viscosità, permeazione, impermeabilità, resistenza) della miscela in funzione dello scopo dell'intervento e delle caratteristiche del terreno da trattare.

Nella realizzazione di gallerie sotterranee in ambito urbano le miscele possono essere utilizzate in trattamenti (preventivi e non) di consolidamento e/o impermeabilizzazione per consentire lo scavo in condizioni di sicurezza oltre alla riduzione dei cedimenti in superficie e della permeabilità del terreno. Un esempio di caso applicativo riguarda l'intervento sul fondo dello scavo durante la realizzazione della Metropolitana Milanese (Figura 2-12), in cui venne usata una miscela cementizia a base Silicatica-Minerale (Silacsol) in grado di garantire buoni risultati sia in termini di impermeabilizzazione che di consolidamento.

Nel caso di trattamenti che possono entrare in contatto con acque di falda occorre porre particolare attenzione alla scelta della tipologia di miscela, optando per miscele ed additivi non tossici in maniera tale da evitare contaminazioni della falda.

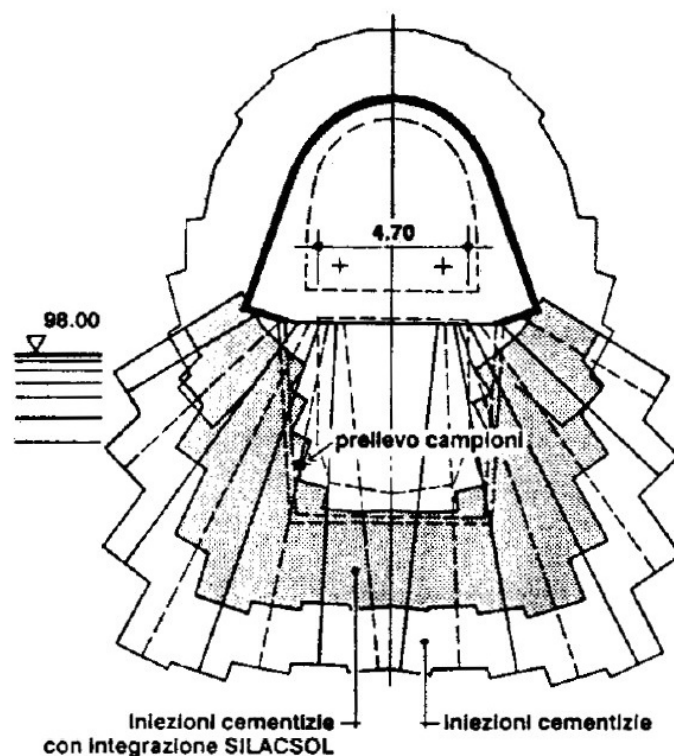


Figura 2-12: Trattamento con iniezioni cementizie integrate sottofalda con SILACSOL con lo scopo di impermeabilizzazione del fondo dello scavo della Metropolitana Milanese. (Ribacchi R., 2018)

#### 2.2.4 Congelamento

La tecnica del congelamento artificiale dei terreni è maggiormente utilizzata per la realizzazione di strutture in sotterraneo come gallerie e pozzi sottofalda in condizioni difficili e, in particolar modo, quando vi è l'impossibilità di applicare altre tecniche relativamente più economiche.

Questa tecnologia, utilizzata sin dal 1880 per la realizzazione di pozzi minerari in Germania, consente di stabilizzare temporaneamente terreni poco consistenti e saturi d'acqua attraverso la circolazione nel terreno di un liquido refrigerante costituito da una "salamoia" (una soluzione acquosa concentrata di Sali) o attraverso l'utilizzo di azoto liquido come refrigerante.

Negli interventi di scavo in terreni posti sotto il livello di falda consente la creazione di uno strato di terreno saturo congelato, che costituisce un'efficace paratia impermeabile temporanea. Bloccando il flusso delle acque sotterranee consente lo scavo in condizioni asciutte e migliora la stabilità del materiale da scavare.

Nel tempo la tecnica del congelamento ha raggiunto un elevato grado di affidabilità, grazie alla:

- possibilità di monitorare costantemente l'efficacia del congelamento e di intervenire tempestivamente in caso di venute d'acqua o indizi di instabilità dei fronti di scavo;
- possibilità di prevedere, attraverso campi prova e prove di laboratorio, il comportamento del terreno durante la fase di congelamento e di disgelo ;
- omogeneità del trattamento all'interno del volume di terreno.

La circolazione nel terreno del fluido refrigerante avviene mediante apposite tubazioni coassiali, denominate sonde congelatrici, disposte entro fori di perforazione verticali o sub-verticali di piccolo diametro (circa 15 cm). Per avere una buona omogeneità di trattamento, ed evitare la creazione di zone di terreno non congelate, va posta particolare attenzione alla disposizione planimetrica delle sonde congelatrici valutando a priori il loro raggio di influenza.

Si distinguono tre principali metodi di congelamento che si differenziano in base al fluido frigorifero scelto e alla relativa temperatura di utilizzazione:

- **Metodo diretto:** (Figura 2-13) utilizza azoto liquido a bassissima temperatura ( $-196^{\circ}\text{C}$ ) spinto nelle sonde dalla pressione stessa che si ha nel serbatoio di stoccaggio. Il fluido vaporizza nelle sonde alimentate in serie e successivamente viene disperso in atmosfera ad una temperatura nettamente superiore rispetto a quella di immissione all'interno del circuito;
- **Metodo indiretto:** (Figura 2-14) nel quale viene utilizzata la salamoia raffreddata da un circuito frigorifero ad una temperatura ( $-20^{\circ}\text{C}/-30^{\circ}\text{C}$ ) nettamente superiore rispetto a quella dell'azoto liquido . Le sonde, collegate tramite un circuito chiuso, vengono alimentate in parallelo.
- **Metodo misto:** nel quale si associa la grande potenza criogenica dell'azoto liquido alla tecnica tradizione che utilizza gruppi frigoriferi e salamoia.

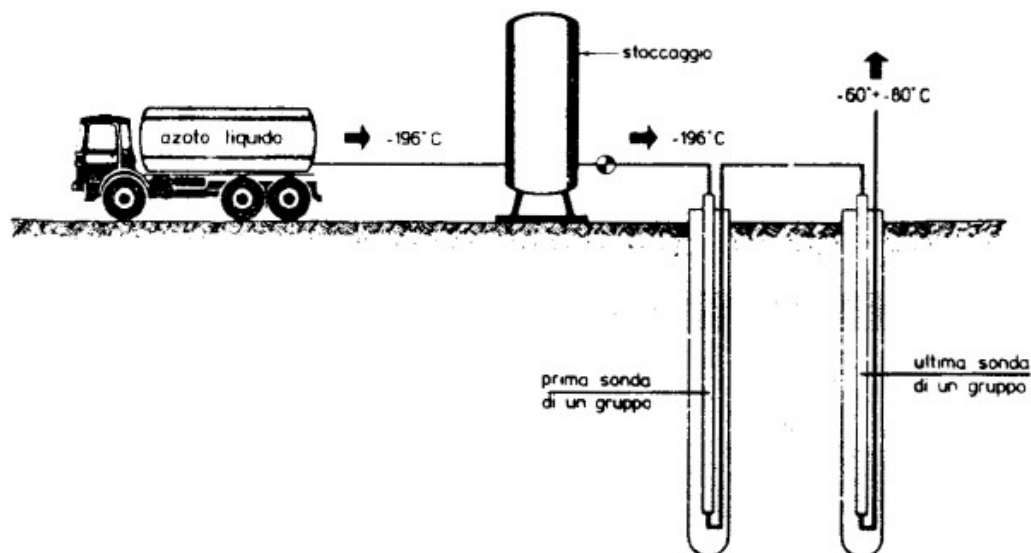


Figura 2-13: Schema impiantistico trattamento con Azoto liquido (metodo diretto)(Balossi,Restelli,1995.)

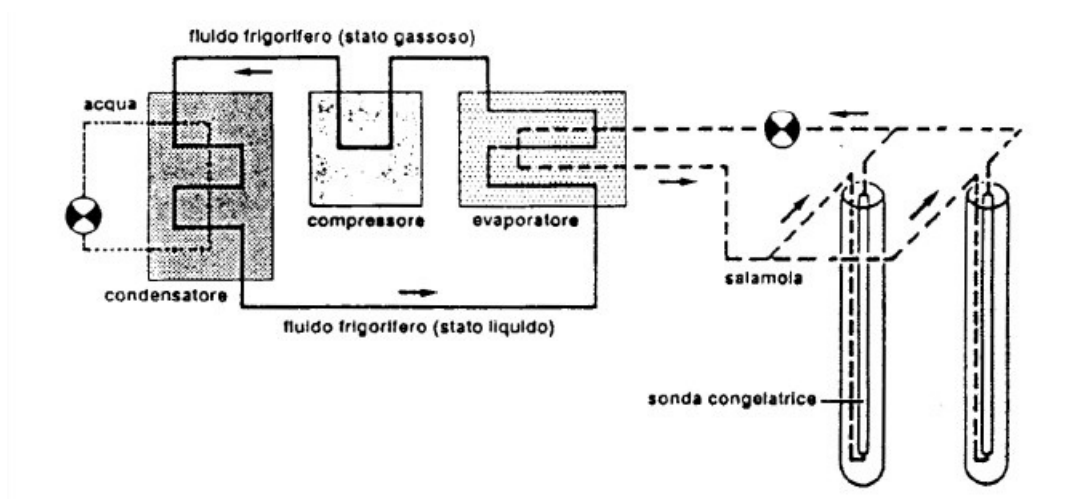


Figura 2-14: Schema impiantistico trattamento con Salamoia (metodo indiretto) (Balossi,Restelli,1995.)

La tecnica è stata utilizzata nella realizzazione di varie gallerie metropolitane (Roma, Napoli, Milano) con lo scopo di consolidare materiale incoerente da scavare o per bloccare fenomeni di sifonamento, come nel caso della Metropolitana Milanese. In questo caso (Figura 2-15) è stato utilizzato il metodo diretto ad azoto liquido per il congelamento di uno strato di limo argilloso posto sul fondo dello scavo per una lunghezza di circa 400 metri non trattabile tramite interventi di iniezione di miscele.

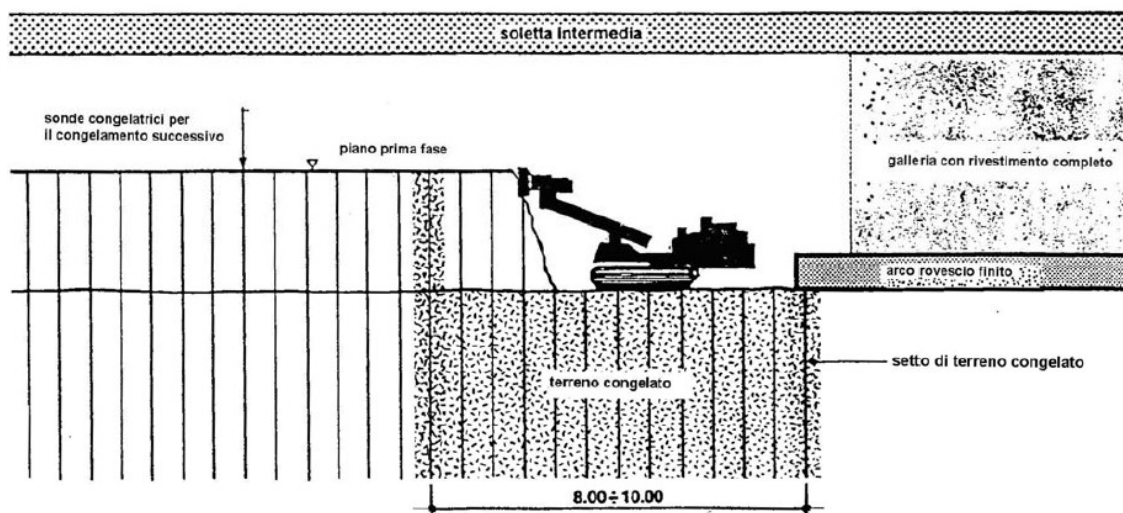


Figura 2-15: Congelamento del limo argilloso posto sul fondo dello scavo tramite sonde congelatrici ad azoto liquido. (Ribacchi R, 2018)

### 2.2.5 Scavo in atmosfera iperbarica

Mentre le tecniche di pretrattamento convenzionali cercano di modificare le caratteristiche di permeabilità e di stabilità del terreno attraversato dal tracciato dell'opera, l'aria compressa genera una sovrappressione interna alla galleria che fornisce un'azione di supporto al fronte di scavo e un bilanciamento della pressione idrostatica dell'acqua di falda senza però alterare le caratteristiche fisiche e meccaniche dei terreni presenti in sito. Ciò rende questa tecnica particolarmente apprezzabile quando il tracciato della galleria attraversa un corpo idrico sotterraneo da preservare, evitando qualsiasi possibile contaminazione o alterazione.

La quantità d'aria necessaria a bilanciare la spinta idrostatica della falda può essere calcolata attraverso metodi empirici o semi-empirici a partire dal livello massimo di pressione idrostatica calcolato alla base di scavo della galleria e dalle perdite d'aria nel tunnel dovute alla permeabilità all'aria dei terreni attraversati (che varia in funzione della saturazione).

Questo implica una gestione dinamica del cantiere con un attento monitoraggio dei livelli di pressione d'aria interna, in modo da fornire la pressurizzazione necessaria a bilanciare eventuali oscillazioni dei livelli piezometrici (di origine antropica o naturale), garantendo così condizioni di sicurezza ai lavoratori coinvolti nella realizzazione dell'opera.

Per assicurare una buona riuscita dell'intervento bisogna attuare le seguenti condizioni (J. Schwarz & Hehenberger, 2004):



1. Minimizzare le perdite d'aria attraverso il contorno e il fronte dello scavo;
2. Realizzare una distribuzione omogenea e costante della pressione dell'aria nel volume pressurizzato.
3. Eguagliare con l'atmosfera iperbarica, la pressione idraulica della falda alla quota del piano di fondo scavo.

Tali condizioni possono essere assicurate tramite le seguenti operazioni, messe in pratica prima dell'applicazione della sovrappressione:

- È necessaria la costruzione di una struttura di contenimento per la sovrappressione realizzabile tramite scatolare in calcestruzzo realizzato attraverso diaframmi, nel caso di utilizzo del metodo Milano; oppure mediante interventi atti a ridurre la permeabilità all'aria dei terreni nel contorno del volume da scavare nel caso di utilizzo del metodo tradizionale;
- Installazione di una paratia di ingresso e uscita necessaria per separare l'ambiente in condizioni atmosferiche (normobariche) dall'ambiente in condizioni iperbariche. Deve essere opportunamente dimensionata in funzione del livello di sovrappressione applicata, del numero e della tipologia tipo di mezzi d'opera che devono attraversarla per effettuare le operazioni di scavo e smarino del materiale;
- Installazione di sistemi di produzione e distribuzione dell'aria compressa all'interno del volume di scavo.

Questa tecnica di scavo consente, rispetto alle soluzioni alternative descritte nei paragrafi precedenti, notevoli vantaggi relativamente agli aspetti ambientali, economici e realizzativi dell'opera, tra cui:

1. Riduzione dello spessore dei diaframmi laterali grazie alla spinta stabilizzante dell'aria pressurizzata all'interno della camera di scavo;
2. Minor costo di trattamento del marino a causa del minor contenuto d'acqua;
3. Riduzione dei rischi di subsidenza in superficie e le interferenze con gli edifici;
4. Eliminazione degli effetti ambientali o fisici sulla qualità dell'acqua di falda, poiché non si usano miscele cementizie o additivi;
5. Aumento della stabilità al fronte di scavo, conseguentemente alla riduzione del contenuto d'acqua nel terreno ed alla pressione esercitata dall'aria;

D'altro canto, lo scavo iperbarico richiede maggiori investimenti iniziali (tempo e costi) per gli allestimenti tecnologici necessari alla sua realizzazione, nonché specifiche misure

Buone Pratiche di Ingegneria e Sicurezza nello scavo di gallerie in atmosfera iperbarica

di prevenzione e protezione atte a garantire le condizioni di sicurezza ai lavoratori che operano in atmosfera iperbarica.

### **3. STATO DELL'ARTE DELLO SCAVO DI GALLERIE IN ATMOSFERA IPERBARICA**

L'utilizzo dell'aria compressa per la realizzazione di opere civili in sotterraneo si è sviluppata all'incirca a metà del XIX secolo. Fino ad allora la tecnica era stata prevalentemente adottata come supporto agli scudi in legname nel sostentamento delle pareti dello scavo in terreni bagnati nell'ambito minerario.

La diffusione di tale tecnica nell'ambito dello scavo di gallerie civili è stata favorita dallo sviluppo delle infrastrutture di collegamento, principalmente ferroviarie, nella metà del XIX secolo, che ha comportato lo scavo di gallerie sotto falda oppure sottoattraversamenti fluviali.

L'invenzione della tecnica si deve all'ammiraglio Sir Thomas Cochrane, il quale, ispirato dalle problematiche di stabilità e di venuta d'acqua incontrate da Brunei nella costruzione del sottoattraversamento del Tamigi, prese un brevetto del 1830 per un apparecchio ad aria compressa e cercò di modificarlo ed applicarlo agli scudi utilizzati per lo scavo in sotterraneo di gallerie.

Il primo vero utilizzo dell'aria compressa per lo scavo di gallerie risale al 1886, durante la costruzione della South London Railway. La tecnica è stata adoperata, per rendere più agevoli e sicure le operazioni di scavo, nella realizzazione di una galleria lunga circa 9 km che attraversava un terreno principalmente argilloso, quindi impermeabile, con brevi tratti caratterizzati da lenti di terreno più permeabile (sabbie e ghiaie) che causavano copiose venute d'acqua.

La prima applicazione in assenza di scudo risale al 1898, per la costruzione di un tunnel di aspirazione, nel Cleveland East Side, lungo circa 8 km con rivestimento in mattoni.

Nelle prime applicazioni, dove non si erano assunte le necessarie precauzioni medico-sanitarie ed organizzative, si verificarono i primi incidenti per allagamento e si manifestarono malattie barotraumatiche negli operatori, a causa dell'esposizione prolungata all'atmosfera iperbarica. Si è quindi sin da subito posta maggiore attenzione al tema, emanando delle prescrizioni per ridurre al minimo il rischio di contrarre barotraumi, come ad esempio:

- Esame medico obbligatorio per ogni lavoratore in merito alle condizioni fisiche prima dell'inizio dell'attività lavorativa.

- Limitazione delle ore di lavoro e di esposizione a condizioni di sovrappressione d'aria
- Attuazione della procedura di decompressione con velocità molto lenta.

Non vi sono evidenze in letteratura che indichino l'utilizzo della tecnica di scavo in atmosfera iperbarica fino agli anni 90' del XX secolo. Ciò potrebbe essere giustificato dall'introduzione di nuove tecniche di trattamento dei terreni e di scavo di gallerie (cfr. paragrafo 2.2), preferibili in assenza di particolari vincoli di natura ambientale o urbanistica, e dall'evoluzione della medicina iperbarica e delle tecnologie e procedure di compressione e decompressione

### 3.1 ESPERIENZE SIGNIFICATIVE DI GALLERIE REALIZZATE IN ATMOSFERA IPERBARICA

Negli ultimi decenni, grazie all'innovazione tecnologica avuta nel controllo dei cicli di compressione / decompressione e nelle tecniche di scavo, ma anche grazie alla diffusione di una maggiore attenzione e sensibilità alle tematiche ambientali, la tecnica dell'aria compressa si è diffusa sempre più nel continente Europeo trovando applicazione principalmente nella costruzione di tunnel ferroviari o automobilistici soprattutto in Germania e in Svizzera (Tabella 1).

Questa tecnologia ha così fornito una soluzione innovativa e sicura laddove le difficili condizioni geologiche e idrologiche non permettevano l'utilizzo delle tecniche di scavo e di pretrattamento tradizionali.

*Tabella 1: Principali applicazioni della tecnica di scavo in aria compressa in Europa*

| Galleria  | Periodo esecuzione | Lunghezza                         | Pressione relativa di lavoro (bar) |
|---|--------------------|-----------------------------------|------------------------------------|
| Reinhufnerstrasse tunnel (Düsseldorf, Germania) | 1993               | 1930 (totale)                     | \                                  |
| Audi tunnel (Ingolstadt, Germania)              | 2001               | 1070 m (tratto in aria compressa) | 1,0                                |
| Emmequerung tunnel (Kirchberg, Svizzera)        | 2001               | 295 m (tratto in aria compressa)  | 0,5                                |
| Allmend tunnel (Lucerna, Svizzera)              | 2008 ÷ 2011        | 900 m (tratto in aria compressa)  | 0,7                                |
| Offenbau tunnel (Thalmässing, Germania)         | 1999 ÷ 2004        | 1165 m (totale)                   | \                                  |
| Hemelingen tunnel (Brema, Germania)             | 1999 ÷ 2003        | 593 m (tratto in aria compressa)  | \                                  |

### 3.1.1 Emmequerung tunnel

La costruzione della galleria Emmequerung si è resa necessaria per il sotto attraversamento del fiume Emme e dell'autostrada A1 durante la costruzione della linea ferroviaria Kirchberg/Rüdtligen-Alchenflüh nel Cantone di Berna (Svizzera).

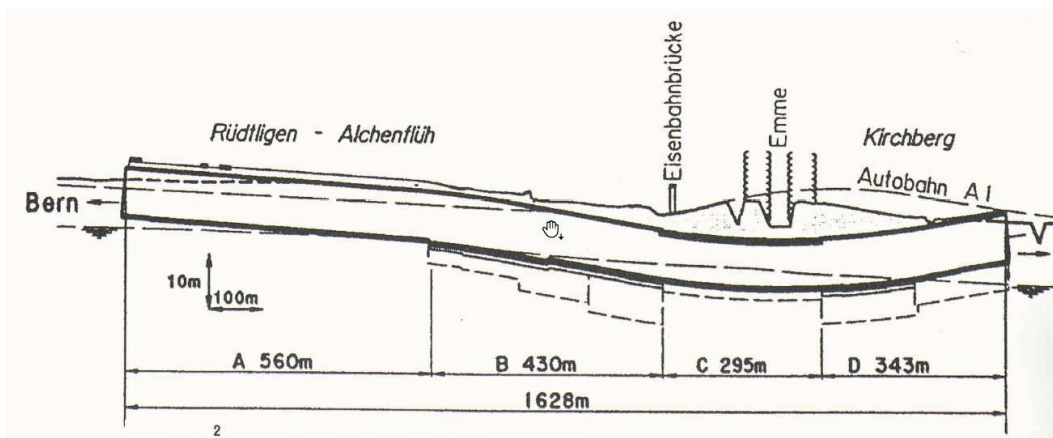


Figura 3-1: Sezione tunnel Emmequerung nella zona del sottoattraversamento del fiume Emme e dell'autostrada A1 (Menètrety et al., 2001).

Il tracciato della galleria attraversa strati di ghiaia densa e piccoli strati di ghiaia sabbiosa caratterizzati da alti livelli di permeabilità.

Per circa 800 metri la galleria si trova sotto il livello piezometrico, con un battente massimo, rispetto al piano di scavo della galleria, pari a 4.5 m. Lo scavo in atmosfera iperbarica è stato adottato per realizzare un tratto di galleria lungo 295 m (Menètrety et al., 2001).

Lo scavo è stato realizzato con metodo a sezione parzializzata, scavando e rivestendo prima la porzione di galleria posta sopra al livello di falda, in condizioni atmosferiche; successivamente è stato realizzato lo scavo di ribasso in atmosfera iperbarica.

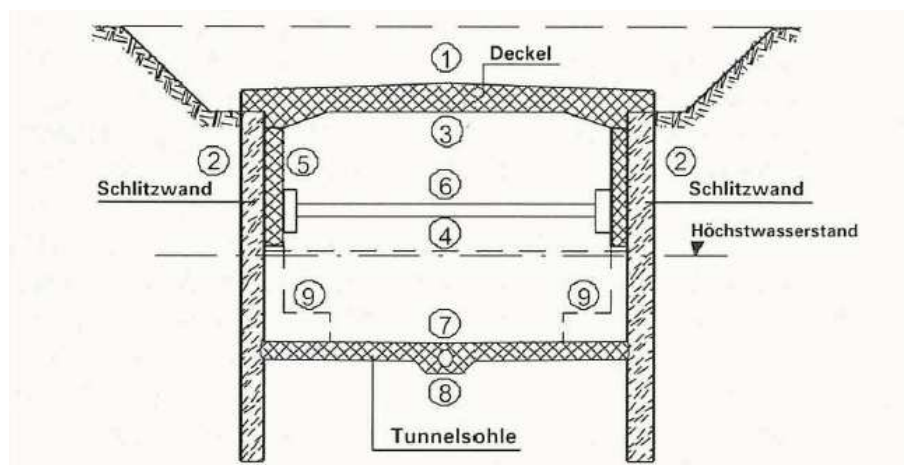


Figura 3-2: Sezione tunnel Emmequerung. (Menétrey et al., 2001)

Per la realizzazione dell'opera sono stati utilizzati mezzi ed attrezzature ad alimentazione elettrica; per lo smarino è stato utilizzato un nastro trasportatore mobile ed inclinabile. Il trasporto è stato eseguito al termine dello scavo e rivestimento della galleria.

La pressione relativa applicata per abbassare il livello piezometrico al di sotto del piano di fondo scavo è pari a circa 0,5 bar.

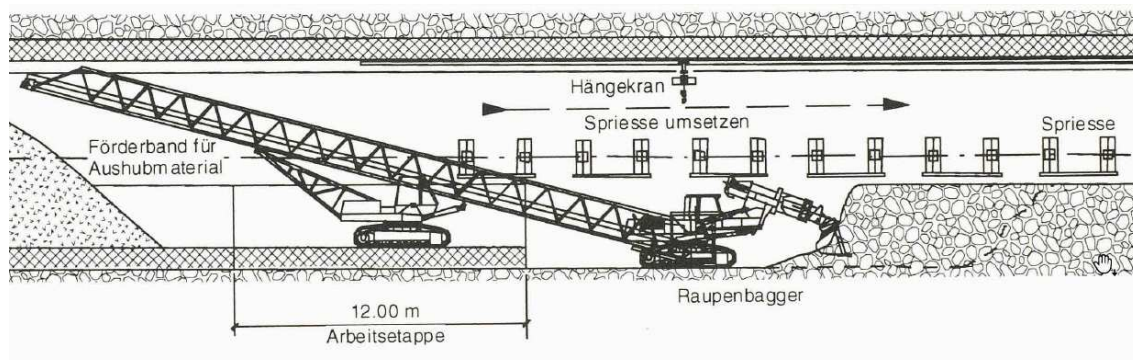


Figura 3-3: Fasi di scavo e smarino del materiale durante il ribasso in condizioni iperbariche della galleria Emmequerung. (Menétrey et al., 2001)

### 3.1.2 Audi tunnel

L'Audi tunnel, realizzato tra il 1999 e il 2002, si trova ad Ingolstadt lungo la linea ferroviaria ad alta velocità Norimberga – Monaco.

Il tracciato dell'opera attraversa:

- una falda freatica superficiale, con soggiacenza di 1.5 ÷ 2 metri rispetto al piano campagna, ed una falda artesianica, con livello idrostatico a circa 2 metri sopra il piano campagna, separate da strati impermeabili. (Figura 3-4);

- un terreno costituito da una sequenza di ghiaia sabbiosa limosa alternata da strati di limo ed argille, poggiata su uno strato di calcari e dolomie. (J. Schwarz & Meyer, 2001)

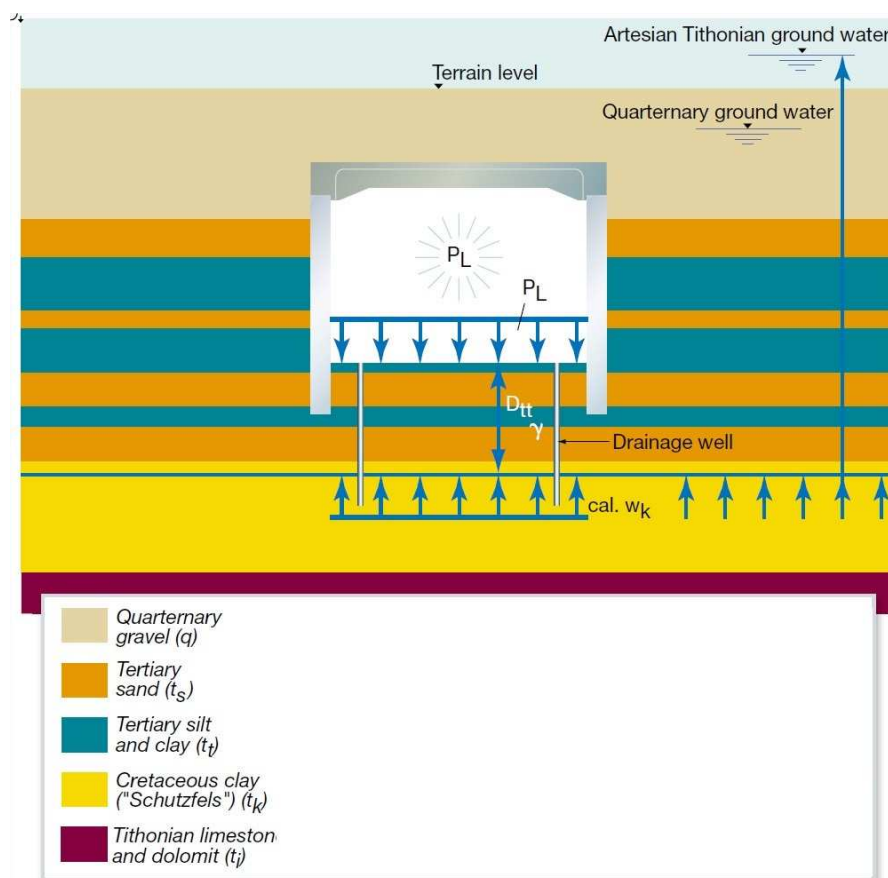


Figura 3-4: Sezione geologica e idrogeologica Audi tunnel (D.-I. J. Schwarz & Hehenberger, 2004).

Inoltre, il tracciato della galleria si sviluppava in prossimità dello stabilimento automobilistico Audi (da cui il nome dell'opera), imponendo particolare attenzione alla subsidenza ed alle vibrazioni indotte in superficie dallo scavo. Si è optato così per il metodo "cut & cover" con tecnica di scavo in atmosfera iperbarica per realizzare un tratto di galleria lungo 1070 metri (su 1250 metri complessivi).

Per garantire il bilanciamento delle pressioni idrostatiche nell'area di scavo, sono stati inoltre, installati alcuni drenaggi (pozzi di rilassamento) realizzati dal piano inferiore della galleria verso la falda artesia (Figura 3-5). Ciò ha permesso di ridurre le pressioni nelle lenti di sabbia e negli strati di argilla posti sotto il piano di scavo, ottenendo così un maggior controllo delle pressioni relative durante la fase di scavo.

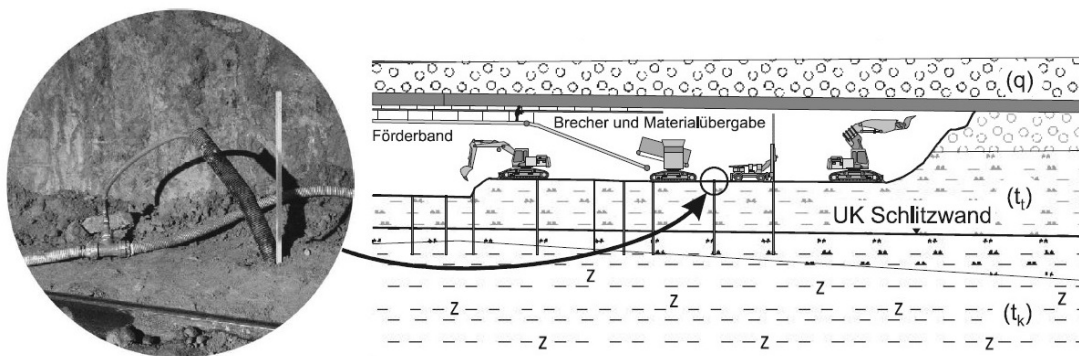


Figura 3-5: Dettaglio degli interventi di drenaggio nell'Audi tunnel. (J. Schwarz & Meyer, 2001)

Le operazioni di scavo sono state effettuate con l'ausilio di mezzi elettrici, per una miglior gestione della qualità dell'aria all'interno della galleria. I valori di pressione relativa esercitata variano tra 0,6 e 1,45 bar (*DB Knoten Ingolstadt*).

### 3.1.3 Linea ferroviaria bassa valle dell'Inn (BBT). Applicazione del jet grouting per scavi sottofalda in condizioni iperbariche

Il tracciato della nuova ferrovia della bassa valle dell'Inn ha richiesto la realizzazione di diverse gallerie sottofalda, con bassa copertura ed in sottoattraversamento di numerose infrastrutture esistenti. Le difficili condizioni geologiche e idrologiche lungo il tracciato del Tunnel Stans e del sottoattraversamento della ferrovia di Fritzens hanno richiesto una particolare modalità di scavo, mai usata in precedenza, realizzata con l'unione di jet grouting ed atmosfera iperbarica.

ciò dimostra che lo scavo di gallerie superficiali in ambito urbano in atmosfera iperbarica può anche fungere da strumento di supporto alle tecniche tradizionali d'impermeabilizzazione e di realizzazione di gallerie, incrementando il livello di sicurezza dei lavoratori.

Il tunnel Fritzens si estende per 430 m sotto alla linea ferroviaria esistente, con una copertura media di 6 m rispetto al piano campagna e di solo 1 m rispetto alle fondazioni dei tralicci e dei binari presenti in superficie. Nel sottosuolo sono presenti sedimenti di ghiaie coperte da sabbie alluvionali e il livello di falda la quota del tetto della galleria, con oscillazioni stagionali molto consistenti (fino a 2.5 m). La necessità di evitare cedimenti e vibrazioni in superficie, nonché di mantenere il traffico ferroviario, hanno comportato l'adozione della tecnica di scavo tradizionale, con un consolidamento al fronte ed al contorno tramite iniezioni di jet grouting e lo scavo in atmosfera iperbarica



per far fronte alle eventuali infiltrazioni d'acqua derivanti da imperfezioni nella realizzazione del jet grouting. Lo scavo è avvenuto a sezione parzializzata con livelli di pressione modulati a seconda della porzione scavata (0.5 bar in calotta, 1.2 bar alla soletta).

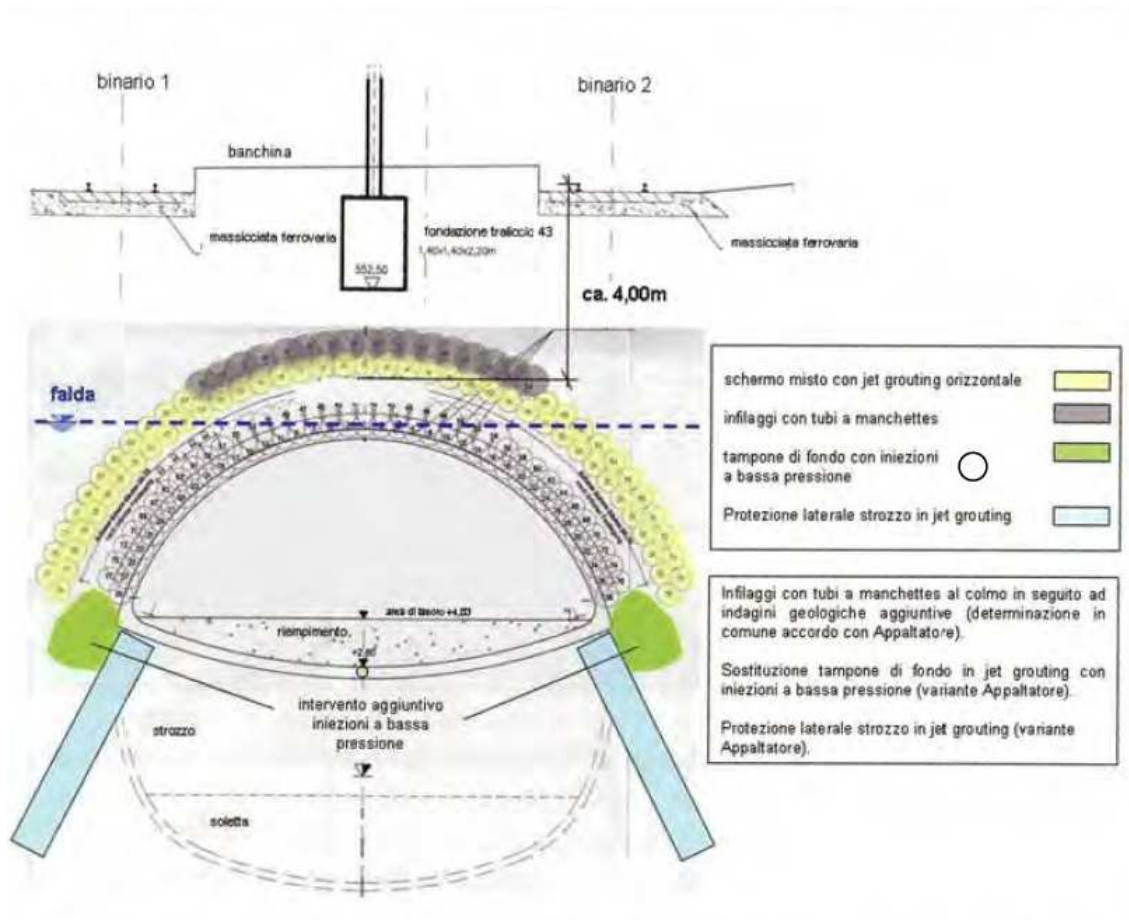


Figura 3-6: Realizzazione della galleria Fritzens con uno accoppiato di jet grouting ed atmosfera iperbarica.(Palla-Leitner-Herdina ,2015)

### 3.2 EFFETTI DELL'ESPOSIZIONE PROLUNGATA AD ATMOSFERE IPERBARICHE IN AMBIENTE DI LAVORO

L'effetto dell'aria compressa sull'organismo umano varia sostanzialmente in relazione a:

- livello di pressione relativa applicata;
- condizioni ambientali (temperatura e qualità dell'aria);
- condizioni fisiche del lavoratore.

Si definisce “aria compressa” l'aria o gas respirabile con una pressione superiore ad un determinato livello di pressione, variabile in funzione della normativa adottata. (0.1 bar per la normativa svizzera(Suva, 2016), francese e italiana (D.lgs. 81/08); 0.15 bar in quella inglese) poiché al di sotto di questi valori il rischio dell'insorgenza di malattie da decompressione nei lavoratori risulta essere trascurabile. Secondo quanto riportato nella normativa inglese (British Tunnelling Society, 2012), a valori di sovrappressione < 1 bar, rispetto alla pressione atmosferica, la possibilità dell'insorgenza di malattie da decompressione è relativamente bassa. Mentre è escluso lo sviluppo di necrosi ossea (osteonecrosi). La situazione è ben diversa nel caso del barotrauma, il quale può manifestarsi anche a livelli bassi di pressione (0.1–1 bar sovrappressione).

L'effetto della sovrappressione nei lavoratori può anche essere influenzato dai valori di temperatura ambientale presenti all'interno della camera di lavoro sotto pressione. Queste condizioni amplificano i normali effetti di caldo e freddo sull'organismo, determinando una maggiore perdita di calore in condizioni di freddo e dissipando maggiormente il calore tramite la sudorazione in situazioni di caldo. La situazione di maggior freddo può aumentare il rischio di sviluppare una malattia da decompressione. È quindi necessario mantenere la temperatura dell'aria in camera di lavoro entro un determinato step di valori che vanno dai 10 ai 27 gradi C a seconda della normativa presa come riferimento e fornendo ai lavoratori la possibilità di interrompere le attività per riscaldarsi, anche attraverso la fornitura di cibi e bevande caldi, quando si hanno condizioni di freddo ed umidità.

- **Malattia da decompressione:** si manifesta entro le 24 ore successive al processo di decompressione, ed è dovuta alla formazione di bolle gassose conseguentemente all'espansione dell'azoto disciolto nel sangue. Si divide in malattia da decompressione di:

- tipo 1: si manifesta con disturbi lievi, localizzati principalmente nelle articolazioni, nella cute e nei vasi linfatici;
- tipo 2: interessa organi vitali come cervello, midollo spinale ed apparato respiratorio, causando spesso conseguenze letali.

Le malattie da decompressione possono essere trattate con una terapia di ricompressione terapeutica, eseguita in camera iperbarica e finalizzata a ripristinare il normale flusso di sangue e di ossigeno nei tessuti interessati. (Guida, Iperbarica, Controindicazioni, & Effetti, 2018);

- **Barotrauma:** è una lesione ai tessuti provocata dal mancato equilibrio fra la pressione ambientale e la pressione dell'aria presente nelle cavità corporee (apparato uditivo, seni frontali e paranasali, ecc.). Si manifesta in seguito al repentino passaggio da o verso una condizione di maggior pressione. I sintomi sono problemi di respirazione, dolore al torace, vertigini o sanguinamento dal naso. I barotraumi possono essere prevenuti attraverso manovre di compensazione (di deglutizione, di Valsalva e la di Toynbee) che bilanciano l'aumento di pressione ambientale;
- **Osteonecrosi iperbarica:** condizione cronica a lungo termine causata da una non adeguata fase decompressiva, che provoca la morte ischemica delle cellule che compongono sia le ossa che il midollo osseo;
- **Embolia gassosa arteriosa:** causata dal repentino aumento del volume dei gas presenti nell'apparato polmonare, determinando la rottura degli alveoli e l'ingresso diretto degli emboli gassosi nel circuito arterioso.

Tutte queste malattie possono essere trattate tramite l'OTI (OssigenoTerapia Iperbarica), cioè attraverso la somministrazione di Ossigeno puro o di miscele iperossigenate all'interno di apposite camere iperbariche in cui si raggiungono livelli di pressione che sono circa 2-3 volte superiori ai livelli di pressione atmosferica. L'aumento della quota di Ossigeno trasportata in soluzione nel plasma e disponibile per la respirazione tissutale, insieme alla ricompressione dei gas disciolti all'interno dell'organismo, permettono il ripristino dell'ossigenazione in zone dove i vasi sanguigni sono stati precedentemente danneggiati. La Società Italiana di Medicina Subacquea ed Iperbarica (S.I.M.S.I.) ha redatto la linea guida "Controindicazioni ed effetti collaterali dell'ossigenoterapia iperbarica (OTI)", che illustra e regola il trattamento di malattie tramite l'OTI.



*Figura 3-7: Camera iperbarica terapeutica per il trattamento dell'OTI (S.I.M.S.I).*

Per evitare l'insorgenza di malattie dovute all'esposizione prolungata dei lavoratori ad atmosfere iperbariche è necessario applicare scrupolosamente tutte le prescrizioni normative. Queste riguardano:

- le condizioni fisiche dei lavoratori che devono essere sottoposti a sorveglianza medica;
- i tempi e le modalità di svolgimento delle procedure di acclimatazione, di compressione e decompressione;
- i piani di sicurezza ed emergenza per l'ingresso e l'uscita in camera di lavoro pressurizzata;
- l'istruzione e la formazione dei lavoratori esposti alle condizioni iperbariche che verrà svolta attraverso corsi specifici in cui verranno fornite tutte le informazioni necessarie per la prevenzione di eventi di tipo barotraumatico e per il funzionamento di tutte le attrezzature utilizzate nella fase lavorativa.

### 3.3 QUADRO NORMATIVO PER LO SCAVO IN ATMOSFERA IPERBARICA

Lo scavo di gallerie in atmosfera iperbarica rappresenta una novità sul territorio nazionale italiano. Anche per questo motivo, non esistono specifici riferimenti normativi che definiscano le misure di prevenzione e protezione da attuare. Pertanto, occorre fare riferimento a riferimenti normativi internazionali specifici alle condizioni iperbariche.

La valutazione dei rischi associata all'atmosfera iperbarica può essere effettuata ponendo l'attenzione sui seguenti aspetti:

- Sulla tipologia di compressione che si intende attuare in termini di pressione relativa o assoluta, della durata dell'esposizione e di miscela di gas che si intende utilizzare per la pressurizzazione.
- Sulla tipologia di attività che si intende svolgere (attività fisica moderata, mediamente intensa, intensa);
- Sulla procedura di decompressione che si vuole effettuare.

Da queste informazioni implementate in specifici software o tabelle si può risalire al tempo e alla procedura più idonea da adottare durante la fase di decompressione.

Rientrano nelle procedure di valutazione del rischio anche le attrezzature accessorie messe a disposizione dei lavoratori; quali camere di decompressione, dotazioni di sicurezza e la presenza di medico iperbarico e di personale tecnico idoneo per il funzionamento della camera.

Ulteriore attenzione è da porre alla sorveglianza sanitaria necessaria per individuare alterazioni, disturbi e patologie dell'apparato respiratorio, cardio-vascolare ed al sistema nervoso dei lavoratori impiegati che possano andare a controindicare lo svolgimento dell'attività lavorativa in atmosfera iperbarica. Questa sorveglianza deve essere effettuata tramite opportune visite mediche periodiche necessarie a rilasciare certificati di idoneità al lavoro iperbarico.

Dai risultati ottenuti dalla valutazione dei rischi e dalla sorveglianza sanitaria si ricavano le dotazioni di sicurezza più idonee al caso specifico, in maniera tale da ottenere un elevato margine di sicurezza delle delicate fasi di compressione e decompressione.

### 3.3.1 Normative e Linee guida nazionali

L'unico riferimento normativo italiano che disciplina il lavoro in condizioni iperbariche è il D.P.R. del 20 marzo 1956, n.321 (nel seguito indicato come “DPR 321/56) riferito ai lavori eseguiti mediante cassoni ad aria compressa.

Il DPR 321/56 fornisce prescrizioni generali relative a:

- Campo di applicazione, il decreto viene applicato ai lavori eseguiti mediante cassoni ad aria compressa che risultano essere una tecnologia sostanzialmente diversa dallo scavo di gallerie in atmosfera iperbarica, poiché generalmente opera con livelli di pressurizzazione molto maggiori.
- Costruzione, allestimento ed esercizio degli impianti e degli apparecchi di fornitura aria;
- Assistenza sanitaria e pronto soccorso;
- Temperatura, illuminazione e qualità dell'aria nell'ambiente di lavoro;
- Gestione dei cicli di compressione e decompressione;
- Requisiti fisici e di età, visite mediche e documentazione dei lavoratori;
- Servizi igienici ( spogliatoi, camere di riposo, ecc.);
- Documentazione del cantiere (documenti di riconoscimento del personale, giornale dei lavori).

La norma UNI 11366 “Sicurezza e tutela della salute nelle attività subacquee ed iperbariche professionali al servizio dell'industria” (UNI,11366, 2010) definisce le caratteristiche delle attrezzature e degli equipaggiamenti utilizzati dal personale impiegato nelle attività subacquee e non in “lavori in scavi e/o gallerie” come ben specificato nel capitolo 1”Scopi e campi di applicazione”.

Anche il D.lgs 81/08 individua, tra i lavori che sottopongono il personale a particolari rischi per la sicurezza e la salute, i “Lavori in cassoni ad aria compressa”, ed . (Unico, Salute, & Sul, 2018)

### 3.3.2 Normative e Linee guida internazionali

Per sopperire alle carenze della normativa italiana è necessario fare riferimento a linee guida e normative internazionali (Tabella 2), redatte da Paesi in cui la tecnologia dello scavo iperbarico è adoperata da maggior tempo.

Tabella 2: Normative internazionali riguardanti l'attività di scavo di gallerie in condizioni iperbariche

| Paese              | Riferimenti normativi  |
|--------------------|--|
| <b>Svizzera</b>    | <ul style="list-style-type: none"> <li>SUVA – 832.311.12. Ordinanza sulla sicurezza dei lavoratori nei lavori in condizioni di sovrappressione, 2016</li> </ul>  |
| <b>Francia</b>     | <ul style="list-style-type: none"> <li>Arrêté del 15 maggio 1992 sulle procedure di accesso, tempi di lavoro, evacuazione ed organizzazione del lavoro in ambiente iperbarico</li> <li>Arrêté del 28 gennaio 1991 sulle modalità di formazione alla sicurezza del personale che opera in ambiente iperbarico</li> <li>Decreto n° 45 dell'11 gennaio 2011, relativo alla protezione dei lavoratori che operano in ambiente iperbarico</li> <li>Decreto n° 90-277 del 28 marzo 1990, relativo alla protezione dei lavoratori che operano in ambiente iperbarico</li> </ul> |
| <b>Inghilterra</b> | <ul style="list-style-type: none"> <li>Work in compressed air regulations 1996</li> </ul>  |
| <b>Germania</b>    | <ul style="list-style-type: none"> <li>Technical Regulation for compressed air application, 1972</li> </ul>  |
| <b>Canada</b>      | <ul style="list-style-type: none"> <li>Z275.3-09 (R2014) – Occupational safety code for work in compressed air environments, 2014</li> </ul>   |
| <b>USA</b>         | <ul style="list-style-type: none"> <li>OSHA: Occupational Safety and Health Admin., Labor § 1926.803 (Compressed Air), 2003</li> <li>USACE: EM 385-1-1 - Underground Construction (Tunnels), Shafts and Caissons, Sec. 26.1, 2014</li> <li>NIOSH: Tunnel and Shaft Construction, Sec.23, 2009</li> <li>Pennsylvania: Department of Labor and Industry – Tunnels and Compressed Air, Sec. 34 § 43, 1998</li> </ul>  |

Rispetto alla normativa nazionale italiana (DPR n. 321 del 1956), queste norme internazionali definiscono in maniera più specifica tematiche inerenti alle condizioni di aria compressa. Le differenze riguardano i seguenti temi:

- Figure professionali specifiche per la supervisione dei lavori in condizioni iperbariche.
- Formazione ed addestramento del personale impiegato.
- Notifiche obbligatorie da effettuare prima dell'avvio dei lavori.
- Requisiti di camere di equilibrio e sistemi impiantistici per la compressione e decompressione.
- Requisiti degli impianti di sicurezza ed antincendio.
- Requisiti fisici e frequenza delle visite mediche degli operatori.
- Durata dell'attività lavorativa e della fase decompressiva.
- Sistema di ventilazione e qualità dell'aria necessaria all'applicazione della sovrappressione in camera di lavoro.

Si riporta in seguito una tabella che riassume e confronta le principali informazioni contenute nelle diverse norme internazionali.

Tabella 3: Tabella riassuntiva delle prescrizioni presenti nelle normative internazionali in materia di scavo iperbarico di gallerie.

| NORMATIVA                                       | INGLESE  | FRANCESE   | GERMANIA   | SVIZZERA   | MALESIA   |
|---|--|--|--|--|---|
| <b>Titolo normativa</b>                         | Work in compressed air regulations                     | Protezione dei lavoratori che operano in ambiente iperbarico | Technical regulation for compressed air application      | Ordinanza sulla sicurezza dei lavoratori nei lavori in condizioni di sovrappressione | Guidelines on occupational safety and health in tunnel construction |
| <b>Decreto</b>                                  | 1996   | n. 45 dell'11 gennaio 2011                                   | 1972   | 14 aprile 2016   | luglio 1998   |
| <b>Ente</b>                                     | Health and Safety Executive                            | Ministero del lavoro, dell'occupazione e della salute        | Ministero federale di giustizia e protezione consumatori | SUVA   | Dipartimento di sicurezza sul lavoro e salute                       |
| <b>Ambito di applicazione</b>                   | Lavori di costruzione in condizioni di sovrappressione | Attività con o senza immersione                              | Camera di lavoro in aria compressa                       | Lavori di costruzione e immersione in condizioni di sovrappressione                  | Costruzione gallerie  |
| <b>Obbligo di notifica</b>                      | 2 settimane prima                                      | /  | 2 settimane prima  | 4 settimane prima  | 1 settimana prima   |
| <b>Età lavorativa</b>                           | /  | 18 < 40 anni   | 18 < 50 anni   | > 18 anni (>50 lavorano il 50% del tempo)  | /   |
| <b>Formazione specifica</b>                     | si   | si   | si   | si   | si  |
| <b>Requisiti fisici</b>                         | si   | si   | si   | si   | si  |
| <b>Documentazioni e</b>                         | Libretto sanitario, Registro lavori                    | Fasciolo sanitario   | /  | Impieghi, Fascicolo sanitario,   | /   |
| <b>Assistenza medica</b>                        | si   | si   | si   | Si   | si  |
| <b>Presenza medico</b>                          | si   | si   | si   | si (con P>0,7 bar)   | si  |
| <b>Tecnico specifico</b>                        | si   | si   | si   | si   | si  |
| <b>Q aria /persona</b>                          | 18 m <sup>3</sup> /ora /persona                        | 60 m <sup>3</sup> /ora/persona                               | 30 m <sup>3</sup> /ora/persona                           | 30 m <sup>3</sup> /ora/persona   | 18 m <sup>3</sup> /ora/persona                                      |
| <b>T aria ambiente di lavoro</b>                | 21<27 C°   | /  | 10 < 25 C°   | /  | <29 C°  |
| <b>Concentrazione O2</b>                        | ≤ 23 %   | ≤ 25 %   | /  | ≤ 25 %   | /   |
| <b>Pressione lavoro massima</b>                 | ≤ 3,5 bar  | /  | ≤ 3,6 bar  | ≤ 3,6 bar  | ≤3,4 bar  |
| <b>Tempo permanenza</b>                         | 8 ore  | 6 ore (P>0,75bar)<br>8 ore (P<0,75bar)                       | 8 ore  | 8 ore  | 8 ore   |
| <b>Tempo di riposo dall'attività iperbarica</b> | 12 ore   | 12 ore   | 12 ore   | 12 ore   | 12ore (P>1 bar)   |
| <b>Giorni lavorativi settimanali</b>            | /  | /  | 5 gg   | 5 gg   | /   |



Tra le normative internazionali, le due più complete e dettagliate, che possono fungere da riferimento per la redazione di una normativa italiana, sono quella francese e quella inglese.

La francese si suddivide in quattro principali decreti in cui vengono definiti con dettaglio:

- Le attività di formazione del personale tramite percorsi distinti e definiti in funzione dell'attività svolta nell'ambiente pressurizzato con la previsione del rilascio di un certificato di idoneità al lavoro. (Decreto n. 45 dell'11 gennaio 2011)
- le procedure di compressione e decompressione, l'organizzazione del lavoro ed i tempi massimi di lavoro in ambiente iperbarico. (Arrêté del 15 maggio 1992)
- la classificazione dell'ambiente iperbarico in 4 classi, in funzione della pressione di esercizio, della qualità e quantità d'aria necessaria e dei livelli di pressione necessari per garantire le condizioni di sicurezza. (Decreto n. 45-2011)

La normativa britannica "A guide to the Work in Compressed Air Regulations" emanata dalla "The Health and safety executive" (HSE) nel 1996, regola la gestione dei rischi per la salute e la sicurezza delle imprese e dei lavoratori che operano nella costruzione di tunnel o altri lavori in aria compressa. Questo regolamento risulta essere quello più completo ed esaustivo in diversi argomenti e definisce con chiarezza i seguenti temi:

- Le figure professionali specializzate necessarie per una corretta e sicura gestione della tecnologia.
- I requisiti tecnici e di sicurezza degli impianti e delle attrezzature presenti in cantiere; oltre alle indicazioni sulla quantità e la qualità dell'aria da immettere all'interno della camera iperbarica.
- Le istruzioni sul corretto svolgimento della sorveglianza medica e della formazione dei dipendenti coinvolti in attività svolte in ambiente iperbarico.
- Le modalità di svolgimento delle procedure di compressione e decompressione.
- Le modalità di gestione delle emergenze.

Oltre alle normative nazionali dei Paesi precedentemente elencati (Tabella 3), vi sono delle linee guida internazionali come le "Linee guida per le buone pratiche di salute e sicurezza sul lavoro nella costruzione di gallerie" dell'International Tunnelling and Underground Space Association, le quali non intendono sostituire le normative o linee guida nazionali, ma vogliono fornire una guida sulle buone pratiche di base da rispettare.

Nel rapporto ITA n.001 (cap.14), vengono riportate tutte le nozioni relative allo scavo in aria compressa, in particolare quelle riferite ai requisiti medici, alle caratteristiche della camera di lavoro ed alle attrezzature necessarie. In special modo, rispetto alle normative precedentemente descritte, vengono riportate anche informazioni sui controlli geologici da effettuare durante lo scavo per la valutazione dell'eventuale presenza di terreni porosi che possono causare un'elevata dispersione dell'aria necessaria a mantenere la sovrappressione o di terreni argillosi preconsolidati che sotto l'effetto di un'eccessiva pressione possono insorgere in elevate distorsioni.

Per quanto riguarda gli standard tecnici per la realizzazione delle paratie a pressione, necessarie a mantenere la sovrappressione all'interno del tunnel, si può far riferimento alla normativa europea, più precisamente, allo standard europeo EN 12110 "Tunneling machines Air Lock: requisiti di sicurezza" redatto dal comitato europeo per la standardizzazione nel 2014. In questo documento vengono normati i vari componenti che costituiscono le paratie di chiusura (Airlock) e vengono fornite indicazioni sulle pressioni di progetto e di collaudo delle stesse con i relativi coefficienti di sicurezza.

#### **4. PROPOSTA DI BUONE PRATICHE DI INGEGNERIA E SICUREZZA DEGLI SCAVI PER LA PROGETTAZIONE E REALIZZAZIONE DI GALLERIE IN ATMOSFERA IPERBARICA**

L'unico riferimento normativo nazionale che disciplina il lavoro in ambiente iperbarico è il D.P.R n.321 del 20 marzo 1956, che fornisce prescrizioni relative all'uso di cassoni ad aria compressa, tecnologia decisamente diversa rispetto a quella dello scavo di gallerie in condizioni iperbariche. Inoltre, negli ultimi 60-70 anni l'evoluzione tecnologica ed organizzativa nella realizzazione di scavi sotterranei ha reso molte prescrizioni del D.P.R obsolete ed inapplicabili.

Per un'ideale e sicura gestione della tecnica di scavo di gallerie in condizioni ambientali iperbariche, occorre prestare particolare attenzione, sin dalla fase di progettazione, ai seguenti aspetti:

- Inquadramento geologico ed idrogeologico;
- Modalità di scavo;
- Calcolo dei livelli di sovrappressione;
- Scelta delle figure professionali necessarie alla corretta gestione della tecnologia in ambito di sicurezza;
- Dotazioni tecniche ed impiantistiche (camere di compensazione, impianti produzione e distribuzione aria compressa, requisiti dei mezzi d'opera, impianto elettrico, impianto antincendio, sistemi di monitoraggio della qualità dell'aria, ecc.);
- Procedure di ingresso e uscita dall'ambiente pressurizzato;
- Monitoraggio in corso d'opera;
- Organizzazione della comunicazione e del coordinamento riguardo gli aspetti di sicurezza;
- Procedure di emergenza e soccorso.

Tali tematiche sono oggetto di un'analisi dettagliata, illustrata nei paragrafi seguenti, effettuata a partire dalle informazioni e prescrizioni disponibili nella letteratura tecnico-scientifica e dalle normative e linee guida nazionali ed internazionali (cfr. paragrafo 3.3).

Per gli aspetti relativi alla sicurezza degli scavi in galleria si fa riferimento alle buone pratiche illustrate dalle 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 tra il 1998 ed il 2015. Queste sono state adottate, per la prima volta, nei cantieri per la realizzazione della Linea TAV Bologna – Firenze, e poi applicate anche per i progetti VAV (Variante Autostradale di Valico Bologna – Firenze), TCA (Terza Corsia Autostradale della A14) e Terzo Valico dei Giovi (linea TAV Genova – Milano). Ad oggi gli Standard di Sicurezza (NIR) sono applicati nella progettazione e realizzazione delle gallerie ferroviarie, autostradali, stradali e idrauliche di tutte le Regioni italiane.

Dal 2007 le NIR sono state oggetto di un processo di revisione ed aggiornamento, che ha portato alla redazione di 15 Linee Guida (Tabella 4), redatte dal gruppo di lavoro, a carattere nazionale, denominato “Grandi opere infrastrutturali” composto da tecnici e ingegneri delle AUSL provenienti da diverse Regioni e Province Autonome.

*Tabella 4: Tematiche affrontate dalle Linee Guida Nazionali, in grassetto sono evidenziate le Linee Guida che forniscono informazioni utili per la sicurezza di gallerie realizzate in ambiente iperbarico*

| <b>Linea guida</b> | <b>Titolo</b>   |
|--------------------|---|
| 1                  | Coordinamento della sicurezza nella realizzazione delle Grandi Opere  |
| 2                  | Requisiti igienico-sanitari e di sicurezza dei campi base realizzati per la costruzione di Grandi Opere Infrastrutturali  |
| 3                  | Scavi in sotterraneo con metodo a piena sezione e tecnica tradizionale in terreni grisutosi   |
| <b>4</b>           | <b>Sistema di Gestione delle Emergenze in cantieri per lo scavo di gallerie</b>   |
| <b>5</b>           | <b>Sicurezza antincendio nella realizzazione di gallerie</b>  |
| 6                  | Scavo meccanizzato di grande sezione con TBM-EPB in terreni grisutosi   |
| 7                  | Sicurezza della fase di scavo in gallerie realizzate con tecnica tradizionale   |
| <b>8</b>           | <b>Rischio di investimento. Rischio di elettrocuzione in presenza di linee aeree con conduttori nudi. Misure di sicurezza nei cantieri di grandi opere infrastrutturali</b> |
| <b>9</b>           | <b>Sistema di ventilazione premente in galleria. Controllo dei parametri di ventilazione</b>  |
| 10                 | Misure di sicurezza da adottare in occasione dell'abbattimento del diaframma  |
| 11                 | Fine lavori di scavo. Dotazioni ed impianti da mantenere in essere al termine dei lavori di scavo di gallerie   |
| 12                 | Interruzione e ripresa dei lavori in galleria   |
| <b>13</b>          | <b>Lavori a ridosso del fronte</b>  |
| 14                 | Utilizzo degli esplosivi nella realizzazione di gallerie  |
| 15                 | Sicurezza nell'uso delle casseforme rampanti  |

In un cantiere di scavo in atmosfera iperbarica le condizioni di massima sicurezza possono essere raggiunte adottando soluzioni progettuali e tecnico-organizzative che consentano di:

- Minimizzare le operazioni di accesso-uscita dalla camera di lavoro allo stretto necessario;
- Minimizzare il numero di mezzi e di personale operante all'interno del volume pressurizzato adottando tecniche e tecnologie alternative;

- Evitare di eseguire più lavorazioni contemporaneamente in aree di estensione limitata (fronte), in cui l'interazione tra le varie attività possono portare a situazioni di rischio;
- Garantire opportune vie di fuga per i lavoratori e di accesso per i soccorritori;
- Ridurre il tempo di esposizione dei lavoratori alle condizioni di pericolo;
- Prevedendo figure professionali specifiche per il controllo e la gestione delle operazioni ad altro rischio (fasi compressive-decompressive, monitoraggio dei livelli di pressione, operazioni di soccorso, ecc.).

Nei paragrafi seguenti si analizzeranno in maniera critica i principali aspetti realizzativi ed organizzativi dello scavo di gallerie in atmosfera iperbarica, individuando le principali problematiche riscontrabili in fase di realizzazione e fornendo soluzioni tecnico-organizzative rivolte a garantire condizioni di massima sicurezza.

#### **4.1 CARATTERIZZAZIONE DEI TERRENI E DEGLI ACQUIFERI**

Nella realizzazione di gallerie, specialmente attraverso l'utilizzo di aria compressa, risulta di primaria importanza effettuare specifiche indagini preliminari di carattere geologico-idrogeologico, atte a determinare le caratteristiche e le proprietà dei terreni e degli acquiferi attraversati dal tracciato dell'opera.

I parametri indispensabili da valutare sono:

- Stratigrafia, proprietà e permeabilità all'aria dei terreni;
- Tipologia, soggiacenza e condizioni idrauliche degli acquiferi.

##### **4.1.1 Indagini Geologiche e caratterizzazione dei terreni**

La Relazione Geologica deve definire, con preciso riferimento al progetto, i lineamenti geomorfologici della zona interessata, la successione litostratigrafica locale, specificando la natura e la disposizione spaziale dei vari litotipi, oltre che il loro stato di fratturazione e la loro degradabilità. Gli accertamenti devono anche porre attenzione ai rischi di natura ambientale che si possono incontrare nello scavo in sotterraneo, come la presenza di gas tossici, gas esplosivi o la presenza di minerali nocivi.

Questo modello funge da riferimento per il progettista geotecnico e strutturista per inquadrare eventuali problematiche da approfondire con le indagini specifiche da svolgere successivamente.

Per modello geotecnico si intende uno schema rappresentativo del volume di terreno interessato dalla costruzione dell'opera, opportunamente suddiviso in zone omogenee sotto il profilo fisico-meccanico con la definizione dei valori dei parametri geotecnici e la valutazione del regime delle pressioni interstiziali considerando la loro variabilità sia spaziale che temporale. Sulla base delle caratteristiche del modello geotecnico, il progettista deve anche valutare gli effetti indotti dagli scavi nel contorno della cavità ed in superficie, scegliendo e dimensionando poi l'opportuna tecnica di scavo e gli eventuali interventi di miglioramento e di rinforzo del terreno.

Nello scavo in sotterraneo in atmosfera iperbarica risulta di primaria importanza la valutazione della permeabilità all'aria di ogni tipologia di terreno presente, poiché principalmente da essa dipende l'entità delle perdite di pressurizzazione dal volume di scavo.

Questo parametro è rappresentato dal coefficiente  $K_a$ , espresso in  $m^2$ , ed indica la portata d'aria attraverso i pori presenti all'interno del suolo generata dall'applicazione di un gradiente di pressione. Questo portata, calcolata utilizzando la legge di Darcy, è direttamente proporzionale al gradiente di pressione tra il punto di ingresso ed il punto di uscita ed inversamente proporzionale alla lunghezza del percorso tra due punti.

Il valore di  $K_a$  può essere definito sia per via sperimentale ricavandolo in funzione della permeabilità all'acqua  $K_w$  determinata tramite prove in situ (Lefranc o Lugeon), sia in laboratorio con test specifici di permeabilità all'aria effettuati su campioni indisturbati.

Nell'approccio sperimentale l'andamento del rapporto  $K_a/K_w$  in funzione della temperatura del fluido (che ne influenza la viscosità) è stato determinato sperimentalmente da Javadi (Javadi & Snee, 1999).

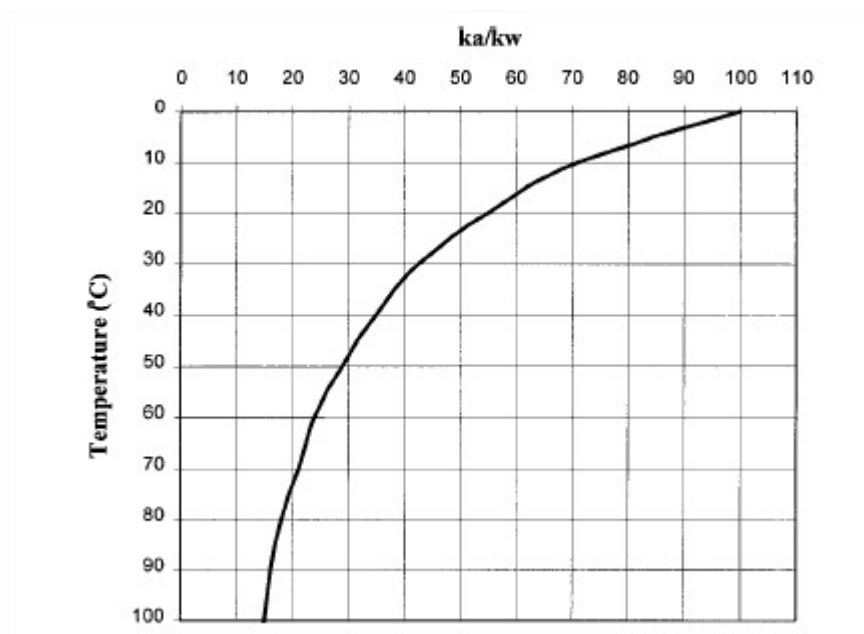


Figura 4-1: Variazione del rapporto tra la permeabilità all'aria e la permeabilità all'acqua in funzione della temperatura. (Javadi, Farmani, Toropov, & Snee, 1999)

Le prove di laboratorio specifiche utilizzate per la valutazione diretta di  $K_a$  sono principalmente due (Grant, 2006):

1. Metodo del gradiente a pressione costante;
2. Metodo a flusso costante.

Entrambi i metodi consistono nel sottoporre un campione di terreno, posto in un volume definito (anello cilindrico) all'applicazione di un volume d'aria ad una pressione maggiore di quella atmosferica, successivamente si passa alla misurazione della portata  $Q$  di aria che attraversa il campione in un intervallo di tempo (metodo del gradiente di pressione), oppure della differenza di pressione (metodo a flusso costante).

$$1. \frac{Q}{A} = k_a \frac{\rho_w g}{\mu} \frac{\Delta h}{L} \quad (\text{metodo del gradiente})$$

$$2. \frac{Q}{A} = k_a \frac{\rho_w g}{\mu} \frac{\Delta h}{L} \left[1 - \frac{\Delta h}{2h_i}\right] \quad (\text{metodo a flusso costante})$$

Con:  $K_a$  permeabilità all'aria del terreno;  $\rho_w$  peso specifico dell'acqua;  $\mu$  viscosità dell'acqua;  $g$  accelerazione di gravità;  $L$  distanza tra due punti a differente pressione;  $\Delta h$  gradiente di pressione.

Il metodo a flusso costante ha un maggior campo di applicabilità, poiché può essere utilizzato anche per materiali a bassa permeabilità sia in condizioni di flusso transitorio che stazionario.

#### 4.1.2 Idrogeologia

Nessun progetto di un'opera civile che interagisce, intenzionalmente o meno, con le acque sotterranee può prescindere da un adeguato studio idrogeologico il quale si occupa della ricostruzione delle modalità di circolazione delle acque nel sottosuolo, della valutazione della geometria degli acquiferi e della caratterizzazione a livello chimico-fisico delle acque sotterranee. Nella redazione del modello idrogeologico occorre attribuire ai terreni le relative caratteristiche idrauliche, considerando l'influenza dell'assetto stratigrafico e delle strutture tettoniche sui flussi di falda.

Lo studio idrogeologico ha come scopo principale la ricostruzione della superficie piezometrica di falda e delle sue fluttuazioni, oltre alla classificazione della tipologia di falda (artesiane o freatiche). Le indagini idrogeologiche preliminari richiedono l'installazione di una rete di piezometri, disposti in prossimità del tracciato della galleria, ponendo particolare attenzione alla loro dislocazione e prevedendo una densità maggiore nel tratto scavato in iperbarico. Tale rete deve essere utilizzata non solo in fase di indagini preliminari, ma anche per il monitoraggio della falda durante e al termine della fase di scavo. Nelle indagini preliminari viene utilizzata per un'accurata ricostruzione del livello di soggiacenza che risulta essere il parametro primario nella valutazione del livello di sovrappressione d'aria necessario allo scavo in condizioni di sicurezza. Durante la fase di scavo, la rete viene utilizzata per il monitoraggio e l'individuazione delle fluttuazioni del livello di falda al fine di garantire una corretta gestione delle sovrappressioni nel cantiere iperbarico.

#### 4.2 MODALITÀ DI SCAVO

La scelta della modalità di scavo influisce sia sulle condizioni di sicurezza che di avanzamento che si hanno nella realizzazione dell'opera. Non è possibile delineare a priori quale sia la tecnica migliore in assoluto da utilizzare in specifiche condizioni, poiché la sua scelta dipende dalle condizioni ambientali (caratteristiche terreno e livello di falda) e realizzative (dotazioni impiantistiche) che risultano essere diverse in ogni singolo progetto.

Le principali sequenze operative di scavo sono le seguenti:

- **Scavo a sezione parzializzata:** viene prima scavato, in condizioni atmosferiche, il volume di terreno posto sopra il livello di falda e successivamente, dopo aver



pressurizzato l'intera lunghezza della galleria, si procede al ribasso dello scavo fino alla quota di fondo (Figura 4-2: Schematizzazione delle pressioni utilizzate nelle .Caso 1). Se il livello di falda è troppo elevato (Figura 4-2.Caso 2) per consentire lo scavo sopra falda in condizioni atmosferiche, è possibile scavare in atmosfera iperbarica modulando la sovrappressione ad un valore più basso per il tratto in calotta e più alto nelle parti inferiori del volume di scavo (strozzo e piedritti);

- **Scavo a piena sezione:** (Figura 4-2.Caso 3) l'intera sezione trasversale della galleria, sopra e sotto il livello di falda, viene scavata applicando la massima sovrappressione richiesta.



Figura 4-2: Schematizzazione delle pressioni utilizzate nelle modalità di scavo a sezione piena (Caso 3) e parzializzata (Caso 1-2).

Nei progetti realizzati in atmosfera iperbarica descritti nel capitolo 3.1 (Audi tunnel, Emmequerung tunnel) si è optato per l'avanzamento a sezione parzializzata, scavando prima il volume di terreno posto sopra falda in condizioni atmosferiche e poi, una volta pressurizzato l'intero volume, con il ribasso fino alla quota di fondo scavo. L'uso di questa modalità:

- È applicabile se le oscillazioni del livello di falda non sono tali da invadere il tratto scavato in condizioni normobariche;
- Limita la durata dell'esposizione dei lavoratori ai valori massimi di sovrappressione previsti, riducendo così il livello di rischio;
- Riduce la possibilità, o quanto meno si ridimensiona, la portata di possibili crolli di materiale dal fronte di scavo poiché l'intera area del fronte viene scavata in due fasi successive. Questa instabilità del fronte dipende principalmente dalle caratteristiche di coesione del materiale da scavare e dalla sua saturazione;
- Può rendere necessario effettuare interventi provvisori per garantire le condizioni di stabilità delle pareti oppure interventi di impermeabilizzazione sempre

provvisori prima della posa del rivestimento definitivo, il quale può essere realizzato solo dopo lo scavo dell'intera sezione

Al contrario, utilizzando la configurazione di avanzamento a piena sezione totalmente in condizioni di sovrappressione, è possibile raggiungere maggiori velocità di avanzamento dello scavo grazie alla possibilità di svolgere le lavorazioni previste (Pressurizzazione, scavo, impermeabilizzazione, posa del rivestimento definitivo) in maniera continuativa e contemporanea lungo tutta la lunghezza della galleria, senza aver la necessità di alternare condizioni atmosferiche normali ed iperbariche come nel caso di sezione parzializzata.

Un altro possibile approccio è quello di effettuare una fasizzazione dello scavo in senso longitudinale, suddividendo la galleria in vari compartimenti “stagni” tramite la realizzazione di diaframmi trasversali.

In tal modo è possibile:

- trattare differentemente i vari tipi di terreno incontrati in funzione delle loro caratteristiche geotecniche e dei livelli di falda ricadenti nel singolo compartimento;
- limitare le perdite d'aria in avanzamento;
- garantire un maggior controllo sui livelli di falda e sulla variabilità dei livelli di pressione in ogni compartimento;
- ridurre il rischio di allagamento poiché la superficie, non ancora rivestita, attraverso cui può avvenire l'ingresso dell'acqua di falda risulta è limitata rispetto al caso della sezione parzializzata.
- modulare la lunghezza dei compartimenti in maniera tale da omogenizzare la portata d'aria da fornire.

Questa soluzione introduce la fase di abbattimento del diaframma trasversale, per a mettere in comunicazione i compartimenti adiacenti e proseguire così l'avanzamento della galleria. Le operazioni di abbattimento e di movimentazione del diaframma aggiungono un possibile fattore di rischio per la salute e la sicurezza dei lavoratori oltre che un maggior costo economico per la loro realizzazione e la successiva demolizione.

#### **4.3 FIGURE PROFESSIONALI SPECIALISTICHE**

Per garantire condizioni di massima sicurezza durante le attività di scavo in condizioni iperbariche, il personale deve essere adeguatamente selezionato, informato e addestrato.

Inoltre, devono essere presenti in cantiere operatori specializzati per la gestione degli accessi in camera di scavo, per la supervisione delle operazioni di compressione e decompressione.

Con riferimento alla normativa britannica, le figure specialistiche sono:

- **Manager delle Operazioni Iperbariche (MOD):** questa figura è opportunamente scelta dall'appaltatore in funzione della sua esperienza pratica e della sua formazione nei lavori ad aria compressa. Il suo incarico è quello di supervisionare l'attività ad aria compressa, controllando e garantendo che siano rispettati i requisiti e le procedure operative progettuali; è suo compito anche gestire la situazione di emergenza mettendo in pratica le procedure di emergenza contenute nel manuale di sicurezza iperbarica;
- **Medico specialista di Medicina Iperbarica (MI):** è responsabile di tutto quello che riguarda la gestione medico-sanitaria dell'attività iperbarica. Deve essere presente durante lo svolgimento delle attività e deve intervenire, effettuando le operazioni di primo soccorso, in caso di incidenti;
- **Infermiere esperto in Medicina Iperbarica (IMI):** supporta nelle attività il Medico Iperbarico e può essere delegato dallo stesso a svolgere attività di primo soccorso.
- **Responsabile dell'Intervento Iperbarico (RII):** è il responsabile delle attività in galleria con pressione d'aria che dirige gli operatori specializzati nelle attività; deve essere dotato di un'adeguata preparazione ed esperienza;
- **Operatore Tecnico Iperbarico (OTI):** un tecnico specializzato nell'uso e gestione dei dispositivi delle camere iperbariche;
- **Operai Specializzati per lavorazioni in ambiente Iperbarico (OSD):** maestranza fornita di adeguate capacità psico-fisiche e formata per l'ingresso in atmosfera iperbarica tramite opportuni corsi di formazione ed addestramento;
- **Tecnici impiantistici:** idonei ad un'attenta manutenzione dell'impianto di fornitura dell'aria compressa e un celere intervento in caso di malfunzionamento.

La formazione del personale deve avvenire tramite corsi di formazione specialistici, sia teorici che pratici, in cui verranno fornite informazioni riguardo:

- Ruolo di tutti gli operatori coinvolti nelle attività;
- Macchinari utilizzati nelle lavorazioni;

- Motivo dell'utilizzo dell'aria compressa;
- Rischi connessi al lavoro in ambiente iperbarico;
- Precauzioni da adottare in caso di lavorazioni a rischio;
- Procedure di compressione e decompressione;
- Effetti della temperatura in ambiente iperbarico;
- Sintomi, prevenzione e comportamento da adottare in caso di malattie barotraumatiche.

Le attività di formazione del personale, così come le procedure per il rilascio del certificato di idoneità al lavoro in ambiente iperbarico sono ben descritte nel Decreto n°45 dell'11 gennaio 2011 della normativa francese.(Travail, Et, & Santé, 2011)

#### 4.4 DOTAZIONI IMPIANTISTICHE

Nei cantieri per lo scavo di gallerie in atmosfera iperbarica sono necessarie specifiche dotazioni impiantistiche, indispensabili per pressurizzare il cantiere sotterraneo, regolare i livelli di sovrappressione, gestire gli accessi al cantiere e garantire condizioni di massima sicurezza durante la realizzazione dell'opera.

I principali componenti dell'allestimento di un cantiere in atmosfera iperbarica sono:

- Camere di compensazione per il personale, per i mezzi d'opera e per il materiale scavato;
- Sistema di ventilazione e di trattamento dell'aria interna;
- Sistema di produzione dell'aria compressa necessaria alla pressurizzazione sia della camera di lavoro che della camera di ricompressione terapeutica;
- Sistema di monitoraggio sia della qualità dell'aria che dei livelli di pressione interni alla camera di lavoro;
- Impianto elettrico (relativo alla camera di lavoro e di compensazione);
- Sistemi di allarme e di comunicazione con l'esterno.

Sistemi ed impianti devono essere opportunamente scelti e dimensionati in relazione alle specifiche condizioni ambientali (geologiche ed idrogeologiche) ed alle soluzioni progettuali ed organizzative adottate per la realizzazione dell'opera.

#### 4.4.1 Camere di compensazione

Le camere di compensazione, oltre alla divisione tra ambiente atmosferico ed iperbarico, consentono di effettuare i processi di compressione e decompressione necessari per l'ingresso e l'uscita dalla camera di lavoro.

Occorre prevedere la disposizione di camere separate per l'ingresso del personale, dei mezzi d'opera e per il trasporto all'esterno del materiale di risulta dello scavo.

La camera più influente sulle condizioni di sicurezza è sicuramente quella relativa al personale che deve essere dimensionata in funzione del:

- Numero massimo di manodopera presente per ogni turno di lavoro, considerando il numero di squadre presenti e la durata del turno di lavoro;
- Numero di personale qualificato presente in camera di lavoro (ingegneri, responsabili sicurezza, topografi, geometri ecc.);
- Numero dei componenti delle squadre di soccorso medico ed antincendio.

Come specificato nella norma UNI EN 12110:2014, "Macchine per scavo meccanizzato di gallerie. Zone di pressione. Requisiti di sicurezza" tali camere devono essere equipaggiate con tutte le attrezzature necessarie ad effettuare in sicurezza il processo di compressione/decompressione come l'illuminazione, sistemi di comunicazione, sistema antincendio ad acqua pressurizzata, sistema d'emergenza per decompressione con ossigeno, oblò, sistemi di monitoraggio, ecc.

È preferibile posizionare la camera per il personale ad una quota rialzata rispetto alla quota di fondo scavo in modo tale da evitare problemi di accesso in caso di allagamento della camera di lavoro. (British Tunnelling Society, 2012; paragrafo 136)

Inoltre, è necessario fornirsi di almeno due camere di compensazione per il personale in maniera tale da avere un doppio accesso-uscita in caso di emergenza e velocizzare così le operazioni di soccorso ed evacuazione.

#### 4.4.2 Calcolo portata d'aria necessaria ed impianto di ventilazione

Il valore della pressione da applicare all'interno del cantiere sotterraneo deve essere quantomeno pari al corrispondente valore di pressione idrostatica generata dall'acqua di falda sul piano di fondo scavo. Inoltre, deve essere opportunamente adeguato con l'avanzamento dello scavo ed al variare dei livelli piezometrici.

Nel calcolo della portata d'aria necessaria a mantenere i valori di sovrappressione desiderati ed a garantire condizioni di salubrità e benessere termo-igrometrico ai lavoratori presenti nel cantiere iperbarico, devono essere considerati i seguenti contributi:

- Portata d'aria fresca necessaria a garantire il ricambio dell'aria esausta, contenente gas tossico-nocivi e concentrazioni di ossigeno più basse, ad ogni lavoratore;
- Portata d'aria per il corretto funzionamento dei mezzi d'opera;
- Portata d'aria necessaria a garantire idonee a garantire una velocità dell'aria in galleria di almeno 0.3 m/s (ITA n°001-7.4.1);
- Perdite d'aria attraverso il contorno dello scavo (diaframmi laterali, solettone, fronte);
- Perdite d'aria dovute alle procedure di ingresso ed uscita dei materiali, dei mezzi e dei lavoratori;

La portata d'aria necessaria ad ogni lavoratore deve essere determinata a partire dai valori minimi indicati dalle norme di riferimento (che variano da 18 a 90 normo m<sup>3</sup>/ora/persona, Tabella 3), incrementati in relazione alle condizioni ambientali in camera di lavoro, per garantire una corretta diluizione degli inquinanti e delle polveri e valori di temperatura, umidità ed ossigenazione (cfr. paragrafo 4.4.6) entro le soglie stabilite dalle norme vigenti.

Sebbene nelle gallerie in ambiente iperbarico vengano solitamente utilizzati mezzi ad alimentazione elettrica, come spiegato nel (4.4.4), e quindi si riducano le sorgenti di sostanze inquinanti, è comunque necessario regolare la temperatura dell'aria in camera di lavoro, sia per garantire condizioni termo igrometriche adeguate ai lavoratori che per evitare il surriscaldamento delle componenti dei mezzi d'opera (pacchi batteria, motori ecc.) con conseguente riduzione di efficienza.

Il sistema di ventilazione può essere di tipo:

- **Premente:**(Figura 4-3.a) in cui l'aria fresca prelevata dall'esterno viene pressurizzata e immessa in prossimità del fronte tramite un condotto (solitamente di tipo floscio). Quest'aria ripercorre la galleria in senso inverso diluendo la concentrazione degli inquinanti aerodispersi e trasportandoli verso la struttura che ospita le camere di compensazione, all'ingresso della galleria;

- **Aspirante:** (Figura 4-3.b) tramite la depressione prodotta da un ventilatore aspirante in prossimità del fronte fa sì che venga richiamata all'interno, aria salubre dall'esterno.
- **Misto:** sistema che utilizza sia la modalità aspirante che quella premente.

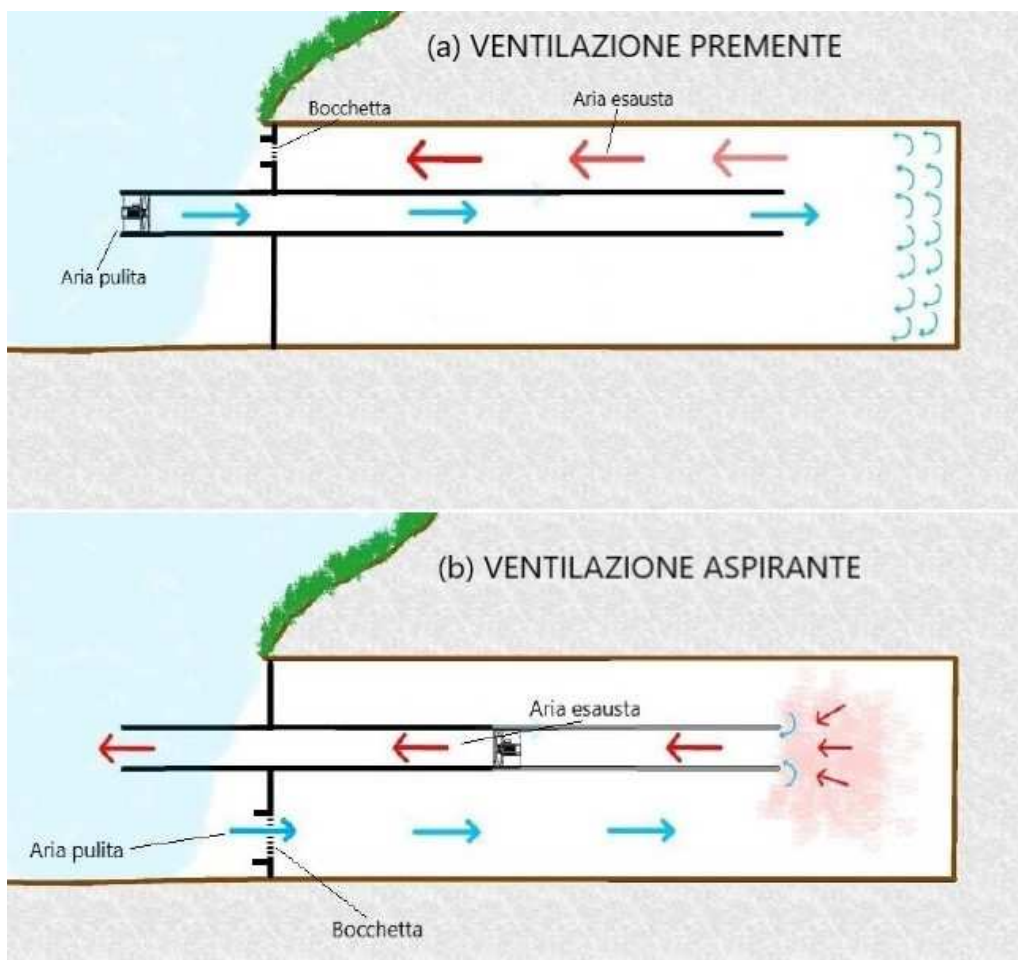


Figura 4-3: Principio di funzionamento della ventilazione premente ed aspirante

La scelta del sistema di ventilazione deve essere effettuata dal progettista in funzione del metodo di realizzazione dell'opera, delle condizioni locali e della valutazione dei rischi. L'argomento della ventilazione in galleria è analizzato dalla Linea Guida n°9, in cui vengono riportate le informazioni necessarie per la progettazione e il dimensionamento del sistema, le modalità di misurazione e di registrazione dei valori di portata nel circuito e le modalità di misurazione puntuale della velocità di riflusso all'interno della galleria. Inoltre, il rapporto ITA\_n°001-Art. 7.1.4 (*ITA Working Group n° 5 Health & Safety*, 2015) indica che la portata d'aria fornita dall'impianto di ventilazione deve garantire una velocità di flusso medio nella sezione di scavo della galleria compresa tra 0.3 m/s e 2 m/s. Infine, occorre individuare le variazioni di sezione e la presenza di attrezzature ed ostacoli

fissi o mobili lungo la galleria, che possono creare zone d'ombra della ventilazione e favorire l'accumulo di sostanze nocive, ed eseguire, in corso d'opera, misure di velocità puntuali e con periodicità definita.

Per mantenere il valore di sovrappressione calcolato a partire dal livello piezometrico occorre supplire alle perdite d'aria attraverso il terreno ed i diaframmi. È essenziale stimare le perdite per un corretto dimensionamento del sistema di generazione e distribuzione dell'aria compressa.

In letteratura non esistono formule matematiche per il calcolo delle perdite d'aria, si ricorre quindi all'uso di metodi empirici o semi-empirici (Tabella 5).

Tabella 5: Principali metodi empirici disponibili in letteratura per la stima delle perdite d'aria dalla galleria in condizioni di sovrappressione

| Autori                                  | Formula  |
|---|--|
| Krabbe (1968)                           | $Q = 2K_w 70 \frac{(P_1 - P_2)}{\gamma_w} F \frac{P_1}{P_2} (n_a + n_b + n_c)$ |
| Schenk and Wagner (semplificata) (1963) | $Q = \frac{wk_a}{\gamma_w} \frac{(P_1 - P_2)}{L} A \frac{P_1}{P_2}$            |
| Hewett and Johannesson (1922)           | $Q = 3.7 D^2 \div 7.2 D^2 (m^2)$   |

I principali fattori considerati da tali metodi sono:

- la permeabilità all'aria del terreno ( $K_a$ , anche espressa in funzione di  $K_w$ );
- il gradiente di pressione tra due punti ( $P_1-P_2$ );
- il percorso dell'aria, attraverso il terreno, dalla calotta fino in superficie ( $L$ );
- il diametro della galleria ( $D$ );
- la superficie del fronte di scavo ( $F$  o  $A$ );
- $w$  è un fattore correttivo (solitamente pari a 2);
- $\gamma_w$  peso specifico dell'acqua;
- $n_a, n_b, n_c$  fattori che variano in funzione della tipologia di terreno e di scavo.

Pertanto, risultano appropriati per effettuare una stima iniziale delle perdite d'aria, poiché non consentono di tener conto della stratigrafia (lungo il tracciato dell'opera e nello strato di copertura) e della velocità di avanzamento dello scavo (Snee & Javadi, 1996), che comporta un aumento della superficie disperdente.



Inoltre, nessuno dei metodi considera la permeabilità all'aria del calcestruzzo che costituisce lo scatolare nel caso di utilizzo del metodo Milano, nonché delle possibili perdite localizzate nei punti di giunzione tra i diaframmi ed il solettone.

In generale, le perdite d'aria possono essere suddivise in tre contributi:

1. **Q fronte:** Perdite d'aria che avvengono al fronte della galleria. Dipendono essenzialmente dalle caratteristiche di permeabilità all'aria del terreno, dalla dimensione del fronte e dal livello di sovrappressione interno. Infatti, le perdite d'aria sono direttamente proporzionali all'aumento della sovrappressione.
2. **Q parete:** Perdite d'aria dalle pareti perimetrali della galleria. I punti più soggetti a fughe di aria si localizzano nelle giunzioni tra i pannelli primari e secondari che costituiscono i diaframmi verticali, nelle riprese di getto, nei giunti di dilatazione del solettone di copertura e nelle connessioni tra la soletta di copertura e i diaframmi (Figura 4-4). Nella realizzazione di tali elementi, occorrerà quindi prevedere opportuni sistemi di impermeabilizzazione (cfr. paragrafo 2.1.2).
3. **Q altro:** possibili perdite derivanti dalle procedure di ingresso e uscita nelle varie camere di compensazione per personale, mezzi e materiali. Derivano principalmente da possibili imperfezioni costruttive dei sistemi di tenuta stagna dei portali. Dipendono dalle dimensioni e dalla frequenza d'uso dei portali e dal livello di pressurizzazione interno. Ulteriori fughe d'aria possono essere dovute al sistema di ventilazione forzata.

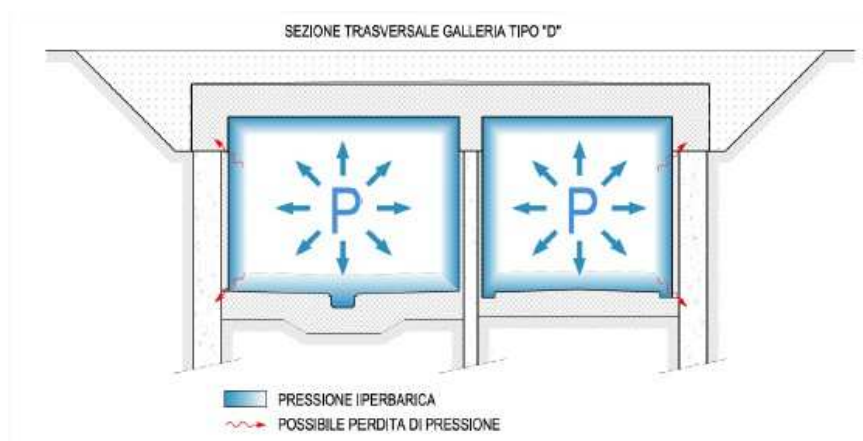


Figura 4-4: Possibili punti di fuoriuscita d'aria pressurizzata dallo scatolare in calcestruzzo armato.

La permeabilità all'aria del terreno è influenzata dal grado di saturazione, poiché l'acqua all'interno dei pori si contrappone al naturale deflusso d'aria verso l'esterno. Il ruolo della

saturazione  $S$  nell'effettiva permeabilità del suolo può essere desunto da Yoshimi e Ostergerg (1963):

$$K_a = b(e(1 - S_r)^a) \frac{\gamma}{\mu}$$

con:  $a$  e  $b$  costanti;  $\gamma$  peso specifico dell'aria;  $\mu$  viscosità dinamica dell'aria;  $S_r$  saturazione residua.

Conseguentemente, le perdite dalla superficie di fondo scavo sono nulle ( $S_r = 1$ ).

In generale, l'approccio da adottare per il calcolo delle perdite deve essere determinato, per ogni progetto di scavo di gallerie, in relazione alle metodologie costruttive, le condizioni geologiche ed idrologiche.

#### 4.4.3 Impianto di produzione e di distribuzione dell'aria compressa

L'aria compressa, necessaria a generare condizioni iperbariche in camera di lavoro e nelle camere di compensazione, può essere di due tipi:

- Aria naturale pressurizzata: prodotta comprimendo aria atmosferica, preventivamente trattata in modo da rispettare gli standard di respirabilità indicati dalle normative di riferimento;
- Aria sintetica: prodotta miscelando azoto ed ossigeno puri in concentrazioni rispettivamente pari al 79% e al 21% per riprodurre la composizione atmosferica. Garantisce una migliore qualità dell'aria nell'ambiente di lavoro poiché priva di impurità ed umidità.

La qualità dell'aria pressurizzata generata dipende anche dalla tipologia di compressore utilizzato. Nei cantieri iperbarici è preferibile utilizzare compressori oil-free, poiché non rilasciano idrocarburi nell'aria compressa generata. L'aria immessa nelle aree di lavoro e nelle camere di compensazione, anche se di buona qualità, subisce un rapido deterioramento delle sue caratteristiche (temperatura, umidità, purezza) che viene causato sia dall'azione meccanica di compressione sia dalle impurità rilasciate dal personale e dai mezzi d'opera. Si necessita così di un sistema di trattamento dell'aria capace di filtrare le impurità e di condizionarne la temperatura in modo da garantire un'ambiente confortevole di lavoro.

Per garantire condizioni di massima sicurezza per i lavoratori, nonché la realizzazione dell'opera nei tempi e costi previsti, il sistema di produzione e distribuzione dell'aria compressa deve essere:

- opportunamente dimensionato in relazione alle sovrappressioni da generare in camera di lavoro ed alle portate calcolate (cfr. paragrafo 4.4.2);
- in grado di mantenere la sovrappressione calcolata all'interno della camera di lavoro, anche a fronte di eventuali variazioni dei livelli piezometrici e malfunzionamenti dei generatori o dell'impianto di distribuzione.

A tal proposito, la massima portata d'aria necessaria, sovradimensionata del 50% come indicato nel report ITA n°001, art 14.3.2 (*ITA Working Group n ° 5 Health & Safety, 2015*), deve essere generata da due o più compressori più un ulteriore di riserva. In tal modo si riduce drasticamente il rischio di un fermo completo dell'impianto e si possono gestire in maniera più efficace interventi di manutenzione e malfunzionamenti dei compressori in esercizio.

Per quanto riguarda la scelta della percentuale di sovradimensionamento dell'impianto, l'unico riferimento presente nelle normative disponibili è contenuto nel rapporto ITA n°001, art 14.3.2, il quale indica di aumentare la capacità dell'impianto di ventilazione di almeno il 50 % rispetto al valore standard di flusso.

Qualora i compressori siano elettrici è necessario prevedere l'installazione di un gruppo elettrogeno di emergenza, in grado di alimentare tutti i componenti dell'impianto di aria compressa per il tempo necessario ad un'eventuale evacuazione della camera di lavoro.

L'impianto di distribuzione dell'aria compressa all'interno del cantiere deve essere realizzato con tubazioni in acciaio inox o rame (non in materiale ferroso, soggetto a corrosione con la possibilità di contaminare l'aria immessa, né plastico, poiché il flusso d'aria ad elevata pressione e velocità può generare cariche elettrostatiche, esponendo così i lavoratori ad un rischio di tipo elettrico).(*British Tunnelling Society, 2012*).

#### **4.4.4 Requisiti dei mezzi d'opera**

La tipologia dei mezzi d'opera utilizzati per le lavorazioni previste influisce sia sulle condizioni di sicurezza (rischio di incendio ed esplosione) sia sulla qualità dell'aria. L'utilizzo e l'accesso di mezzi a combustione interna alimentati da combustibili ad alta tensione di vapore (benzina, metano, gpl) nei cantieri sotterranei viene vietato

nell'allegato I del D.P.R n 459 del 1996 (direttiva "Macchine"). Nel caso di scavo in condizioni iperbariche è preferibile utilizzare mezzi ed attrezzature ad alimentazione elettrica (a cavo o a batteria) o pneumatica, per limitare il peggioramento della qualità dell'aria e ridurre il rischio d'incendio / esplosione.

#### 4.4.5 Impianto elettrico

Ai sensi dell'articolo 4 del DPR 320/56, gli ambienti di lavoro all'interno della galleria, sono considerati "ambienti bagnati". Infatti, anche nel caso di utilizzo di sistemi di impermeabilizzazione (membrane, congelamento, jet grouting) o di allontanamento dell'acqua di falda (aria compressa, wellpoint), vi è comunque la possibilità di venute d'acqua all'interno del volume di scavo. Da queste premesse discende la necessità di prendere tutte le precauzioni dettate dalle norme CEI riguardanti gli impianti e i dispositivi con funzionamento elettrico nei luoghi bagnati. Ulteriori misure specifiche, necessarie ad evitare il rischio di esplosioni, devono essere considerate nel caso in cui il tracciato dell'opera attraversi terreni grisutosi.

In assenza di indicazioni specifiche, nel quadro normativo italiano, relativamente agli impianti elettrici, si ritiene opportuno adottare le seguenti disposizioni, estrapolate da normative e linee guida sia nazionali che internazionali (principalmente la normativa inglese), quali buone pratiche per l'installazione e l'utilizzo in condizioni di sicurezza di tali impianti nella camera di lavoro:

- Utilizzo di idonei sistemi di sostegno e di connessione per fissare i cavi elettrici e le attrezzature alle pareti di scavo in maniera tale da non intralciare il passaggio dei mezzi e lo svolgimento delle attività lavorative (D.P.R. n.321/1956);
- Le apparecchiature elettriche utilizzate nella camera di lavoro devono essere protette dall'ingresso di polvere e acqua almeno con un livello IP55 secondo EN 60529. (British Tunnelling Society, 2012);
- Utilizzare quadri elettrici e trasformatori a vuoto o ad aria, evitando quelli a bagno d'olio che possono indurre un maggior rischio d'incendio all'interno della galleria. ( *ITA Working Group Health and Safety in Works*, 2008 - 12.4.4);
- Le installazioni elettriche presenti non devono essere influenzate dalla pressione di esercizio della galleria e devono essere impermeabili, protette dalla polvere e dalle esplosioni ( *ITA Working Group Health and Safety in Works*, 2008 - 14.3.4);

- Le camere di lavoro devono essere mantenute pulite e prive da materiali di risulta combustibili. (British Tunnelling Society, 2012);
- In caso di interruzione di corrente, l'illuminazione di emergenza dovrebbe attivarsi automaticamente attraverso gruppi elettrogeni (diesel) ubicati all'esterno della camera di lavoro. (*ITA Working Group Health and Safety in Works*, 2008 14.3.5);
- L'alimentazione elettrica di emergenza deve essere in grado di garantire la continuità del funzionamento dei principali sistemi (compressori, ventilazione, impianto antincendio, sistemi di monitoraggio) per il mantenimento delle condizioni di sicurezza (British Tunnelling Society, 2012);
- L'impianto deve essere verificato prima della messa in esercizio (D.P.R. n 462 del 22 ottobre 2001);
- È consigliabile utilizzare, per l'illuminazione in galleria, plafoniere di tipo neon o fari LED a luce "fredda", poiché generano una minore quantità di calore a parità di luminosità prodotta rispetto ai sistemi alogeni, favorendo il mantenimento delle condizioni ottimali di temperatura nell'ambiente di lavoro.

Un'ulteriore particolare attenzione è da porre alla realizzazione ed all'installazione dell'impianto elettrico relativo alla camera di compensazione necessaria per le procedure di ingresso e uscita dei lavoratori. L'unico riferimento tecnico nazionale è una linea guida Inail (*La gestione in sicurezza delle camere iperbariche multiposto in ambiente clinico, Inail*) riguardante la gestione in sicurezza delle camere di compensazione multiposto, che ha come campo di applicazione i trattamenti in ambiente sanitario o clinico (non è quindi direttamente applicabile ai cantieri di scavo in sotterraneo). Tuttavia, (punto 7.1), dalla linea guida si possono adottare alcune prescrizioni di carattere generale a supporto della progettazione degli impianti elettrici, di illuminazione e del sistema antincendio, quali:

- L'impianto elettrico deve essere realizzato secondo le specifiche norme CEI, in particolare la 64-2 riguardante impianti elettrici nei luoghi con pericolo di esplosione;
- Occorre garantire una buona accessibilità ai componenti elettrici in modo da non intralciare le operazioni di manutenzione ed i possibili interventi in situazioni di emergenza;

- Valutare la presenza di componenti, attività o altri servizi nei pressi della camera iperbarica che possono determinare effetti nocivi sull'effettivo funzionamento della stessa;
- Nel caso di utilizzo di sistemi di illuminazione interni alla camera pressurizzata essi devono essere in grado di resistere alle variazioni di pressione e temperatura ed essere testati per una pressione pari a 1.5 volte la pressione massima di esercizio della camera. In alternativa è possibile illuminare la camera con sistemi posizionati all'esterno trasportando la luce all'interno attraverso oblò o fibra ottica;
- Le apparecchiature elettriche interne devono essere protette rispetto alla penetrazione dell'acqua (grado di protezione minimo IP X5);
- Tutte le apparecchiature elettriche che hanno funzioni vitali al funzionamento (illuminazione, allarmi, pompe antincendio, dispositivi comando pressurizzazione) in sicurezza della camera devono essere collegate al sistema ausiliario di generazione di energia.

#### **4.4.6 Sistema di monitoraggio della qualità dell'aria e dei valori di sovrappressione**

Per avere una sicura gestione dell'attività iperbarica, è necessario monitorare costantemente i valori di sovrappressione e di qualità dell'aria respirata in tutto l'ambiente pressurizzato.

Riferendosi al D.P.R 320/1956 art 30 la *“L'aria ambiente degli scavi sotterranei deve essere mantenuta respirabile e, quanto più possibile, esente da inquinamenti mediante sistemi di ventilazione atti ad eliminare o a diluire entro i limiti di tollerabilità i gas, le polveri e i vapori pericolosi o nocivi”*. Per questo motivo è necessario installare all'interno della camera di lavoro e di compensazione una rete di sensori e misuratori, opportunamente distribuiti in maniera tale da individuare un peggioramento della qualità dell'aria o variazioni della pressione assoluta dovuti ad un malfunzionamento dei sistemi di ventilazione. Il monitoraggio ambientale è ulteriormente necessario per avere una pronta risposta alle situazioni di pericolo e di emergenza che si possono verificare durante l'esecuzione dei lavori.

I principali parametri da controllare nell'ambito del controllo della qualità dell'aria sono:

- Percentuale di ossigeno: da mantenere quanto più possibile ai livelli atmosferici;
- Microclima: misurazione dei valori di temperatura e umidità mediante l'uso di termometri a secco o ad umido. Per garantire un buon benessere termigrometrico ai lavoratori la temperatura secca non dovrebbe superare i 30 ° C, mentre quella umida i 25°C (British Tunnelling Society, 2012); eventualmente modificabili a seconda della durata del turno e dello sforzo fisico intrapreso dai lavoratori;
- Misurazione della quantità di polvere in corrispondenza delle attività di scavo e movimentazione del materiale che deve essere compresa nei limiti di legge.

I valori limite delle concentrazioni di polvere sono espressi in TLV-TWA, cioè la concentrazione limite, calcolata come media ponderata nel tempo (8 ore/giorno, 40 ore settimanali) ed espressa in mg/m<sup>3</sup>, alla quale i lavoratori possono essere esposti, giorno dopo giorno, senza effetti avversi per la salute su tutta la vita lavorativa. Le soglie, indicate dall' ACGIH (American Conference of Governmental Industrial Hygienists) riguardano:

- Polveri generiche: 10 mg/m<sup>3</sup> (polveri totali);
- Frazione respirabile delle polveri: 3 mg/m<sup>3</sup>;
- Silice cristallina: 0.05 mg/m<sup>3</sup>;
- Fumi diesel: 0.02 mg/m<sup>3</sup>.

Tali valori di soglia all'interno della galleria subiscono una diminuzione direttamente proporzionale all'aumento del livello di sovrappressione applicato, poiché con l'aumento della sovrappressione si manterrà la stessa massa di contaminante, ma contenuta in un volume minore di aria.

Per mantenere un adeguato livello di qualità dell'aria ed evitare la dispersione di polveri risulta necessario effettuare l'umidificazione del materiale di smarino, oltre che la disposizione di appositi dispositivi per l'aspirazione ed il filtraggio delle polveri all'interno della galleria. In situazioni di emergenza o in particolari lavorazioni in grado di generare elevate quantità di polvere occorre fornire ai lavoratori idonee maschere munite di filtri.

Un ulteriore monitoraggio da effettuare riguarda la presenza di atmosfere potenzialmente esplosive generate dal possibile rilascio di gas naturali (metano, radon, monossido di carbonio, acido solfidrico, biossido di azoto) da parte del volume di terreno da scavare.

La loro presenza deve essere precedentemente valutata attraverso indagini geologiche e geomorfologiche della zona in cui ricade l'opera, ponendo particolare attenzione alla presenza di rocce serbatoio o particolari formazioni a rischio. L'argomento è ben definito nella Linea Guida n° 3 "Grisù" che emana un indice di classifica in 5 diverse classi in funzione della previsione delle condizioni del flusso di grisù che è possibile incontrare e definisce la tipologia e l'intervallo temporale in cui effettuare il monitoraggio del gas, oltre che all'allestimento di cantiere e alle procedure gestionali necessarie ad evitare possibili casi di deflagrazione.

Oltre al monitoraggio effettuato attraverso delle reti fisse di sensori, risulta appropriato munire di misuratori portatili di polveri, gas, temperatura e umidità i responsabili e gli addetti al monitoraggio e alla sicurezza che operano direttamente all'interno della camera di lavoro pressurizzata

#### **4.4.7 Sistema di comunicazione e di allarme**

Una delle principali misure capaci di garantire una tempestiva e idonea gestione delle emergenze riguarda la pianificazione e l'installazione del sistema di comunicazione e di allarme all'interno dei luoghi di lavoro. Tali sistemi servono a garantire la tempestiva comunicazione tra i lavoratori e l'esterno della galleria, in maniera tale da allertare i mezzi e le squadre di soccorso. A differenza di una normale galleria scavata in condizioni atmosferiche standard, l'ingresso e l'uscita in atmosfera iperbarica richiedono particolari procedure di compressione e decompressione aumentando così il tempo di intervento dei soccorsi.

Secondo la normativa italiana vigente art12 D.Lgs 626/94 (Legislativo, 2003) e art 45 del Testo unico D.Lgs 81/08 (Unico et al., 2018) il datore di lavoro, tenendo conto della natura dell'attività produttiva, ha l'obbligo di prendere i provvedimenti necessari in materia di primo soccorso e di assistenza medica di emergenza, costituendo squadre di emergenza aziendali addestrate e di stabilire i necessari rapporti con i servizi pubblici competenti in materia di primo soccorso, salvataggio, antincendio e per la gestione delle emergenze.

In particolari situazioni, come ad esempio in cantieri in condizioni iperbariche, l'impresa esecutrice può stipulare specifiche convenzioni con il sistema di soccorso pubblico nazionale (118) per la gestione delle emergenze e il trasporto degli infortunati in strutture idonee e dotate di camera iperbarica terapeutica.



Le tipologie e l'installazione dei sistemi di comunicazione ed allarme da installare in un cantiere in sotterraneo sono definite nella Nota Interregionale N.6 (Postazioni SOS, 2000). Tale sistema viene costituito da 3 sottosistemi dislocati in diverse zone della galleria:

- **Sul fronte di avanzamento:** (necessario con una progressiva maggiore di 300 m) e costituito da un sistema telefonico in grado di comunicare con i responsabili della sicurezza e con i mezzi di soccorso, un pulsante di allarme e di un dispositivo acustico e luminoso per l'emanazione dell'allarme. Tale sistema è posto nei pressi del fronte di scavo (20-30 m dietro) ed avanza con l'avanzare dello stesso;
- **Lungo l'asta della galleria:** vengono posizionate delle postazioni SOS con un passo massimo di 500 m, costituite da: sistema telefonico, pulsante di allarme con dispositivo acustico e luminoso, estintore ed idrante antincendio. Tale postazione deve essere opportunamente segnalata ed illuminata (di colore verde) e deve essere corredata da un cartello informativo sulle istruzioni d'uso, i numeri di emergenza e le informazioni essenziali da fornire in caso di richiesta di intervento (denominazione galleria e progressiva). L'interdistanza tra le cabine SOS dovrebbe essere ragionevolmente diminuita in funzione dell'aumento del livello di pressione poiché esso genera un maggior affaticamento fisico nel lavoratore;
- **All'imbocco della galleria:** in prossimità del paramento destro deve essere posto un segnale acustico e visivo collegato ai pulsanti di allarme interni, corredata da un cartello che informi sulla tipologia di emergenza e di allarme emanato. Per una buona procedura di emergenza risulta anche necessario un display che indichi in tempo reale il numero di lavoratori e di mezzi d'opera presenti all'interno della galleria.

Una volta installati, è necessario eseguire il collaudo e la verifica del funzionamento del sistema, nonché un'adeguata manutenzione effettuata durante tutta la durata dei lavori in modo da garantire sempre la loro buona funzionalità.

Per consentire una maggiore flessibilità e rapidità nelle comunicazioni di emergenza tra i soccorritori interni e le rispettive centrali operative esterne è buona pratica fornire un sistema di comunicazione radio/telefono mobile predisponendo nella galleria tutte le dotazioni accessorie necessarie (ripetitori, antenne, alimentazioni, stazioni base).

Anche la camera di compensazione deve essere munita di un sistema di comunicazione vocale con l'esterno, in modo da mettere in contatto i lavoratori interessati dal processo

di compressione e decompressione con il responsabile del processo iperbarico all'esterno della camera. Secondo la normativa inglese art. 202 (British Tunnelling Society, 2012), la camera di compensazione deve essere munita anche di un mezzo di comunicazione non verbale ,come ad esempio un oggetto metallico con cui colpire la porta della paratia secondo un codice di segnali prestabilito, tale soluzione può risultare utile in caso di malfunzionamenti o black-out del sistema di comunicazione via interfono o telefono.

#### 4.5 PROCEDURE DI INGRESSO E DI USCITA DALLA CAMERA DI LAVORO

A differenza delle gallerie scavate in condizioni atmosferiche, dove l'ingresso e l'uscita nella galleria può avvenire senza particolari procedure operative, in quelle scavate in condizioni iperbariche sono necessarie particolari procedure da seguire atte ad effettuare il passaggio dei lavoratori da condizioni atmosferiche a quelle pressurizzate e viceversa.

Questi procedimenti vengono effettuati all'interno della camera iperbarica di compensazione posta all'ingresso della galleria. Le attività devono avvenire sotto il controllo del personale competente in materia che deve garantire e controllare il rispetto delle procedure indicate nel progetto esecutivo nei piani di emergenza.

Come indicato in alcune normative, specialmente in quella inglese "A guide to the work in Compressed Air Regulation 1996" paragrafo 323, tutte le informazioni relative ai tempi di compressione e decompressione, valori di pressione, nominativi dei lavoratori, tipologia di procedura utilizzata e i certificati medici dovrebbero essere annotati nei registri di decompressione e conservati dalla società contraente dei lavori in aria compressa fino a 40 anni dopo la fine delle attività lavorative. Queste informazioni devono essere rese accessibili ai singoli lavoratori o ai loro rappresentanti e alle autorità mediche competenti.

L'ingresso dei lavoratori, abilitati e certificati per il lavoro in ambiente pressurizzato, nella camera di compensazione deve essere supervisionata da personale specializzato, ovvero dall'operatore tecnico iperbarico (OTI) e dall'infermiere medico iperbarico (IMI). L'intero processo può essere suddiviso in 3 fasi principali:

- **Check preliminare della camera di compensazione:** l'OTI, prima dell'entrata del personale, controlla il regolare funzionamento di tutte le dotazioni tecnico-impiantistiche della camera;

- **Fase di pressurizzazione della camera:** il personale in ingresso nella camera di lavoro viene portato dalle condizioni di pressione atmosferica alle condizioni di pressione di lavoro, seguendo le indicazioni di velocità di pressurizzazione e livelli di pressione indicati nel paragrafo (4.5.1). Le condizioni mediche degli occupanti della camera di compensazione devono essere valutate dal medico iperbarico o dall'infermiere iperbarico e nel caso di presenza di disagi come vertigini, svenimenti, malori la procedura di compressione deve essere prontamente interrotta ristabilendo le condizioni atmosferiche per prestare soccorso al malato;
- **Fase di depressurizzazione ed uscita dalla camera:** si svolge alla fine delle attività lavorative o del turno in galleria, per consentire l'uscita del personale dalla camera di lavoro; si devono rispettare le velocità ed i tempi indicati nelle tabelle di decompressione, calcolate in funzione del valore di sovrappressione e della durata dell'esposizione all'atmosfera iperbarica.

Un possibile approccio innovativo, che potrebbe portare a garantire maggiori condizioni di sicurezza, riguarda la predisposizione di un sistema di registrazione informatizzato, automatico e continuo dei dati monitorati e delle attività lavorative. Le informazioni da raccogliere, per ogni lavoratore esposto a condizioni di sovrappressione, sono le seguenti:

- Data ed ora d'ingresso ed uscita dalla camera di lavoro;
- Durata dell'esposizione;
- Procedure di compressione e decompressione utilizzate;
- Turni lavorativi svolti;
- Livelli di pressione in camera di lavoro durante l'attività lavorativa;
- Eventuali problematiche di salute riscontrate;
- Tipo di attività svolta;
- Valore dei parametri di qualità e temperatura dell'aria durante l'attività;
- Certificati medici e d'idoneità al lavoro iperbarico.

Questa registrazione può essere svolta attraverso un sistema che raggrupperà in tempo reale ed in maniera automatica tutte le informazioni provenienti dai sistemi di monitoraggio e di misurazione, oltre ai dati provenienti dal controllo e gestione degli accessi in galleria. Si otterrà quindi una banca dati di tutti i parametri di gestione di una galleria iperbarica, con la possibilità di effettuare analisi sulle attività pregresse con lo scopo di migliorare la sicurezza delle attività lavorative.

Inoltre, tale report potrebbe essere utilizzato come banca dati per studi a carattere medico per la valutazione degli effetti della sovrappressione sui lavoratori o per la valutazione delle cure più idonee in caso di insorgenza di malattie di tipo barotraumatico.

#### 4.5.1 Tabelle di decompressione

Lo studio dei meccanismi e dei tempi di decompressione si ha sin dalla seconda metà del 1800 grazie al professore francese Paul Bert che riuscì ad intuire per primo che le malattie da decompressione erano causate dall'eccesso di azoto disciolto nei tessuti ed a procedure di decompressione svolte con eccessiva rapidità.

Durante la costruzione dei pilastri del ponte di Brooklyn, realizzati attraverso cassoni pressurizzati per impedire l'ingresso di acqua e detriti all'interno della camera di scavo, si ebbe la morte di numerosi operai a causa di malattie da decompressione; questo fatto portò numerosi scienziati ad approfondire meglio gli studi di Bert sugli effetti della sovrappressione nei tessuti dell'organismo umano.

I maggiori contributi alla teoria decompressiva furono dati dal fisiologo britannico John Scott Haldane, che attraverso i suoi studi riuscì ad elaborare le prime tabelle di decompressione pubblicate nel 1908. I principi fondamentali della sua teoria, ancora utilizzati nei moderni modelli decompressivi, sono:

- Suddivisione dei diversi tessuti in 5 categorie (compartimenti) classificati in funzione delle diverse velocità di assorbimento e di rilascio dei gas;
- Definizione del rapporto di sovra-saturazione critica (Rapporto di Haldane), cioè del massimo valore ammissibile della variazione di pressione a cui può essere sottoposto un organismo senza riportare particolari problematiche fisiche. Il rapporto ( $M$ ) fu fissato a 2;
- L'assorbimento e il rilascio di gas da parte di un tessuto non avvengono a velocità costante, ma seguono una dinamica esponenziale;
- La decompressione può iniziare con un calo marcato della pressione ambientale.

Nel 1956 il rapporto di Haldane ( $M$ ) fu sostituito da un altro parametro  $M$ , definito dallo scienziato americano Workman. Questo nuovo valore di  $M$  non risulta essere costante; ma varia a seconda del tessuto (compartimento) considerato e dalla profondità (valori di sovrappressione).

Durante la respirazione, una parte dei gas che vengono ispirati, si disciolgono nel sangue attraverso gli alveoli polmonari e si trasferiscono ai vari tessuti corporei tramite un meccanismo di diffusione. L'entità dell'assorbimento varia in funzione delle condizioni di pressione dell'ambiente, infatti aumenterà con l'aumentare del livello di pressione e dal tempo di esposizione.

Nei lavori di scavo di gallerie in sovrappressione, viene utilizzata principalmente aria naturale e non modificata composta all'incirca per il 78 % di Azoto, 21 % di Ossigeno e dall'1% di altri gas tra cui Anidride carbonica, Argon, Elio. La maggior parte di questi gas, specialmente l'Azoto, sono definiti gas metabolicamente inerti poiché non contribuiscono a nessuna reazione chimica dell'organismo e quindi vanno solamente in accumulo nei tessuti durante la permanenza in condizioni di sovrappressione. L'Ossigeno, a differenza dei gas inerti, non viene accumulato in maniera significativa all'interno dei tessuti poiché viene rapidamente utilizzato per lo svolgimento dei processi metabolici.

Basandosi sulla legge di Henry, la quantità di gas che un tessuto può trattenere in soluzione, varia con la pressione; infatti le diverse tipologie di tessuto assorbono differenti quantità di azoto fino alle condizioni di saturazione e fino a quando la pressione parziale dell'azoto respirato è maggiore rispetto alla pressione parziale del gas assorbito nei tessuti. Pertanto, la quantità di azoto assorbito aumenta con la pressione parziale dell'azoto inspirato che dipende dalla pressione e dalla durata di esposizione.

Nelle fasi di depressurizzazione e di desaturazione, durante l'uscita dalla galleria pressurizzata, il processo si inverte poiché la pressione parziale nei tessuti risulta essere maggiore rispetto a quella del sistema circolatorio e respiratorio. In queste fasi è necessario tenere sotto controllo il gradiente di pressione dei tessuti e del sangue per evitare una rapida diffusione dell'azoto che potrebbe causare l'insorgenza di bolle di gas sia nei tessuti che nel sistema circolatorio causando possibili malattie da decompressione. Nel tempo si sono così sviluppate delle tabelle di decompressione in cui vengono indicati i tempi e le soste da effettuare ad un determinato livello di pressione in modo da eseguire un'idonea e sicura procedura di decompressione fino al ritorno a condizioni di pressione atmosferica.

Riferendosi alla legislazione attualmente in vigore in Italia le procedure di compressione e decompressione vengono espresse negli articoli 28 e 36 del D.P.R. n. 321 del 20 marzo 1956. In questi articoli viene definita la durata del lavoro e le procedure da effettuare, senza però considerare i tempi di permanenza in condizioni di sovrappressione e nemmeno

l'attività fisica svolta dai lavoratori. Tale normativa risulta essere oramai obsoleta considerando l'avanzamento tecnologico e scientifico avuto in questi decenni, ma a rendere non applicabile in condizioni di sicurezza sono anche alcune prescrizioni presenti in essa.

La prima riguarda la suddivisione obbligatoria del lavoro su due turni frazionati da una fase di decompressione e da un intervallo di tempo in aria atmosferica. In questo modo non si vanno a migliorare le condizioni di sicurezza dei lavoratori, poiché essi vengono sottoposti in maniera del tutto inutile ad un ciclo di compressione e decompressione in più provocando condizioni di maggior stress all'organismo. Risulta più idoneo seguire il riferimento normativo inglese che prevede comunque una pausa a metà turno di lavoro, ma effettuata all'interno della camera pressurizzata evitando così il ciclo di decompressione in eccesso.

Altra precisazione riguarda il profilo decompressivo, il D.P.R n.321 prevede lo svolgimento della decompressione in un unico step con velocità uniforme, mentre la tecnica più sicura risulta essere quella del profilo con soste di decompressione in grado di garantire una maggior durata totale della decompressione ed una minore incidenza di malattie da decompressione.

Durante il presente lavoro di tesi sono stati confrontati i tempi di decompressione presenti nelle tabelle della normativa inglese e francese, che risultano essere le più complete e dettagliate.

La normativa inglese fornisce delle tabelle in cui sono indicati i tempi di decompressione in funzione della pressione relativa e del tempo di esposizione (Figura 4-5).

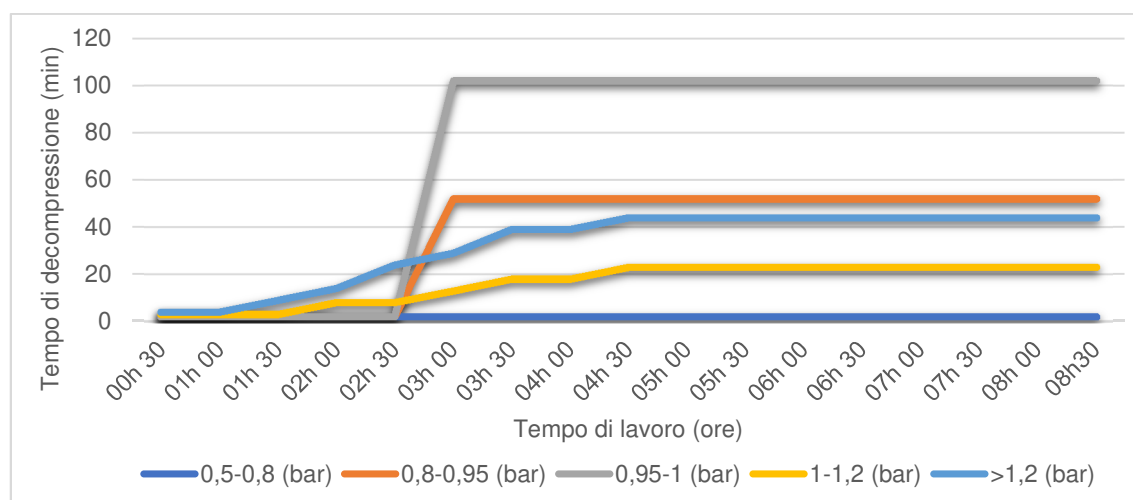


Figura 4-5: Tempi di decompressione indicati dalla normativa inglese per diversi intervalli di pressione relativa.

Inoltre, la normativa definisce le modalità con cui devono essere eseguite le operazioni di decompressione per 3 intervalli di pressione relativa:

- Per livelli di pressione relativa inferiori a 0.7 bar viene definita solamente la velocità di depressurizzazione, pari a 0.4 bar/min;
- Per valori compresi tra 0.7 e 0.95 bar vengono indicate due tabelle, una per la decompressione attraverso l'uso di ossigeno (concentrazione di ossigeno massima 23%) e un'altra attraverso la respirazione di aria naturale compressa. La scelta della tipologia da usare è lasciata all'appaltatore. Con l'utilizzo di aria ossigenata si hanno tempi di decompressione nettamente minori e significativi benefici medici rispetto alla decompressione con sola aria naturale, ma questo comporta un costo gestionale ed impiantistico maggiore dato dalla necessità dell'acquisto di ossigeno puro e della maggiore dotazione impiantistica necessaria;
- La terza fascia definisce i tempi e le modalità di decompressione relativa a pressioni relative maggiori di 1 bar; essa deve essere effettuata esclusivamente attraverso l'utilizzo di ossigeno e con intervalli di adattamento tra un calo e l'altro di pressione sempre più frequenti e duraturi con l'aumento dei valori della pressione di lavoro. Quindi, come si nota anche dal grafico in Figura 4-5, sebbene la pressione sia maggiore rispetto alle fasce precedenti i tempi di decompressione risultano essere minori grazie all'uso di aria ossigenata.

La normativa britannica definisce i tempi di decompressione solo in funzione della pressione di lavoro fissando il tempo massimo di lavoro giornaliero ad 8 ore.

Quella francese (Figura 4-6) ha un approccio differente, poiché fissa i tempi di decompressione sia in funzione della pressione di lavoro che dei tempi di esposizione alla suddetta pressione. Si otterrà così una durata massima del turno di lavoro di 8 ore (con pressioni <0.75 bar) che si ridurrà man mano che aumenta la pressione, sino ad arrivare ad una durata di 5 ore nella fascia di pressione compresa tra 1.05 e 1.2 bar. A tali durate del tempo di lavoro bisogna poi sempre aggiungere il tempo necessario alla decompressione.

La direttiva francese (Travail et al., 2011) delinea tempi di decompressione crescenti in funzione della pressione e del tempo di lavoro, tranne per valori di pressione inferiori a 0.9 bar in cui la durata della fase decompressiva è fissata in 3 minuti.

La normativa francese, diversamente da quella inglese, non impone l'utilizzo di aria ossigenata in camera iperbarica per determinati valori di pressione relativa, ma lascia la scelta alle figure professionali responsabili della fase decompressiva.

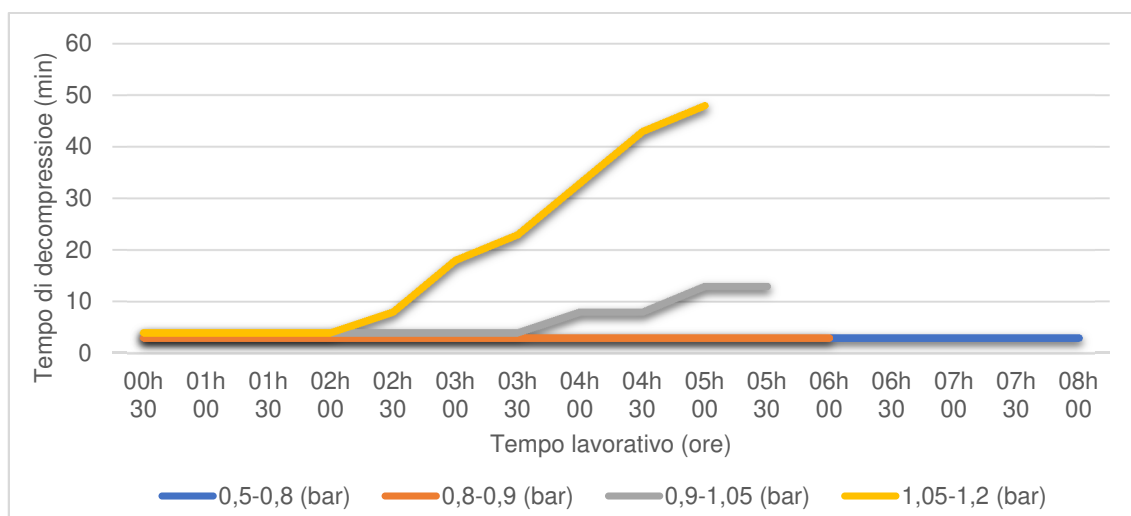


Figura 4-6: Tempi di decompressione indicati nelle tabelle della normativa francese nell'intervallo di pressione tra 0.5 e 1.2 bar

#### 4.6 MONITORAGGIO DEI LIVELLI DI FALDA

La ricostruzione e il monitoraggio della soggiacenza della falda acquifera nelle zone attraversate da una galleria scavata in condizioni iperbariche rappresenta uno dei principali parametri operativi e progettuali di tali opere, poiché proprio dalla sua definizione viene calcolato il livello di pressione necessario allo spiazzamento dell'acqua e a garantire condizioni di sicurezza all'interno della galleria.

Questo controllo assume una doppia utilità poiché viene utilizzato sia nella fase progettuale e sia nella fase realizzativa dell'opera:

- Nella fase progettuale i dati di soggiacenza della falda misurati all'interno dei sondaggi piezometrici permettono di ricostruire il profilo piezometrico della falda;
- Nella fase esecutiva la misurazione occorre per valutare gli effetti dell'applicazione della sovrappressione sulla falda e per controllare se il livello di sovrappressione sia sufficiente a bilanciare la pressione idrostatica dell'acqua.

Per monitorare la soggiacenza della falda, in fase esecutiva, è necessario predisporre una rete di piezometri posizionati in funzione dell'estensione planimetrica della galleria e,



qualora presenti, della distribuzione dei compartimenti di suddivisione dell'intera lunghezza della galleria.

I piezometri devono essere disposti ad una diversa distanza dall'opera in relazione alla finalità del monitoraggio:

- Quelli più vicini al tracciato (Figura 4-7- piezometro1) della galleria forniscono principalmente informazioni sulle perturbazioni che l'aria compressa produce sui livelli di falda. Questo monitoraggio risulta essere importante per il controllo di eventuali fenomeni di subsidenza in superficie causati dalla variazione dei livelli piezometrici.
- Quelli più distanti (Figura 4-7- piezometro2) invece risultano utili per la valutazione di eventuali aumenti o diminuzioni del livello di falda causato da attività antropiche o naturali diverse dall'attività di scavo.

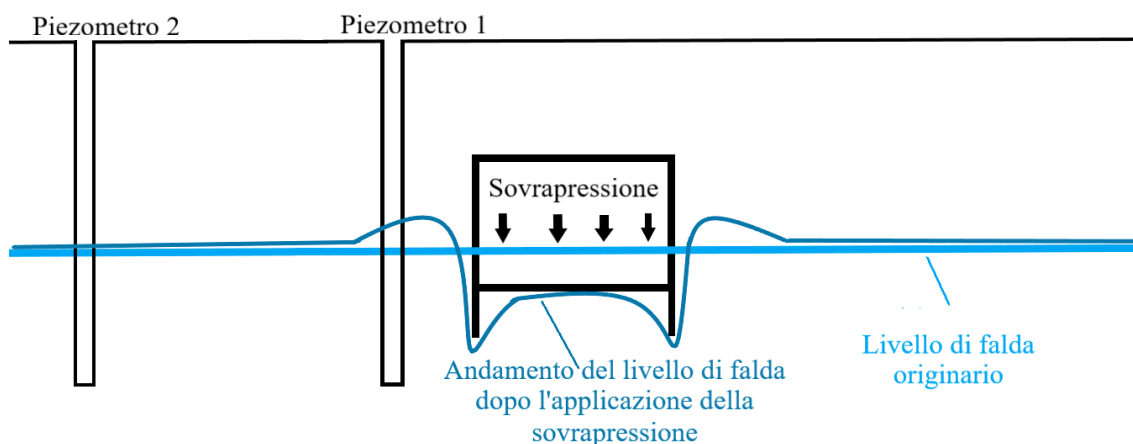


Figura 4-7: Rappresentazione della perturbazione della falda dovuta all'applicazione dell'aria compressa.

Tra le varie tipologie di piezometri disponibili, il più utilizzato è quello a tubo aperto, costituito da spezzoni di tubi forati con diametro di 5-15 cm (in PVC o in metallo) collegati tra loro ed installati verticalmente all'interno dei fori di sondaggio nel terreno. L'intercapedine tra il foro e il tubo viene riempita di materiale filtrante costituito da sabbia o ghiaietto, in maniera tale da permettere all'acqua di falda di filtrare all'interno del tubo e di stabilizzarsi ad un livello che rappresenta il livello di falda acquifera circostante. La parte più superficiale del tubo piezometrico (bocca pozzo) viene cementata e chiusa con un tappo ed un pozzetto per evitare danneggiamenti e manomissioni. La misura del livello all'interno viene comunemente effettuata mediante un freatimetro elettrico, costituito da

una sonda calata nel pozzo che a contatto con il livello di acqua determina l'emissione di un segnale acustico o visivo in superficie, altrimenti mediante trasduttori di livello e sensori.

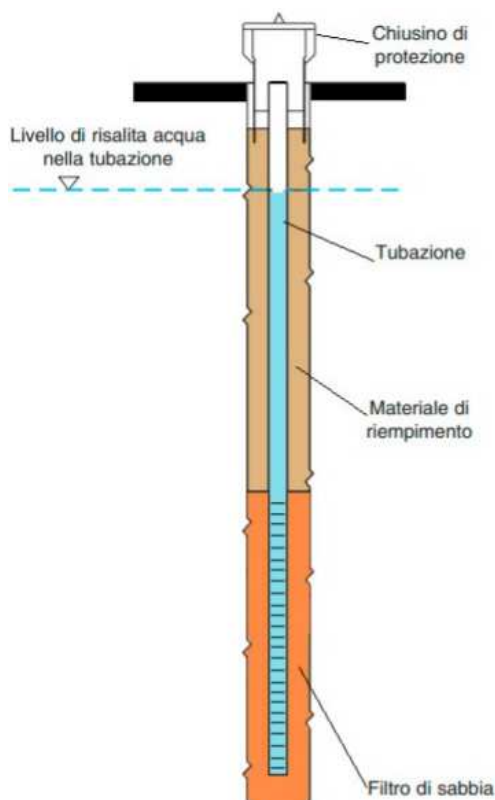


Figura 4-8: Sezione di un piezometro a tubo aperto utilizzato per la misurazione del livello di falda.(www.sisgeo.com)



Figura 4-9: Particolare della chiusura della bocca pozzo e del tombino di chiusura del piezometro a tubo aperto.(www.sisgeo.com).

Dalla misura si possono avere due tipi di livello:

- **Statico:** se la misura della soggiacenza è relativa ad una falda indisturbata, ma può comunque essere influenzata da cicliche fluttuazioni dovute a cause naturali

come variazione della pressione atmosferica o del regime di alimentazione della falda;

- **Dinamico:** in caso di falda perturbata cioè influenzata da pozzi di pompaggio presenti nelle zone limitrofe al punto di misurazione.

Conoscere se la falda è di tipo statico o dinamico risulta essere molto importante nel caso dello scavo sotterraneo in atmosfera iperbarica, poiché le fluttuazioni stagionali o di carattere antropico influiscono sulla gestione delle sovrappressioni necessarie a spiazzare l'acqua nel cantiere iperbarico. Risulta quindi necessaria una gestione dinamica del cantiere in termini di sovrappressione in caso di livelli di soggiacenza molto variabili in tempi brevi.

La lettura dei dati può avvenire essenzialmente in due maniere differenti:

- **Lettura Manuale:** dove si ha la necessità di un operatore che, dotato di un freatometro, si reca nell'ubicazione del piezometro ogni qualvolta sia necessario effettuare la misura del livello di falda. Nella scelta di questa modalità bisogna considerare la frequenza di misurazione necessaria e, anche se in fase di realizzazione della rete questa soluzione possa sembrare più economica, nel tempo occorrerà farsi carico di un maggior costo dovuto al personale necessario alla misurazione;
- **Lettura Automatica:** reti con questa configurazione hanno il vantaggio di fornire dati ad elevata frequenza, anche con frequenza oraria o in casi specifici fino al minuto, favorendo così anche la conoscenza della dinamica dei corpi idrici. Il vantaggio che si ottiene in termini conoscitivi si ottiene a fronte di un costo di gestione e di manutenzione minore rispetto ad una rete simile in modalità manuale. Occorre però considerare il maggior costo nella fase di avvio, legato all'acquisto e all'installazione impiantistica della rete, che può essere ammortato in caso di sessioni di monitoraggio di lunga durata (anni) o di frequenza elevata (ore/giorni).

Il sistema di monitoraggio in automatico da remoto (Figura 4-10) è formato da:

- **Piezometro elettrico,** installato all'interno del foro di sondaggio, costituito da un corpo metallico che racchiude un trasduttore di pressione in grado di determinare l'altezza piezometrica misurando la pressione idrostatica agente sul sensore.

- **Microcontrollore** collegato tramite filo al piezometro elettrico che consente di automatizzare l'acquisizione e la memorizzazione dei dati.
- **Datalogger** in cui vengono memorizzati i dati della misurazione fino al successivo scarico manuale nel software oppure fino alla successiva trasmissione attraverso antenna.
- **Sistema di trasmissione** che sfrutta tecnologie di telecomunicazione (GSM, wifi, frequenze radio, ecc.) per inviare i dati, memorizzati nel datalogger o misurati in tempo reale, ad un software di gestione.
- **Software di gestione** in grado di gestire i sistemi di trasmissione dati, di elaborare i dati misurati, di modificare le impostazioni del microcontrollore e di controllare da remoto i livelli di batteria e di memoria.

Tali sistemi sono caratterizzati da un'eccezionale autonomia dovuta a bassissimi consumi ( con un intervallo di misura di un'ora, la durata della batteria è di circa 2-3 anni).

In fase di caratterizzazione preliminare del livello piezometrico è possibile utilizzare anche la modalità di scarico manuale dei dati, mentre in corso d'opera è indispensabile utilizzare il sistema di trasmissione in maniera tale da ottenere la misura in tempo reale e porre le opportune valutazioni sull'influenza delle eventuali variazioni del livello di falda.

Si riportano alcuni prerequisiti e alcune buone pratiche per la realizzazione e la gestione della rete di monitoraggio nel caso in cui essa venga usata come sistema di supporto e di controllo per lo scavo di galleria in ambiente iperbarico:

- Prima dell'installazione della rete deve essere effettuato uno studio dell'area di interesse, andando ad individuare possibili interferenze antropiche o naturali presenti nell'aria di monitoraggio ed in grado di falsare gli effettivi valori del livello di falda.
- La dislocazione dei piezometri deve essere quanto più possibile uniformemente distribuita lungo l'estensione dell'intero tratto di galleria scavato in iperbarico, tenendo in considerazione la stratigrafia, le caratteristiche del terreno e l'eventuale presenza di interferenze;
- La frequenza di lettura deve essere incrementata (anche con cadenza oraria/minuto) nella fase di scavo del volume di galleria limitrofo al piezometro;
- I dati relativi al livello di falda devono essere trasmessi in tempo reale al sistema automatizzato di regolazione delle portate e delle pressioni. Questo sistema viene supervisionato dall'RII (Responsabile Intervento Iperbarico) che ha il compito di

intervenire manualmente in caso di allarmi o anomalie segnalate dal sistema di controllo.

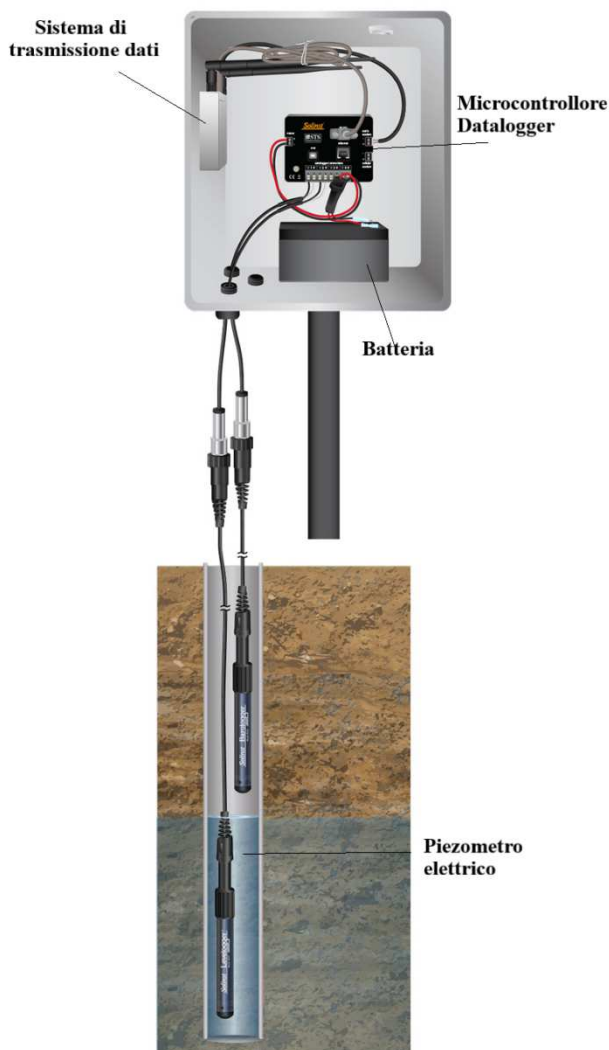


Figura 4-10: Schematizzazione del sistema di misurazione in automatico da remoto.

#### 4.7 COMUNICAZIONE/COORDINAMENTO SICUREZZA

Nella gestione di un cantiere in cui viene utilizzata una tecnologia complessa come quella dell'aria compressa, è necessario avere dei piani di sicurezza e gestione delle emergenze idonei a garantire un adeguato e celere intervento degli organismi di soccorso sul luogo dell'incidente.

Come ben definito in diverse normative internazionali (Normativa Francese, Inglese, Tedesca ecc.) l'appaltatore dei lavori sotto aria compressa ha l'obbligo di notificare l'inizio delle attività in un intervallo temporale che varia da 1 a 4 settimane prima dell'inizio dell'attività, a seconda della normativa adottata come riferimento.

Nel DPR italiano 321/56 viene stabilito di notificare almeno 20 giorni prima l'inizio dei lavori, ma solo all'ispettorato del lavoro, mentre nel Testo Unico Dlgs 81-08 (Articolo 99- Notifica preliminare) viene indicato al responsabile dei lavori o al committente di inviare la notifica sia alla Direzione Provinciale del Lavoro che all'Azienda Unità Sanitaria Locale. Secondo la linea definita dalla normativa britannica sarebbe meglio allargare l'avviso di notifica anche ad altri enti presenti nel territorio come: ospedali, servizi antincendio, stabilimenti che gestiscono strutture iperbariche, polizia locale e società di fornitura dei servizi elettrici ed energetici.

Per la buona gestione di un'eventuale emergenza è necessario individuare e informare non un qualsiasi ospedale posto nelle vicinanze del luogo di svolgimento dell'attività iperbarica, ma un "ospedale pertinente", cioè capace di gestire con il proprio personale e le proprie attrezzature eventi di tipo barotraumatico.

Una volta individuati gli enti e le strutture limitrofe necessarie alle operazioni di soccorso occorre intraprendere una comunicazione multilaterale in maniera tale da avere un adeguato coordinamento tra le varie figure. Per tale tematica possono essere prese come riferimento le informazioni contenute nella Linea Guida Nazionale n 1 "Coordinamento della sicurezza nella realizzazione delle Grandi Opere".

In caso di mancanza o di indisponibilità di infrastrutture di trasporti e di logistica che consentano il celere trasferimento del lavoratore infortunato in una struttura ospedaliera idonea, può essere necessaria l'organizzazione presso il cantiere di un presidio medico fisso atto a emettere le prime cure necessarie.

#### **4.8 PROCEDURE DI EMERGENZA E SOCCORSO**

Per una gestione in sicurezza delle attività iperbariche risulta molto importante seguire le indicazioni che vengono fornite nel Piano di sicurezza e coordinamento e nel Piano delle emergenze. Le principali condizioni di pericolo a cui può essere esposto il personale sono:

- Allagamento;
- Aumento o diminuzione incontrollata dei livelli di pressurizzazione;
- Incendio.

#### 4.8.1 Allagamento

Particolari procedure di emergenza risultano necessarie nella fase di scavo della galleria in pressione per ovviare ai possibili problemi di allagamento dell'ambiente di lavoro che possono verificarsi principalmente per:

- Errata valutazione dei livelli di falda presenti;
- Rapido aumento non previsto del livello di falda dovuto ad eventi metereologici o a fenomeni di idrologia sotterranea;
- Perdita d'aria dal terreno superiore alla capacità dell'impianto di generazione dell'aria compressa dovuta ad un'errata caratterizzazione in termini di tipologia e di permeabilità all'aria del terreno stesso;
- Malfunzionamento del sistema di generazione e distribuzione dell'aria compressa.

Tali eventi possono portare a fenomeni di allagamento della galleria o a cospicue venute d'acqua dal fronte esponendo il personale operante a rischi di seppellimento per crollo del fronte, annegamento ed elettrocuzione.

Per minimizzare il rischio di infortunio è necessario:

- effettuare accurate indagini preliminari (cfr. paragrafi 4.1.1 e 4.1.2) per stimare l'entità delle possibili venute d'acqua ed i possibili fenomeni di instabilità del fronte di scavo;
- realizzare un sistema di controllo dell'impianto di produzione e distribuzione dell'aria compressa che consenta di regolare dinamicamente le sovrappressioni in camera di lavoro (cfr. paragrafo 4.4.3);
- adottare specifiche procedure di evacuazione della camera di lavoro, qualora le dotazioni impiantistiche non consentano di contrastare il fenomeno, .

#### 4.8.2 Aumento o diminuzione incontrollata dei livelli di pressurizzazione

Durante lo scavo ci si può trovare in situazioni di emergenza derivanti da una variazione incontrollata dei livelli di pressione interni alla camera di lavoro.

Posto che il sistema di fornitura dell'aria compressa e di ricircolo sia stato dimensionato correttamente, questa situazione di emergenza può verificarsi solo a causa di malfunzionamenti o blocco dei sistemi stessi.

In queste situazioni occorre attuare una rapida e pronta risposta all'emergenza da parte dei responsabili che in funzione dell'entità e della tipologia di variazione devono decidere prontamente se evacuare la galleria o no.

Infatti, la variazione sia positiva che negativa di pressione con una velocità troppo elevata può comportare l'insorgenza di malattie barotraumatiche conseguenti alla rapida espansione dei gas contenuti all'interno dei tessuti e del sangue. La velocità ottimale di pressurizzazione e depressurizzazione è compresa tra i 0.4-0.6 bar /minuto (cfr. paragrafo 4.5.1).

Se la velocità di variazione della pressione è compresa nell'intervallo indicato, si può continuare l'attività lavorativa, ma ricalcolando i tempi di decompressione per la successiva uscita dalla camera di lavoro in funzione del nuovo valore di pressione interna alla camera di scavo.

Diversamente, è necessario procedere all'evacuazione della galleria e sottoporre i lavoratori a cicli di ricompressione terapeutica.

#### 4.8.3 **Allarme incendio**

Sebbene l'ambiente di lavoro all'interno della galleria in cui viene usata un'atmosfera iperbarica non sia un'ambiente esplosivo, risulta comunque un luogo con un potenziale maggiore di rischio di combustione. Questo problema viene determinato dalla maggior quantità di ossigeno presente nell'aria causata dall'aumento di pressione derivante dall'aria compressa. Infatti, con un livello di sovrappressione di circa 1 bar la quantità di ossigeno risulta essere circa il doppio rispetto a quella atmosferica.

Lo scavo di gallerie in ambiente iperbarico è contraddistinto, rispetto ai tradizionali cantieri in condizioni atmosferiche, da una maggiore difficoltà di evacuazione dall'ambiente di lavoro la quale può avvenire soltanto dopo aver esplicitato le idonee procedure di decompressione. Oltretutto la presenza di aria compressa genera una maggiore possibilità di incendio e una maggiore velocità di propagazione dello stesso causata dalla maggiore quantità di ossigeno presente nell'aria e per la minor energia di accensione necessaria a sviluppare un incendio.

In prima istanza occorre sviluppare misure di prevenzione passiva per evitare lo sviluppo di incendi riferendosi alle prescrizioni indicate nelle Linea Guida Nazionale n 5 e nella



normativa inglese “Guide to the work in compressed air regulation 1996” (British Tunnelling Society,) che prevedono:

- Utilizzo di mezzi, impianti, ed attrezzature dotati di sistemi di protezione al fuoco;
- Utilizzo di materiali ignifughi e antistatici;
- Procedure specifiche per le attività di saldatura e di taglio a fiamma ossidrica;
- Divieto di deposito all'interno della camera di lavoro di materiali infiammabili.

Oltre alle misure di protezione attiva che comprendono:

- L'impiego di idonee procedure di emergenza;
- Addestramento del personale addetto;
- L'installazione di una rete antincendio ad acqua nebulizzata pressurizzata sia nella camera di lavoro che in quella di compensazione in grado di ricoprire l'intera superficie della galleria ed in grado di generare una pressione sufficiente ad operare a tutti i livelli di sovrappressione d'aria che si possono trovare in entrambe le camere pressurizzate;
- Dislocazione all'interno delle camere di estintori e postazioni SOS;
- Fornitura ai lavoratori di indumenti ignifughi ad alta visibilità e di DPI idonei;
- Presenza di autorespiratori per il personale di soccorso e di autosalvatori per le maestranze presenti oltre a veicoli per l'evacuazione.

Nel caso in cui si verifichi una situazione di emergenza incendio gli impianti areazione, comunicazione, allarme devono garantire il loro funzionamento per garantire una celere e sicura procedura di evacuazione.

La procedura standard di emergenza incendio deve seguire le seguenti fasi:

- Verifica dell'effettivo scoppio dell'incendio dal quadro di controllo o visivamente;
- Attivazione allarme e impianto antincendio;
- Attivazione dello scarico rapido dell'aria per favorire la fuoriuscita di fumi;
- Allerta delle squadre di soccorso (Vigili del fuoco, squadra sicurezza interna, Soccorso medico);
- Predisposizione dei soccorsi esterni al personale in uscita dalla galleria.

Occorre quindi garantire al personale operante all'interno di raggiungere in sicurezza la camera di compensazione per esplicitare la procedura di decompressione prima

dell'evacuazione; inoltre tale camera deve essere ignifuga e separata dalla camera di lavoro da un'altra paratia in modo da evitare che il fuoco arrivi ad essa.

L'ingresso delle squadre di soccorso all'interno della camera di lavoro può avvenire tramite la seconda camera di compensazione del personale predisposta come indicato nel paragrafo 4.4.1.

## **5. CASO STUDIO: LINEA AV NAPOLI – BARI, TRATTA NAPOLI-CANCELLO, GALLERIA CASALNUOVO**

Al fine di verificare la validità delle buone pratiche illustrate nel capitolo precedente, si descrive e commenta il progetto dello scavo in atmosfera iperbarica di un tratto della Galleria Casalnuovo, primo esempio di applicazione di questa tecnica nel territorio italiano. In una forma preliminare, le buone pratiche descritte nel capitolo 4 sono già state applicate per la progettazione esecutiva dell'opera, la cui realizzazione è prevista nel 2020.

Il presente lavoro di tesi fornisce alcuni approfondimenti con lo scopo di migliorare ulteriormente le condizioni di sicurezza e la gestione del cantiere.

L'opera è parte della rete dei trasporti transeuropea (TEN-T)(Figura 5-1), corridoio Scandinavo – Mediterraneo che collega Helsinki a Malta, il cui obiettivo è la realizzazione di un'unica rete transeuropea multimodale per integrare trasporto terrestre, marittimo e aereo.

Il nuovo itinerario ferroviario Napoli – Bari rappresenta uno dei principali investimenti infrastrutturali strategici previsti dal decreto “Sblocca Italia”, che ha come obiettivo primario il miglioramento dei collegamenti tra la costa Adriatica e quella Tirrenica.

Gli interventi di ammodernamento della linea ferroviaria esistente consistono in raddoppio dei binari, velocizzazione della linea, varianti all'attuale tracciato, interventi tecnologici di potenziamento e miglioramento delle infrastrutture di linea già esistenti.

La nuova linea ad Alta velocità (AV) ed alta capacità (AC) ridurrà i tempi di percorrenza e migliorerà la competitività del trasporto merci su rotaia.

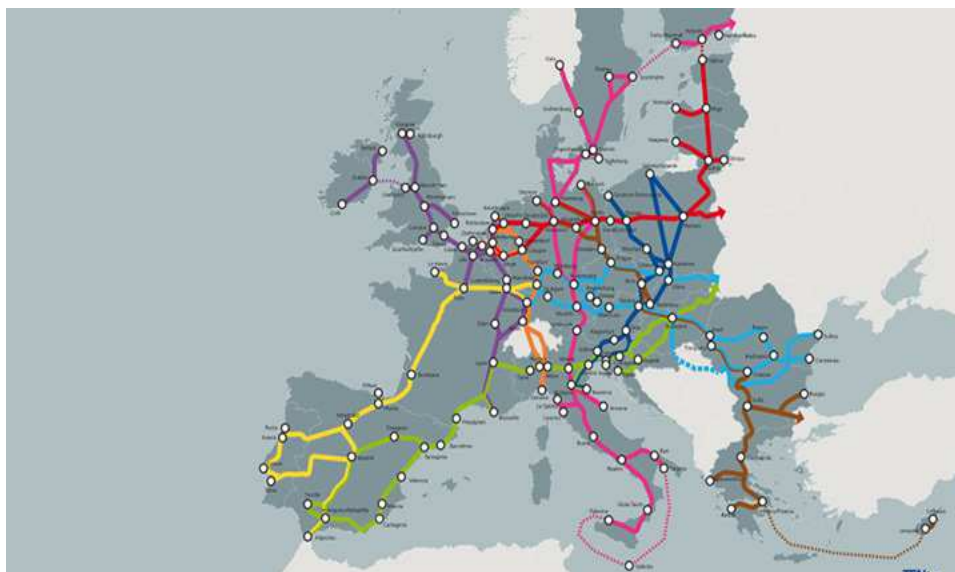


Figura 5-1: Rete Europea Ten-t ([www.rfi.it](http://www.rfi.it)), in fucsia il corridoio scandinavo mediterraneo



Figura 5-2: Rete Europea Ten-T ricadente nel territorio italiano( [www.mit.gov.it/](http://www.mit.gov.it/))

La nuova linea ferroviaria avrà una lunghezza di circa 150 km e la sua realizzazione è stata suddivisa in 5 tratte funzionali:

- Napoli – Cancello;
- Cancello – Benevento;
- Apice – Orsara di Puglia;
- Orsara di Puglia – Bovino – Cervaro di Foggia;
- Bretella di Foggia;
- Foggia – Bari.

L'ultima tratta (Foggia–Bari), già esistente, sarà interessata solo da un intervento tecnologico di ammodernamento per consentire velocità di percorrenza fino a 200 km/h.



Figura 5-3: Tracciato della nuova linea AV Napoli-Bari. ([www.ilsole24ore.com](http://www.ilsole24ore.com))

La galleria Casalnuovo (Figura 5-4) fa parte della tratta Napoli–Cannello, che collegherà la nuova linea alla stazione AV di Napoli Afragola, nodo di interscambio tra i servizi regionali, metropolitani ed AV.

La nuova tratta, di lunghezza complessiva pari a circa 15,6 km, attraversa i comuni di Casoria, Casalnuovo, Afragola, Caivano ed Acerra, e si ricongiunge alla linea storica alla pk 241+727 (a sud) e 229+490 (a nord).

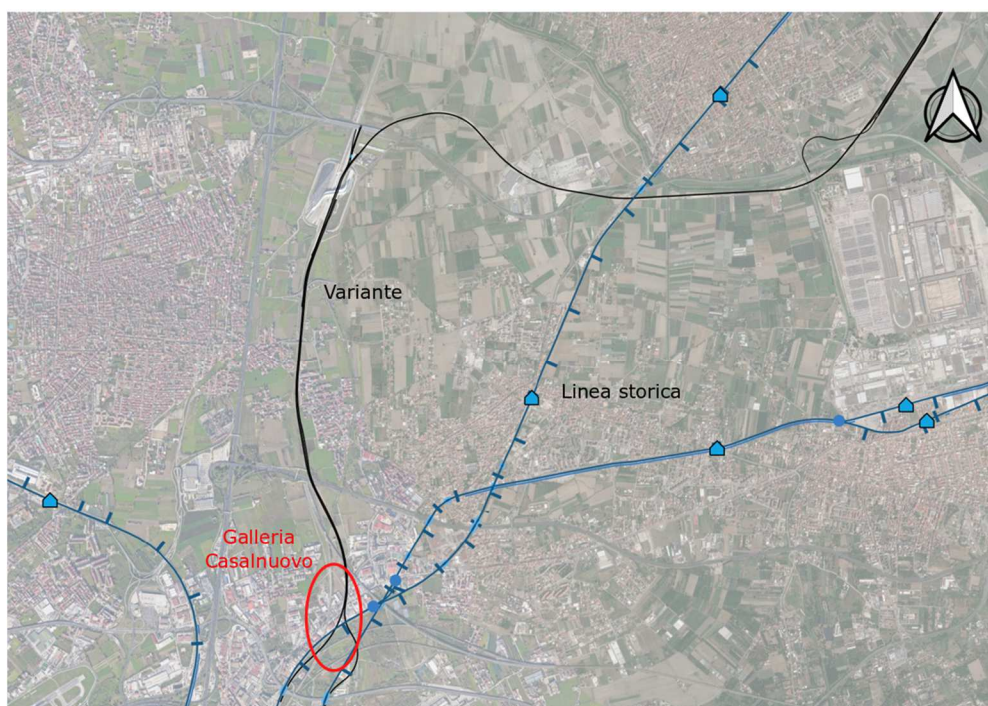


Figura 5-4: Tracciato nuova variante della linea Napoli-Bari

## 5.1 ELABORATI PROGETTUALI CONSULTATI

L'analisi del progetto di scavo in atmosfera iperbarica di un tratto della Galleria Casalnuovo si basa sui seguenti elaborati progettuali (che potrebbero essere stati aggiornati ed integrati dal progettista nel corso della redazione del presente lavoro):

1. **Progetto Esecutivo:** Gallerie. GA01 – Galleria Casalnuovo da km 0+550,00 a km 2+860,21
  - 1.a Relazione tecnica generale (IF1M.00.E.ZZ.RG.GA0100.001.A)
  - 1.b Relazione Geologica e idrogeologica (IF1M.00.E.ZZ.RH.GA0100.002.A)
  - 1.c Indagini geognostiche e prove in situ integrative (IF1M.00.E.ZZ.RH.GE0001.002.B)
  - 1.d Relazione tecnico illustrativa indagini geognostiche integrative (IF1M.00.E.ZZ.RH.GE0001.001.B)
  - 1.e Profilo idrogeologico, tavola 1 di 10 (IF1M.00.E.ZZ.F6.GE0002.001.A)
  - 1.f Piano di Monitoraggio (IF1M.00.E.ZZ.RH.GA0100.003.A)
  - 1.g Relazione di calcolo pressioni avanzamento (IF1M.00.E.ZZ.LC.GA0100.001.B)
  - 1.h Sezioni tipo A, B, C e D – Uso dell'aria compressa – Posizionamento dell'impiantistica interna – Planimetrie e Sezioni (IF1M.00.E.ZZ.AZ.GA0100.006.A)
  - 1.i Sezioni tipo A, B, C e D – Uso dell'aria compressa – Fasizzazione metodologica e procedure di scavo in pressione – Planimetrie, sezioni e viste (IF1M.00.E.ZZ.AZ.GA0100.008.A)
  - 1.j Sezioni tipo A, B, C e D – Planimetria con ubicazione piezometri integrativi (IF1M.00.E.ZZ.P8.GA0100.001.B)
2. **Progetto Esecutivo.** PSC – Piano di Sicurezza e Coordinamento
  - 2.a Sezione B. Scavo galleria in pressione (IF1M.00.E.ZZ.PU.SZ00B0.003.C)
  - 2.b Sezione C. Galleria Casalnuovo da Km0+550,0000 a Km 1+337,65 – tratto in pressione – Fasi esecutive: misure di prevenzione e protezione (IF1M.00.E.ZZ.PU.SZ00C0.003.B)
  - 2.c Sezione C. Galleria Casalnuovo da Km0+550,0000 a Km 1+337,65 – tratto in pressione – Nastri trasportatori: misure di prevenzione e protezione (IF1M.00.E.ZZ.PU.SZ00C0.006.B)

2.d Sezione C. Galleria Casalnuovo da Km0+550,0000 a Km 1+337,65 – tratto in pressione – Camere iperbariche: misure di prevenzione e protezione (IF1M.00.E.ZZ.PU.SZ00C0.004.B)

2.e Sezione C. Galleria Casalnuovo da Km0+550,0000 a Km 1+337,65 – tratto in pressione – Taglio diaframma con filo diamantato (IF1M.00.E.ZZ.PU.SZ00C0.007.C)

2.f Piano delle emergenze. Relazione generale piano delle emergenze (IF1M.00.E.ZZ.PU.SZ00F0.001.A)

2.g Piano delle emergenze. Appendice 1: Relazione piano delle emergenze per GA01 (IF1M.00.E.ZZ.PU.SZ00F0.002.A)

## 5.2 INQUADRAMENTO GENERALE DELL'OPERA

L'intera opera della variante ferroviaria Napoli- Cancellò si colloca nella Piana Campana, una vasta area pianeggiante che si estende per circa 1400 km<sup>2</sup> tra il Mar Tirreno, il Monte Massiccio, i monti di Caserta ed il Vesuvio.

Questa depressione, allungata in direzione NO/SE, è stata formata dall'interazione tra fenomeni di deformazione distensivi e di un'intesa attività vulcanica presente al centro della stessa.



Figura 5-5: Localizzazione dell'opera nel contesto della Piana Campana

Per determinare le caratteristiche geologiche e idrologiche dell'area interessata dall'opera, in fase di progettazione definitiva sono state realizzate indagini esplorative (tra il 1998 ed il 2015) ed acquisiti pubblicazioni e studi tecnico – scientifici realizzati da Autorità di bacino, Ispra, Università.

Il Progetto Esecutivo ha previsto ulteriori campagne geognostiche per una migliore caratterizzazione dei terreni e dell'acquifero in corrispondenza delle opere da realizzare.

Le nuove indagini geognostiche (elaborato 1.c) hanno consentito di colmare le lacune del Progetto Definitivo relativamente a:

- la ricostruzione litologico-stratigrafica nelle zone in cui non erano a disposizione sondaggi limitrofi alle opere.
- la possibile presenza di lenti di terreno soggette a fenomeni di liquefazione.
- la caratterizzazione degli acquiferi e dei livelli piezometrici.

### 5.2.1 Inquadramento Geologico strutturale

La conformazione geologica della Piana Campana si può riassumere come una depressione strutturale colmata in età plio-quadernaria da depositi sia vulcanici che sedimentari. La stratigrafia della Piana è caratterizzata da:

- terreni prevalentemente sabbiosi e limo argillosi nella zona più costiera;
- terreni limo-sabbiosi con torba di origine alluvionale e palustre nelle zone dei Regi Lagni, del Basso Volturno e nella depressione del Fosso Volla;
- uno strato di circa 50-70 metri di tufo grigio campano (Ignimbrite Campana), sormontato da terreni pozzolanici, rinvenuto in tutta la zona tranne che ,in una stretta fascia nei pressi del basso corso del fiume Volturno

La tratta Napoli – Canello si colloca nella depressione di Acerra – Afragola, attraversata da faglie con direzione NE-SO lungo le quali sono avvenute le eruzioni laterali del Vesuvio nel 1764 e 1861. La depressione è stata originata da un crollo dovuto allo svuotamento del sottosuolo durante l'eruzione della Ignimbrite Campana, che rappresenta il deposito più esteso dell'intera area. Questo deposito è stato successivamente colmato da depositi di origine marina, alluvionale e palustre oltre che da altro materiale vulcanico proveniente sia dal complesso Somma – Vesuvio che dai campi Flegrei.



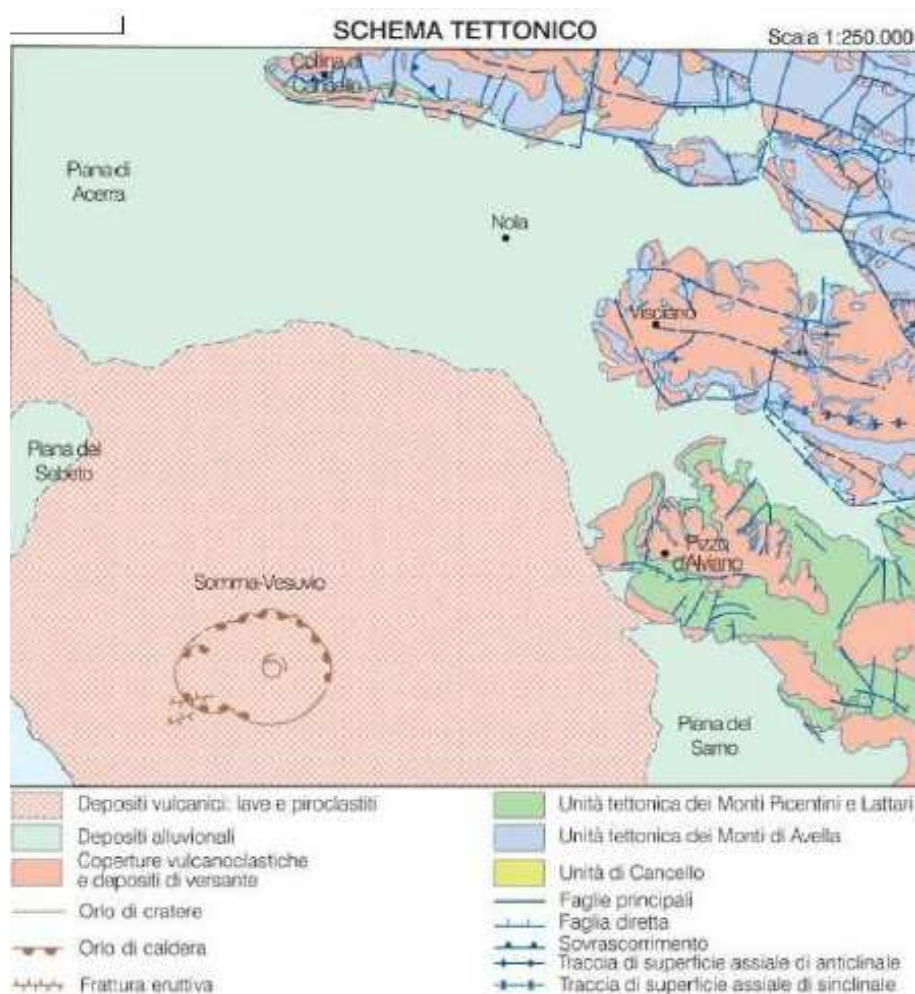


Figura 5-6: Schema Tettonico e Geologico dell'area della piana Campana.

L'intera piana è attraversata da faglie con direzione appenninica e anti-appenninica, caratterizzate con prospezioni gravimetriche in terraferma e profili sismici in mare (elaborato 1.b).

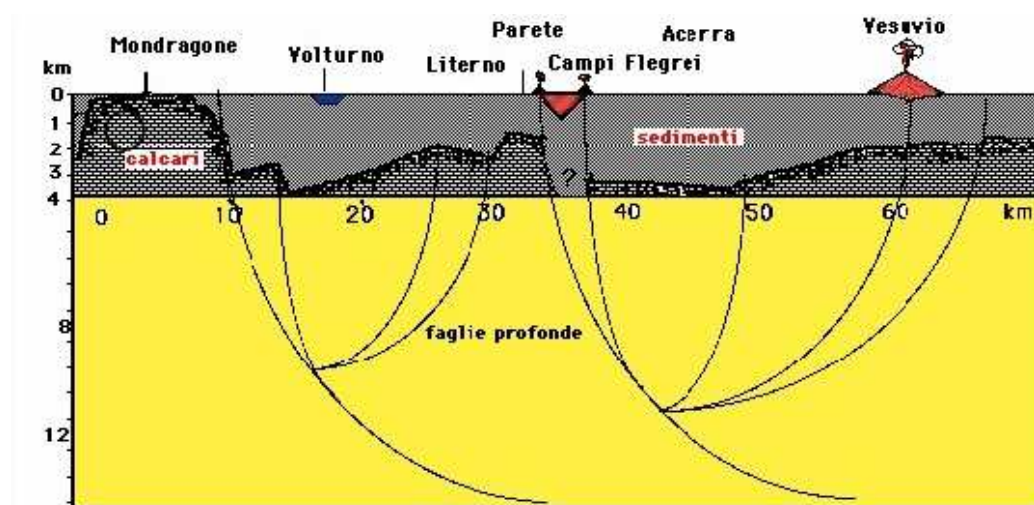


Figura 5-7: Sezione strutturale della piana Campana con la rappresentazione delle faglie presenti nell'area in direzione NW-SE. (elaborato 1.b).

Tali faglie sono anche responsabili dello sprofondamento della fossa tettonica della Piana Campana, generato da processi distensivi (Pliocene sup - Pliocene medio-sup) che inizialmente hanno portato alla formazione del bacino tirrenico e successivamente, migrando verso est, hanno interessato il margine tirrenico campano con la formazione della piana.

Analizzando la (mappa dei valori di pericolosità sismica del territorio nazionale, INGV, 2005) l'area interessata dal tracciato dell'opera ricade in zona sismica 2, caratterizzata da pericolosità media in cui possono verificarsi forti terremoti, con valori di accelerazione massima compresi tra 0.150-0.200 g.

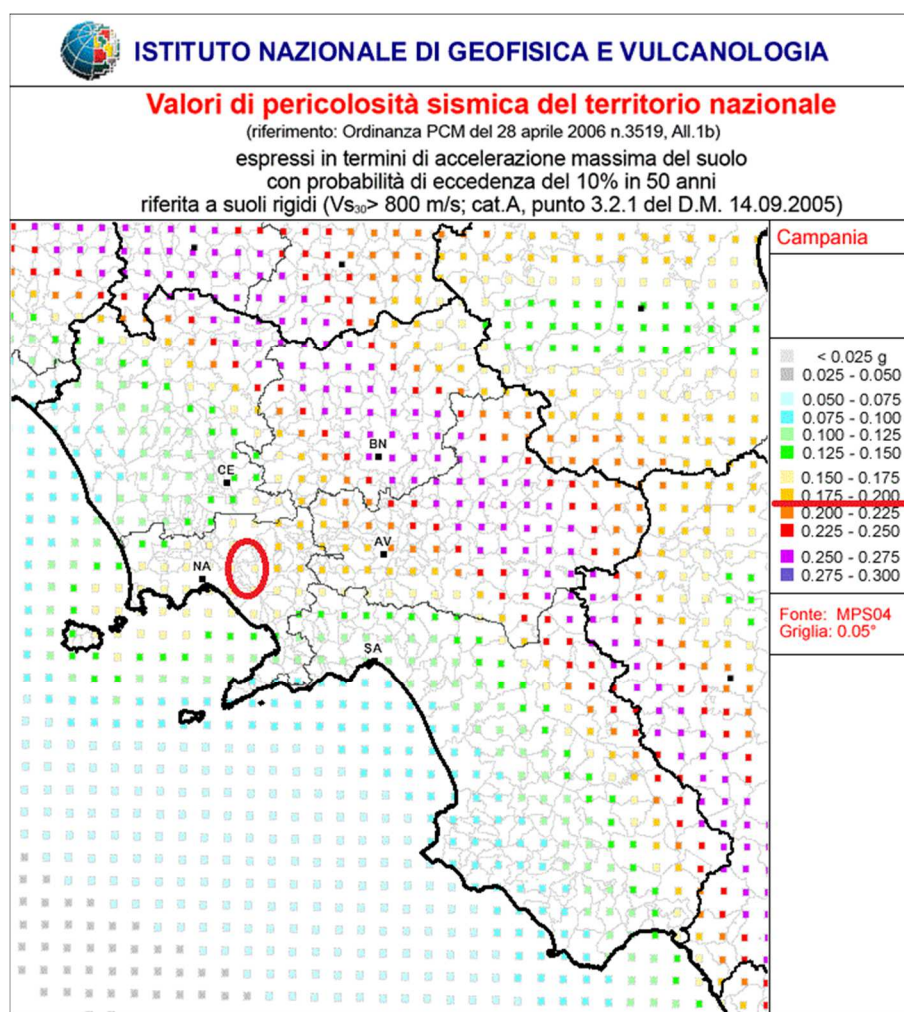


Figura 5-8:Carta della pericolosità sismica della regione Campania (Ingv)

I sondaggi effettuati (elaborato 1.b) lungo il tracciato di progetto hanno consentito di ricostruire il modello geologico-stratigrafico del terreno. che in corrispondenza della Galleria Casalnuovo (da pk 0+550 a pk 2+858) prevede:

- **Terreno di Riporto:** depositi di origine antropica costituiti da ghiaia, sabbie limose e terreno vegetale, di spessore variabile da 1 a 5 m;
- **Depositi piroclastici rimaneggiati (DI):** sabbie limoso-argillose che derivano dal materiale piroclastico e dai depositi fluviali di origine carbonatica contenenti ceneri, lapilli e pomici. Hanno spessore variabile da 2 a 5 metri, ma localmente possono arrivare anche a 10 m circa. Sono caratterizzati da una granulometria fine o medio-fine;
- **Depositi piroclastici di età recente (PO):** sabbie medio-fini in matrice limosa intercalati da orizzonti ghiaiosi. Lo spessore varia dai 4 ai 15 m;
- **Ignimbrite Campana (IC):** tufo campano di colore grigio-marrone-giallastro, poco fratturato e maggiormente alterato nella parte più superficiale. Lo spessore è variabile da 10 a 20 metri circa;
- **Piroclastiti di base (Pb):** tufi sciolti e poco addensati, caratterizzati da una granulometria medio-grossolana. In alcuni punti il confine con l'ignimbrite campana è stato rivenuto a 40-45 metri di profondità rispetto al piano campagna.

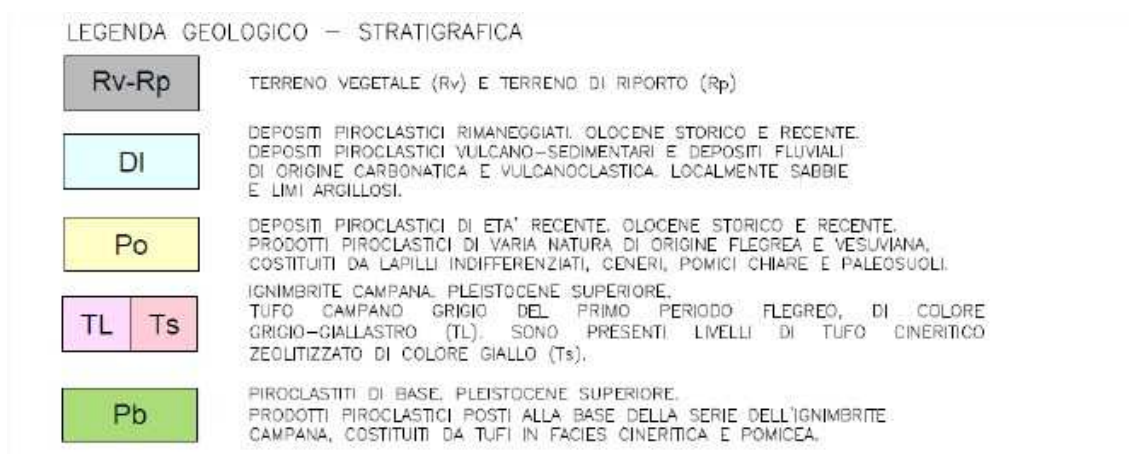


Figura 5-9: Successione stratigrafica dell'area di realizzazione dell'opera.

### 5.2.2 Inquadramento idrogeologico

La piana è caratterizzata da un acquifero sotterraneo principale che interessa gli strati di depositi piroclastici presenti con un limite inferiore di circa 100-150 metri. La ricarica di questo acquifero avviene principalmente per mezzo delle sorgenti presenti al piede dei massicci carbonatici localizzati nei dintorni della piana con una direzione di deflusso prevalente verso il mare. (Figura 5-10)

Ulteriori contributi provengono dall'afflusso meteorico che si infiltra quasi interamente a causa dello scarso ruscellamento superficiale dovuto sostanzialmente alla presenza di una morfologia pianeggiante.

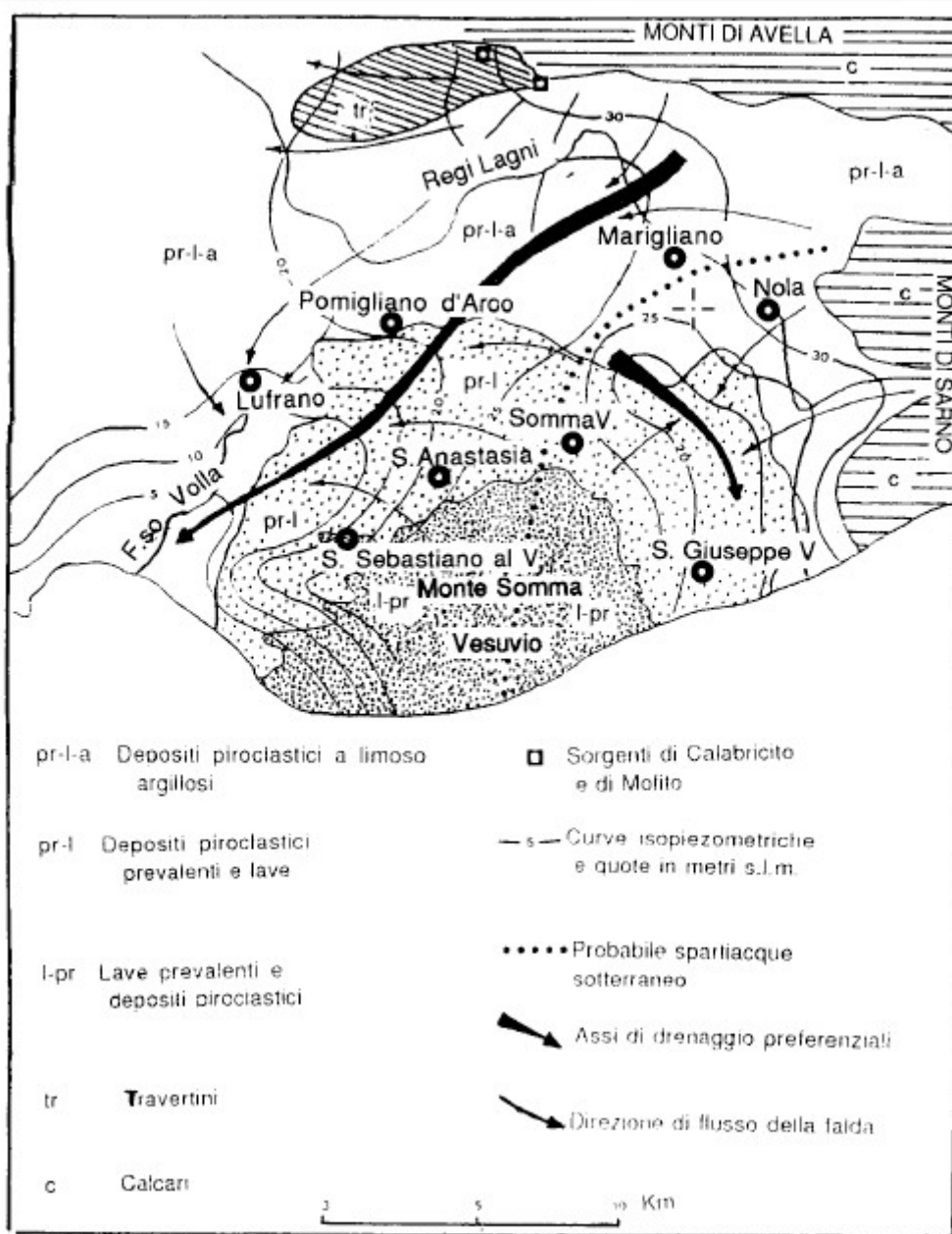


Figura 5-10: Assetto idrogeologico Piana Campana (Celico 1983)

La circolazione idrica, localizzata negli strati piroclastici a granulometria più grossolana, avviene con basse velocità, principalmente a causa del modesto dislivello (30-35metri) tra le sorgenti di alimentazione e il recapito ultimo (mare) ed ha come corsia preferenziale le numerose lenti permeabili presenti nell'acquifero.

Nell'acquifero poroso in oggetto, costituito da un'alternanza di depositi distribuiti in maniera casuale e di varia origine (piroclastici, marini, alluvionali) aventi caratteristiche differenti in termini di permeabilità, si realizza una circolazione idrica a falde sovrapposte, messe in comunicazione tra loro attraverso i litotipi maggiormente permeabili e dalla realizzazione di attività di perforazione profonde (*Celico et al\_1994.*).

L'Ignimbrite campana, presente con continuità sotto la Piana, ha permeabilità relativa inferiore rispetto ai terreni sovrastanti. Conseguentemente, nell'area sono presenti una falda superficiale ed una profonda (poste, rispettivamente, al di sopra e al di sotto delle Ignimbrite campane, che fungono da strato impermeabile).

La realizzazione di pozzi d'acqua ha modificato la circolazione idrica sotterranea, mettendo in connessione gli acquiferi sovrapposti.

Il livello piezometrico generalmente è molto superficiale, e soggetto a variazioni indotte dagli emungimenti, la cui influenza è diminuita negli ultimi 20 anni per la riduzione degli usi a scopo idropotabile.

La regimazione e il deflusso delle acque superficiali della Piana Campana è ben garantito sia da un reticolo idrografico naturale, sia dalle opere di canalizzazione artificiale presenti (Regi Lagni).

Il bacino dei Regi Lagni (1095 km<sup>2</sup>) è costituito da opere di canalizzazione principali e secondarie e da vasche di laminazione realizzate a partire dal 1600 con lo scopo di bonificare l'area dell'agro campano. Il sistema drena le acque superficiali delle zone con una maggior quota direttamente nel canale principale del Lago Maestro, mentre le acque più basse defluiscono in due controfossi limitrofi al canale laterale.

Nel corso delle indagini preliminari sono state svolte prove di permeabilità utilizzando due differenti tecniche a seconda delle condizioni del terreno in cui venivano svolte: prova Lefranc a carico variabile (in materiali incoerenti e granulari) e prova Lugeon (in materiali litoidi); oltre all'installazione di piezometri per misurare e definire i livelli massimi e minimi di falda.

Le prove di permeabilità hanno restituito valori dell'ordine di  $10^{-4} - 10^{-7}$  m/s che, insieme alla morfologia prevalentemente pianeggiante dell'area, favoriscono l'infiltrazione delle acque superficiali rispetto al ruscellamento, favorendo così la ricarica delle falde e l'oscillazione dei livelli piezometrici.

### 5.3 PROGETTO ESECUTIVO DELLA GALLERIA CASALNUOVO. DESCRIZIONE E ANALISI CRITICA CON APPLICAZIONE DELLE BUONE PRATICHE

La galleria artificiale Casalnuovo (GA01) si sviluppa per circa 2309 m (da pk 0+551.00 a 2+860), attraverso i Comuni di Casoria, Casalnuovo e Afragola. L'area interessata dagli scavi, scarsamente urbanizzata, è caratterizzata da attività industriali e terreni coltivati.

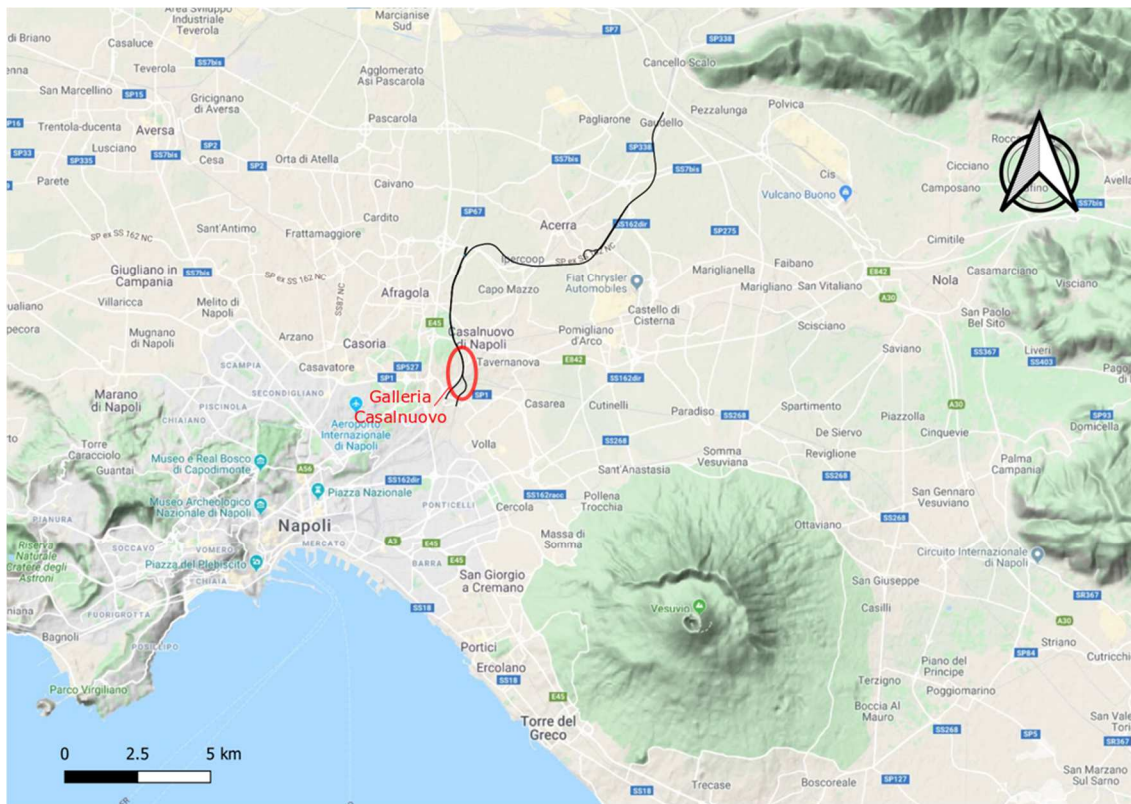
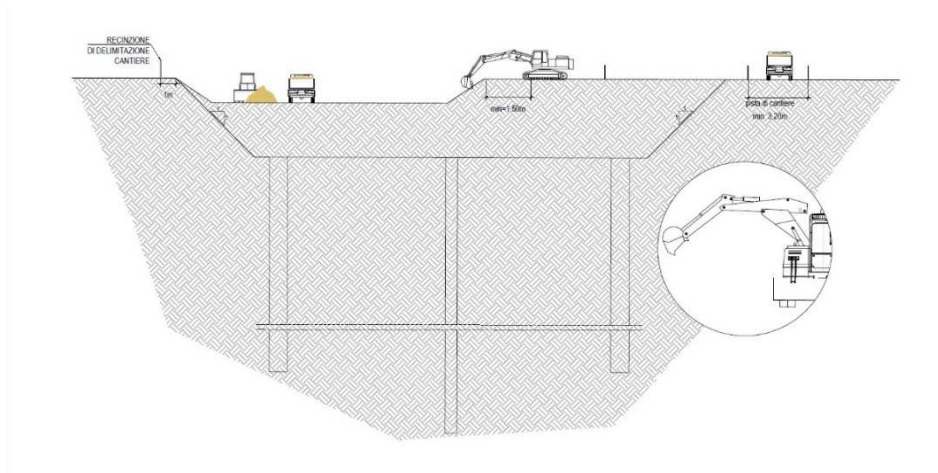


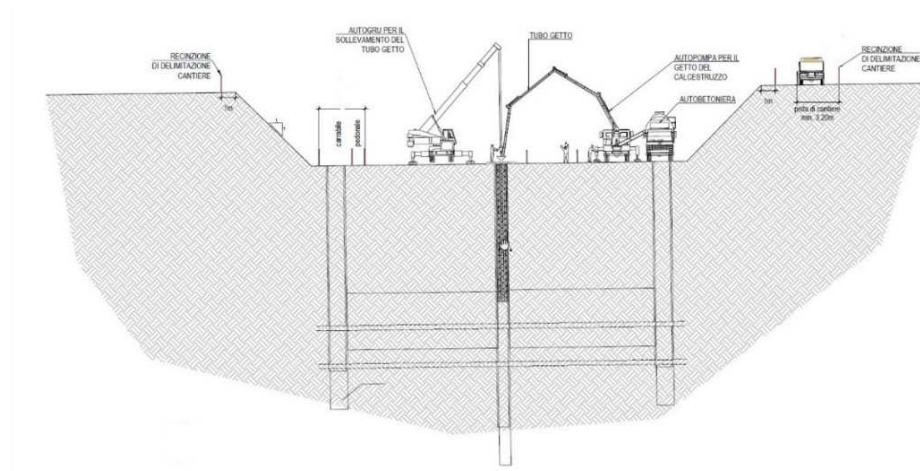
Figura 5-11: Inquadramento geografico dell'opera.

La galleria Casalnuovo sarà realizzata, per la maggior parte del suo sviluppo, con “metodo Milano”, che si articolerà nelle seguenti fasi realizzative:

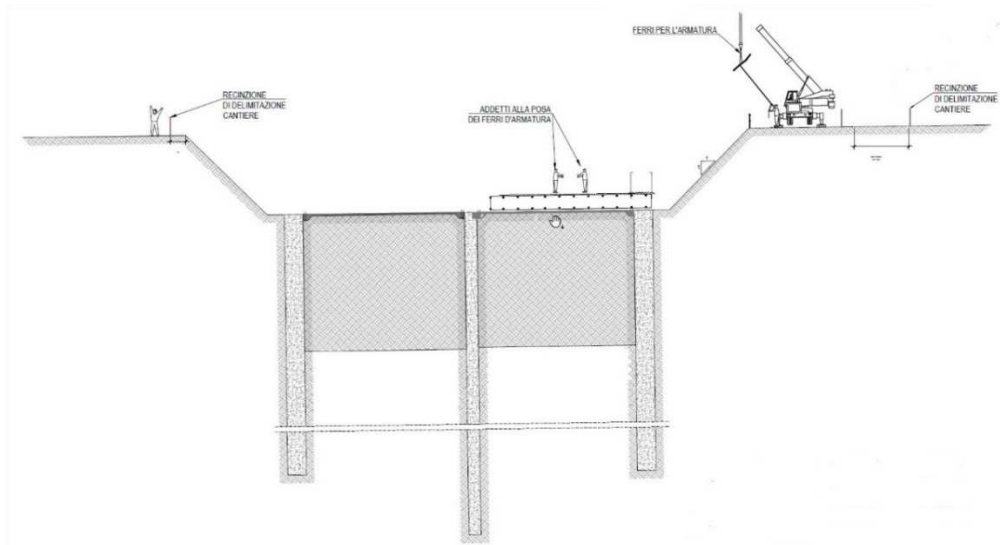
1. Prescavo di sbancamento fino alla quota di intradosso della copertura con spostamento dei sottoservizi presenti;



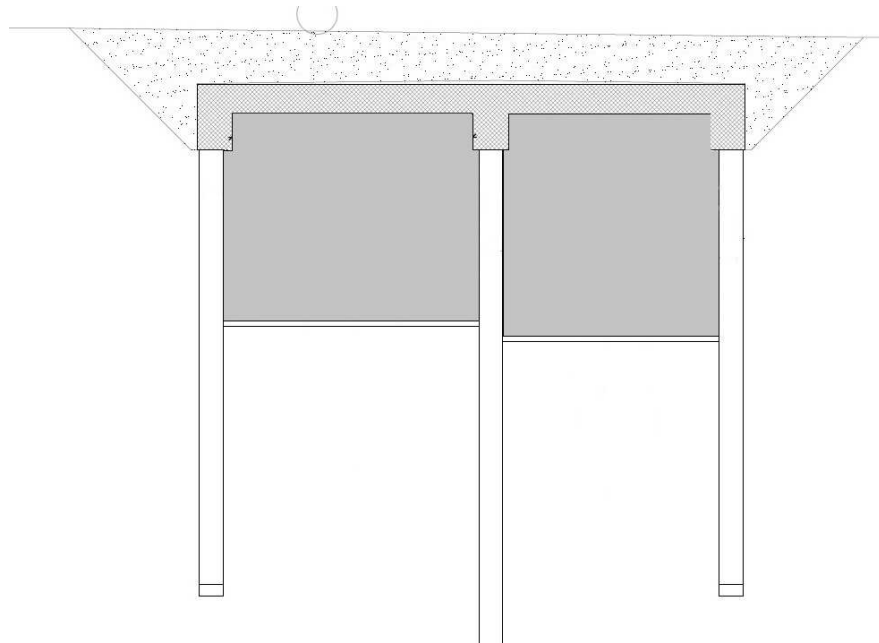
2. Scavo con l'ausilio di fanghi bentonitici e getto dei diaframmi verticali in calcestruzzo armato;



3. Realizzazione del solettone armato di copertura, che insieme ai diaframmi verticali completa lo scatolare della galleria;

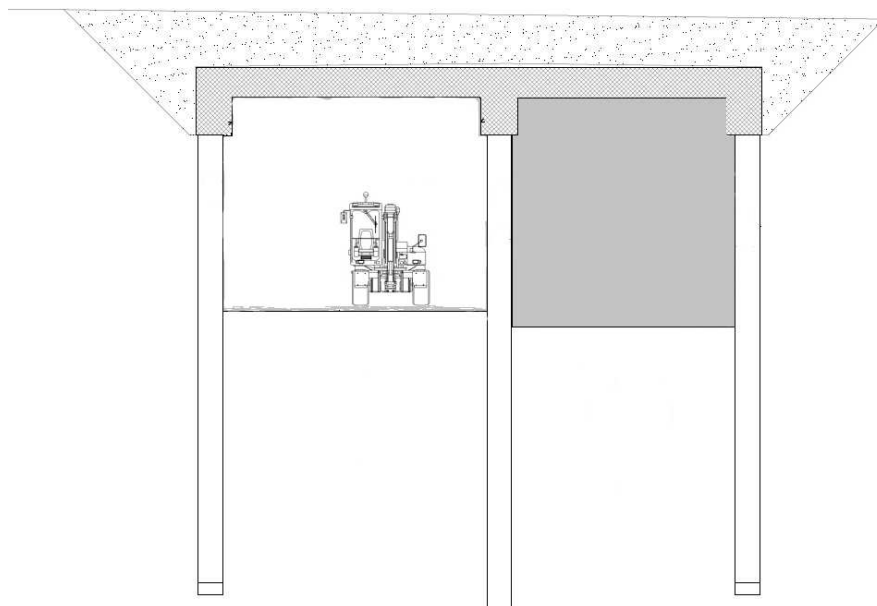


4. Ritombamento dello scavo fino alla quota originale del piano campagna e ripristino dello stato dei luoghi;

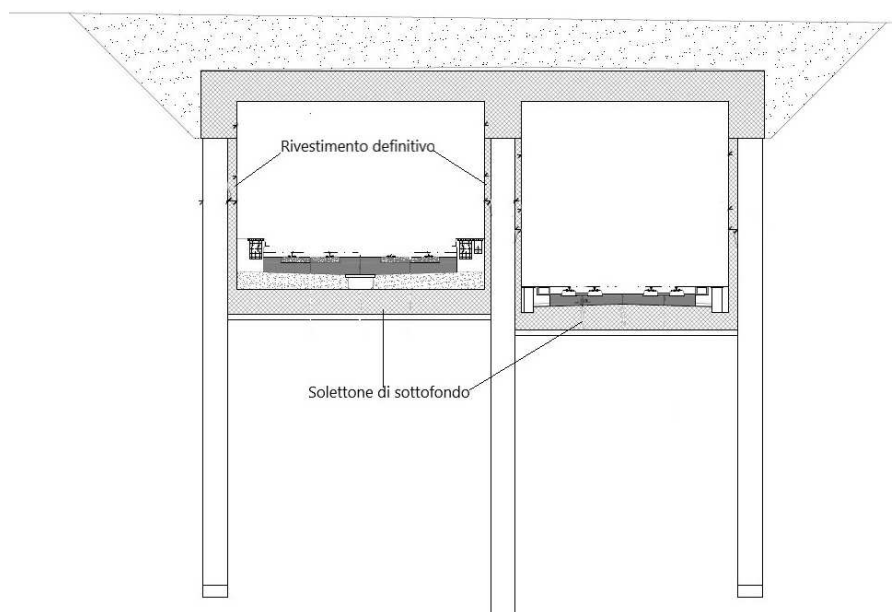


5. Scavo del terreno all'interno dello scatolare;





6. Realizzazione delle strutture definitive interne in calcestruzzo armato (rivestimento, solettone di sottofondo ed impermeabilizzazione).



L'intera lunghezza della galleria verrà realizzata con diverse sezioni tipo, opportunamente scelte a seconda delle caratteristiche del terreno, della falda, della profondità di scavo e delle esigenze costruttive (elaborato 1.a):

- da pk 0+550 a pk 0+730: realizzazione di una galleria parapioggia, con sezione tipo scatolare realizzata per conci (sezione tipo A - Figura 5-12). Considerata la minima interferenza con la falda presente (0.8 m di battente idraulico medio) il progetto prevede la messa in opera di palancole e l'installazione di un sistema di pompaggio (wellpoint) per ridurre il livello piezometrico durante la fase di scavo;

- da pk 0+730 a pk 1+060 scavo a singola canna con metodo Milano, secondo la sequenza già descritta (sezione tipo B - Figura 5-13).
- da pk1+060 a pk 2+861 scavo a doppia canna con metodo Milano (sezione tipo C1- Figura 5-14). In alcuni tratti, a causa della maggior luce e del notevole dislivello tra la sommità della galleria e il piano campagna, si realizzerà una soletta intermedia (piano mezzanino) che funge da puntone tra i due diaframmi longitudinali (sezione tipo H - Figura 5-15).

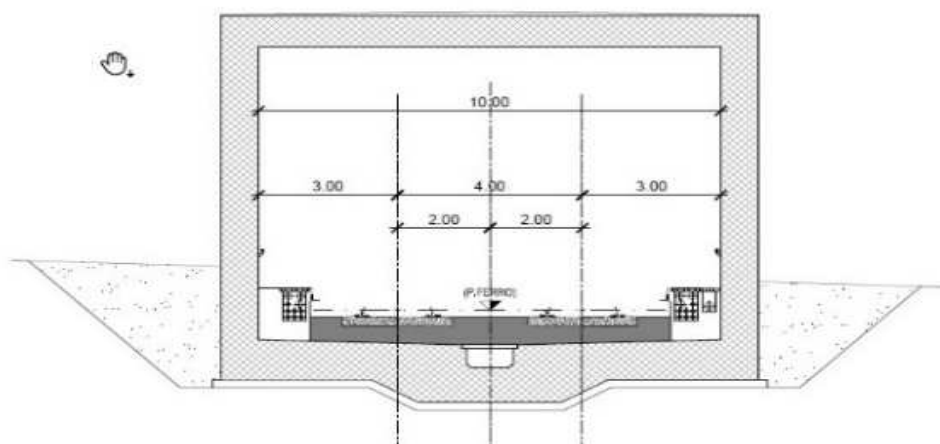


Figura 5-12: Sezione trasversale in galleria, tipo A (da elaborato 1.f)

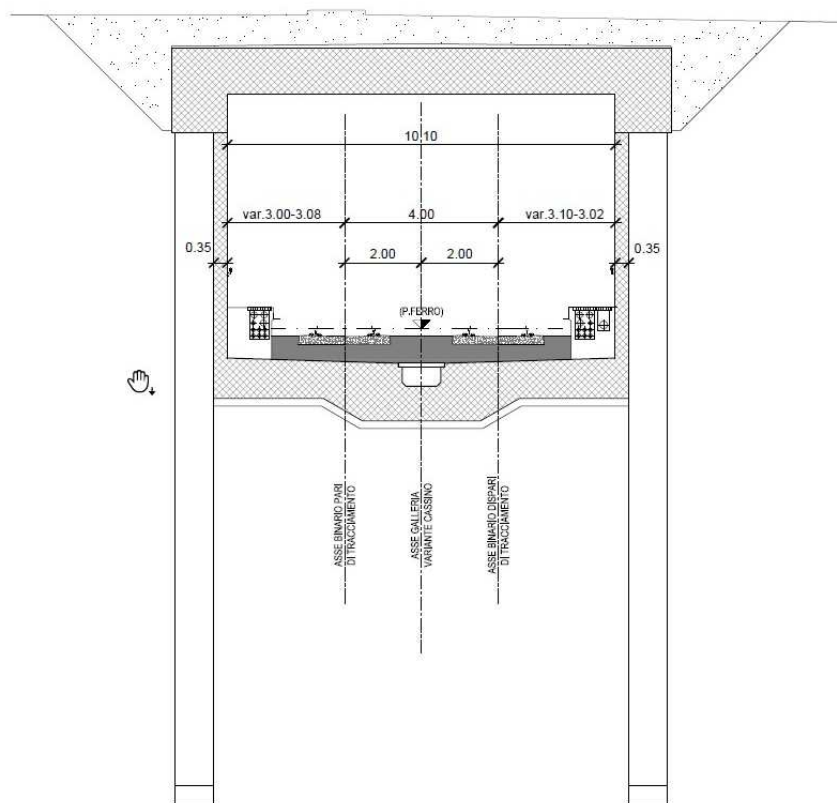


Figura 5-13: sezione trasversale in galleria: tipo B (da elaborato 1.f)

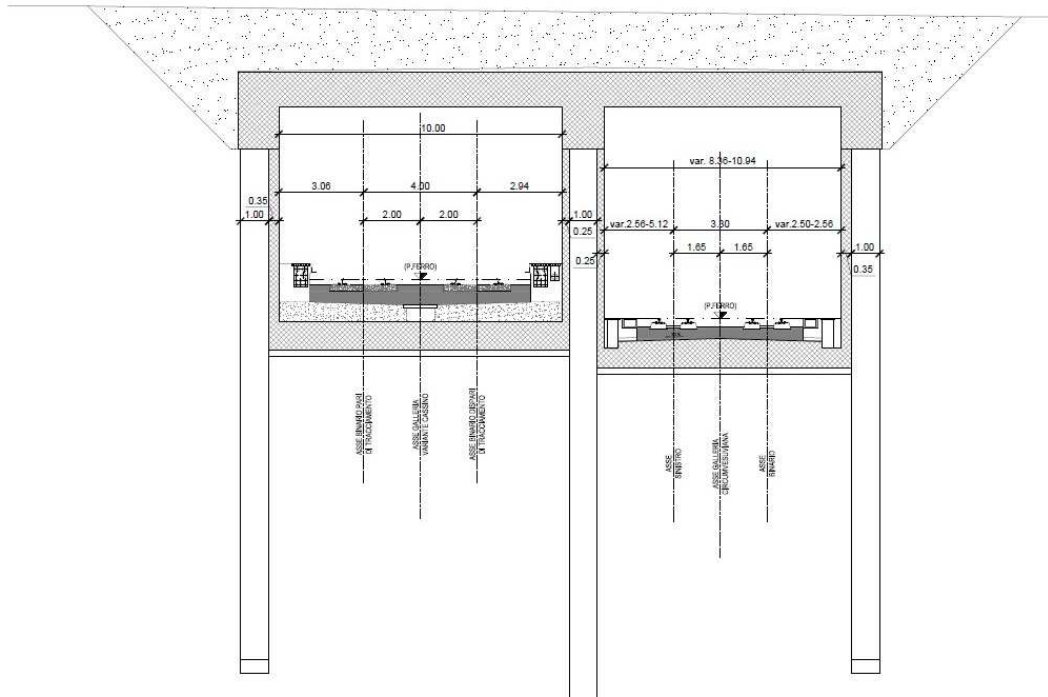


Figura 5-14: sezione trasversale a doppia canna in galleria: tipo C1 (da elaborato 1.f)

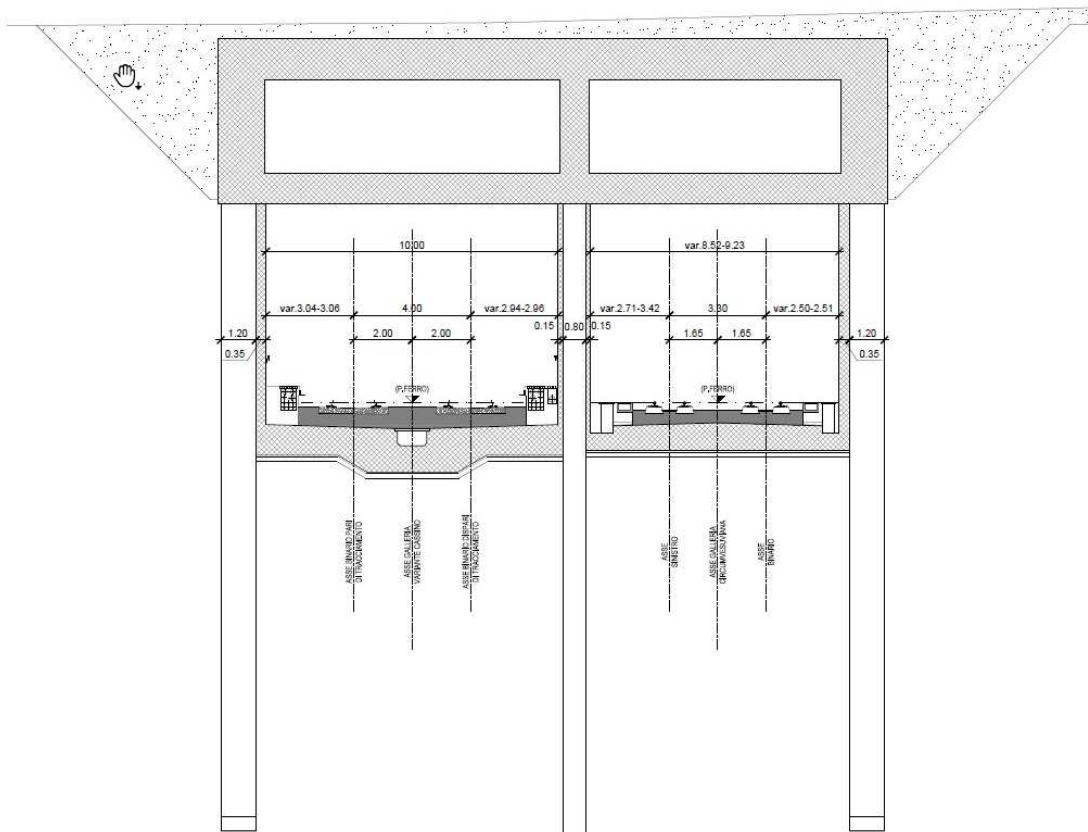


Figura 5-15: Sezione trasversale a doppia canna con piano mezzanino di tipo H. (da elaborato 1.f)

Dalle indagini idrogeologiche (elaborato 1.b) è emersa la presenza di una falda acquifera interferente con il tracciato della galleria, da pk 0+551 a pk 1+600.

In un tratto di circa 600 metri (tra la pk 0+730 e la pk 1+337.65), in cui il livello della falda al di sopra del fondo scavo oscilla tra 8.83 m e 0.51 m, si è optato per lo scavo in atmosfera iperbarica, in alternativa al jet grouting previsto dal Progetto Definitivo. Nella restante parte del tratto interferente con la falda acquifera, dati i bassi livelli di falda e la modesta spinta dell'acqua, si adotterà la tecnica del solettone sommerso di sacrificio, realizzato in calcestruzzo armato.

Il tratto da scavare in atmosfera iperbarica è stato suddiviso in 12 compartimenti, di lunghezza variabile, più altri 2 compartimenti (13-14) in corrispondenza dell'innesto con la linea Circumvesuviana. La suddivisione sarà realizzata con diaframmi provvisori posti in senso trasversale all'asse della galleria, senza funzione strutturale ed abbattuti in successione con l'avanzamento degli scavi.

La lunghezza dei compartimenti è stata determinata in relazione ai livelli piezometrici lungo il tracciato, in modo da favorire un miglior controllo delle operazioni di pressurizzazione.

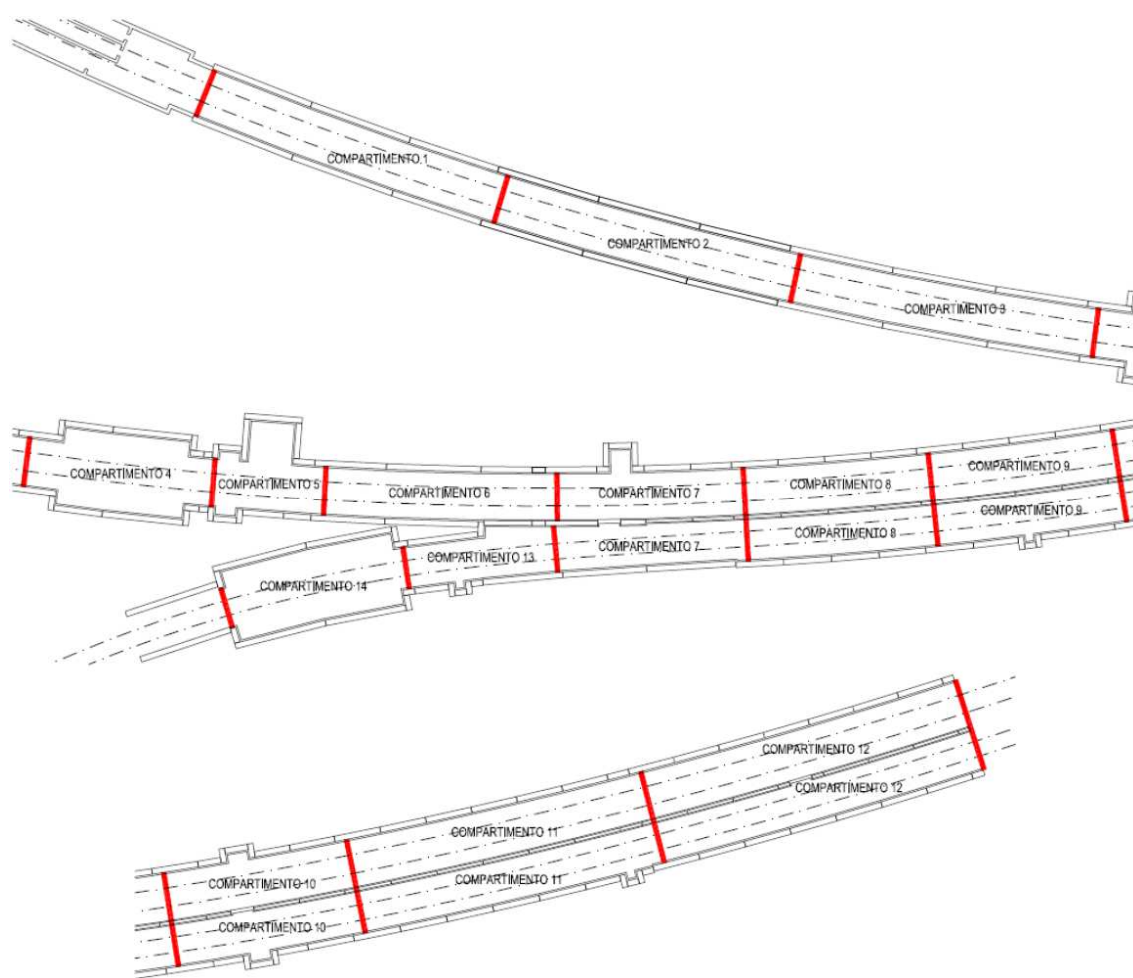


Figura 5-16: Planimetria della galleria Casalnuovo con la suddivisione dei compartimenti da realizzare in condizioni iperbariche (da elaborato 1.a)

Ad ogni compartimento è stato quindi associato il corrispettivo valore massimo del livello di falda, da cui dipende la sovrappressione necessaria ad abbassare il livello piezometrico al di sotto del piano di fondo scavo.

Tabella 6: Caratteristiche dei singoli compartimenti di suddivisione

| Compartimento | L (m) | Sezione tipo | Canna (singola / doppia)     | Livello falda (m) al di sopra del fondo scavo | Pressione (bar) |
|---------------|-------|--------------|------------------------------|---|-----------------|
| 1             | 65,00 | B            | singola                      | 1,82  | 0,3             |
| 2             | 65,00 | B            | singola                      | 3,44  | 0,5             |
| 3             | 65,00 | B            | singola                      | 4,25  | 0,6             |
| 4             | 40,70 | B            | singola                      | 4,62  | 0,6             |
| 5             | 24,30 | B            | singola                      | 8,83  | 1,0             |
| 6             | 50,00 | B e C1       | singola                      | 5,19  | 0,7             |
| 7             | 40,00 | C1 e C2      | doppia                       | 5,86  | 0,7             |
| 8             | 40,00 | C2           | doppia                       | 5,15  | 0,7             |
| 9             | 40,00 | C            | doppia                       | 4,76  | 0,6             |
| 10            | 40,00 | C            | doppia                       | 3,87  | 0,5             |
| 11            | 65,00 | D            | doppia                       | 2,25  | 0,4             |
| 12            | 72,65 | D            | doppia                       | 0,51  | 0,2             |
| 13            | 33,10 | B1           | singola<br>(Circumvesuviana) | 6,73  | 0,8             |
| 14            | 38,50 | B1 e C1      | singola<br>(Circumvesuviana) | 7,60  | 0,9             |

Tutti i compartimenti verranno realizzati in atmosfera iperbarica ad eccezione del compartimento numero 1, dove il livello di falda risulta essere molto inferiore rispetto alla mezzieria dell'altezza di scavo. In questo caso verrà prima scavato il volume di terreno posto sopra falda in ambiente atmosferico poi si procederà all'abbassamento fino alla quota di fondo scavo tramite l'ausilio di sistemi di wellpoint (Figura 5-17). Lo scavo sarà effettuato con escavatore cingolato ed il trasporto del marino sarà eseguito con dumpers. Una volta completato il rivestimento e l'impermeabilizzazione definitiva del compartimento 1 si procederà all'installazione delle camere di compensazione e delle dotazioni necessarie all'applicazione ed al mantenimento della sovrappressione.

Lo scavo (dal compartimento 2 al 14) in atmosfera iperbarica verrà realizzato con metodo a piena sezione, utilizzando un mezzo cingolato ad alimentazione elettrica dotato di benna o martello demolitore oltreché di un sistema automatico di smarino (Figura 5-18). Il marino sarà conferito, tramite un nastro trasportatore installato sotto la copertura della galleria, in una vasca di stoccaggio temporaneo. Nei tratti a doppia canna (dal compartimento numero 7 al numero 12), l'avanzamento sarà effettuato con scavo contemporaneo dei due fronti adiacenti.

Per il tratto realizzato in aria compressa (compartimenti 2-14) si prevedono le seguenti fasi realizzative:

- Pressurizzazione del compartimento fino a livello prestabilito;
- Perforazione e demolizione diaframma trasversale;
- Esecuzione dello scavo a piena sezione fino al termine del compartimento, con contemporaneo avanzamento dell'installazione del nastro trasportatore;
- Posa del sistema di impermeabilizzazione e getto dei rivestimenti definitivi fino a 2 metri dal diaframma trasversale successivo.

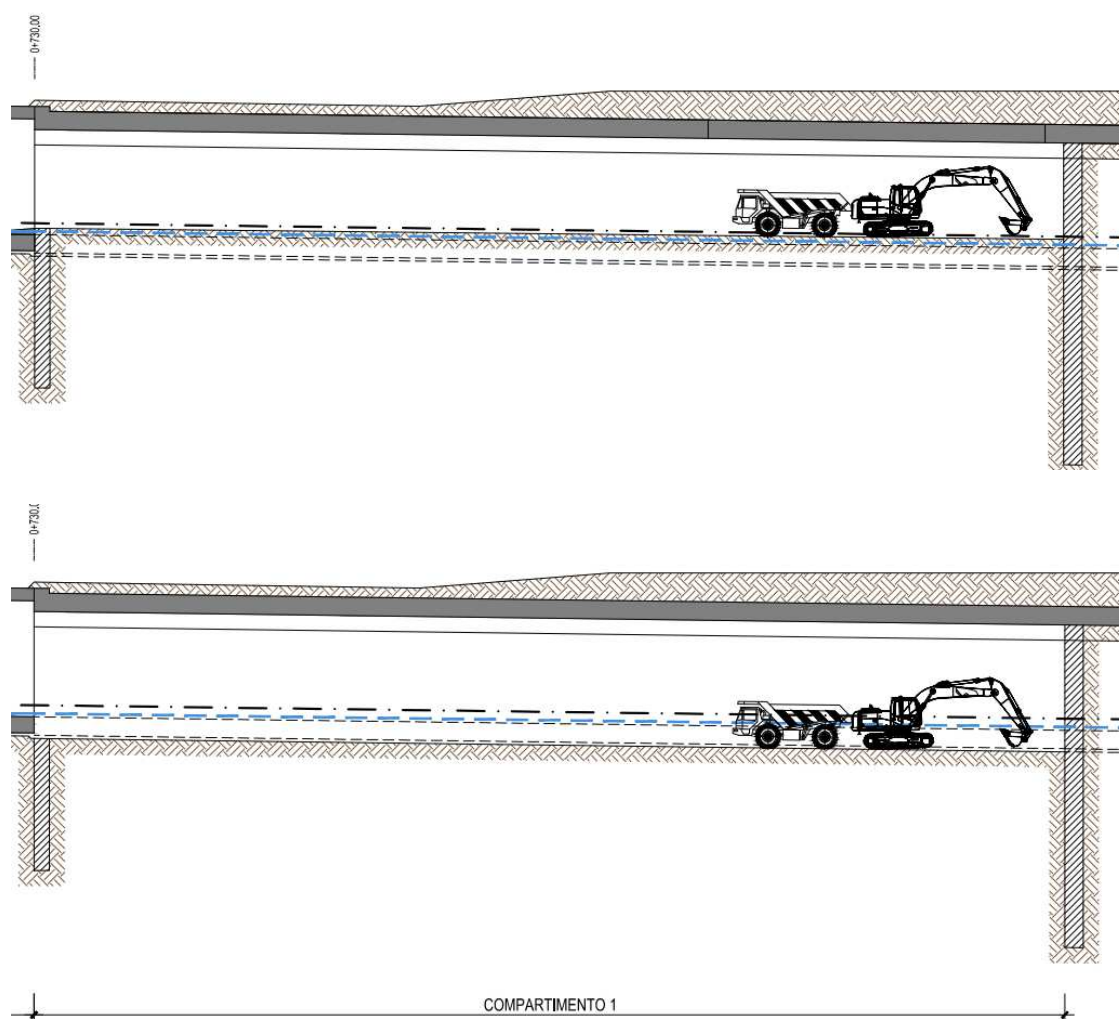


Figura 5-17: Scavo del compartimento numero 1. Avanzamento del fronte sopra la piezometrica (sopra), abbassamento fino alla quota di fondo con l'ausilio del sistema di wellpoint (sotto). (da elaborato 2.a)

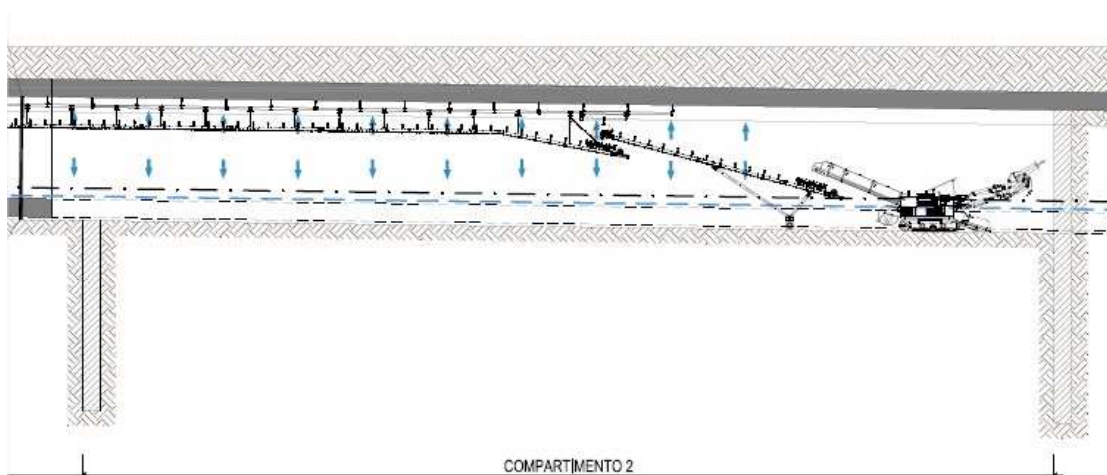


Figura 5-18: Fasi realizzative del compartimento 2, scavo sopra e sottofalda in atmosfera iperbarica, installazione del nastro trasportatore per il marino.(da elaborato 2.a)

Il progetto non tiene conto di un eventuale blocco delle attività di scavo prima del completamento di un compartimento. Nel caso in cui ci fosse un'interruzione dell'avanzamento per un periodo di tempo maggiore del tempo di autosostentamento del materiale scavato, (emergenza, ripristino o manutenzione delle attrezzature, blocco lavorazioni) risulta opportuno stabilizzare temporaneamente il fronte attraverso una riprofilatura dello stesso con un'inclinazione conforme all'angolo di attrito interno caratteristico del materiale ed attraverso l'applicazione di un rivestimento provvisorio realizzato con spritz beton necessario sia a stabilizzare il fronte oltre che a limitare le perdite di pressurizzazione nel periodo di blocco delle lavorazioni.

### 5.3.1 Modello idrogeologico e monitoraggio della falda acquifera

Per una corretta gestione della tecnologia e per garantire condizioni di massima sicurezza per i lavoratori impegnati nello scavo in atmosfera iperbarica è fondamentale caratterizzare l'acquifero sotterraneo (livelli piezometrici ed oscillazioni, fenomeni di ricarica, ecc.) e i terreni presenti lungo il tracciato in termini di permeabilità all'aria.

La caratterizzazione del terreno e della falda nei pressi del tracciato della Galleria Casalnuovo è avvenuta tramite la realizzazione di 9 sondaggi a foro continuo, 5 dei quali utilizzati per l'installazione dei piezometri. Sono stati inoltre previsti ulteriori 9 piezometri integrativi (con profondità 30 metri) con lo scopo di monitorare i livelli piezometrici durante lo scavo della galleria.

Tabella 7: Lista dei piezometri utilizzate per la caratterizzazione ed il monitoraggio della falda.

| Sondaggio | Tipo Indagine | Profondità (m) | Carotaggio     |
|-----------|---------------|----------------|----------------|
| E1PZ      | Piezometro    | 30             | Rec. di nucleo |
| E2DH      | Down hole     | 30             | Rec. di nucleo |
| E3PZ      | Piezometro    | 30             | Rec. di nucleo |
| E4PZ      | Piezometro    | 30             | Rec. di nucleo |
| E5PZ      | Piezometro    | 40             | Rec. di nucleo |
| ECPT1     | Cpt           | 40             | Rec. di nucleo |
| E6PZ      | Piezometro    | 40             | Rec. di nucleo |
| E7        | Sondaggio     | 40             | Rec. di nucleo |
| E8DH      | Down hole     | 40             | Rec. di nucleo |
| E43PZ     | Piezometro    | 30             | -              |
| E44PZ     | Piezometro    | 30             | -              |
| E45PZ     | Piezometro    | 30             | -              |
| E46PZ     | Piezometro    | 30             | -              |
| E47PZ     | Piezometro    | 30             | -              |
| E48PZ     | Piezometro    | 30             | -              |
| E49PZ     | Piezometro    | 30             | -              |
| E50PZ     | Piezometro    | 30             | -              |
| E51PZ     | Piezometro    | 30             | -              |

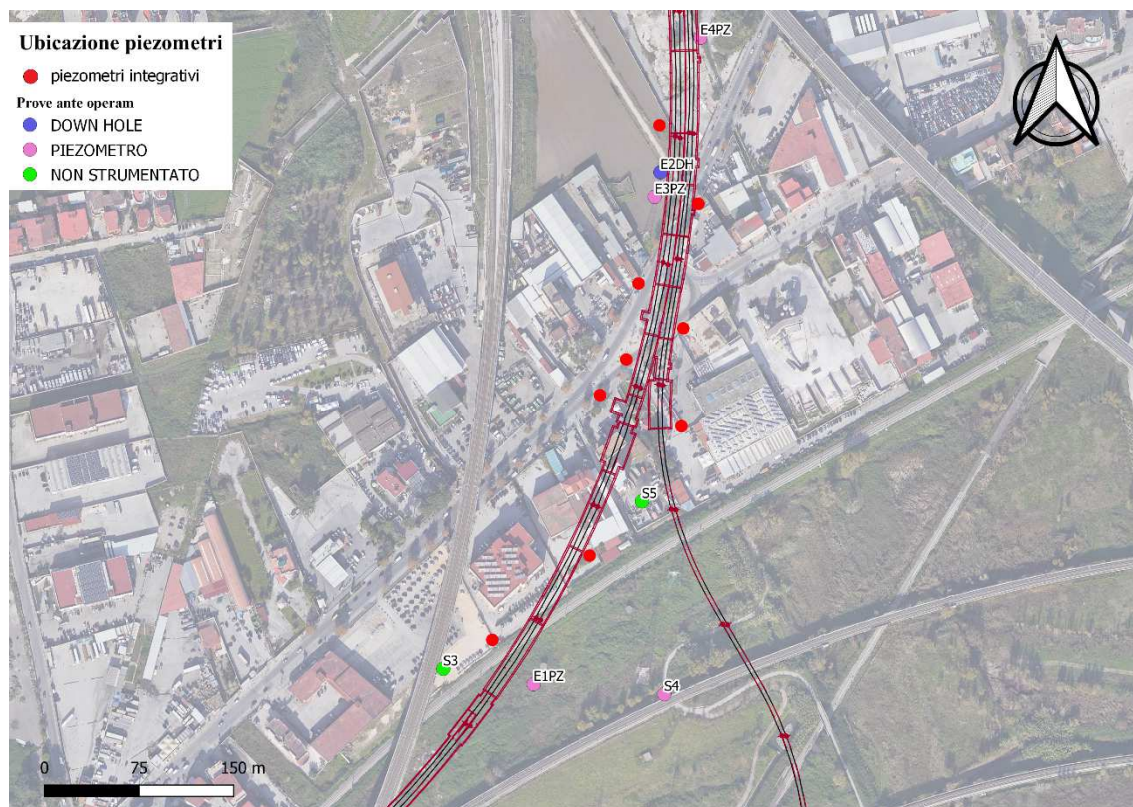


Figura 5-19: Ubicazione dei piezometri integrativi (pallino blu) e delle prove ante operam nei pressi del tracciato della galleria Casaluovo.



Tramite prove di permeabilità di tipo (Lugeon e Lefranc) sono stati ricavati i valori di permeabilità all'acqua dei vari litotipi presenti:

Tabella 8: Valori di permeabilità all'acqua nei litotipi incontrati

| Unità litologica                            | Permeabilità (m/s)     |
|---|------------------------|
| terreno vegetale e di riporto (Rv – Rp)     | $10^{-7} \div 10^{-3}$ |
| depositi piroclastici rimaneggiati (Di)     | $10^{-6} \div 10^{-3}$ |
| depositi piroclastici di età recente (Po)   | $10^{-8} \div 10^{-3}$ |
| ignimbrite campana (Ic), tufo alterato (Ts) | $10^{-7} \div 10^{-4}$ |

Secondo quanto indicato nell'elaborato "Relazione di calcolo pressioni avanzamento"(elaborato 1.g) il valore di permeabilità all'aria è stato ricavato, utilizzando una correlazione empirica, dai valori di permeabilità all'acqua misurati durante le indagini effettuate. È stato assunto un rapporto  $k_a/k_w$  pari a 70 alla temperatura di 10°C.

Questo metodo può risultare utile in fase di progettazione definitiva per ottenere una stima di massima della permeabilità all'aria, ma per ottenere un valore utile ad un corretto controllo delle sovrappressioni è necessario eseguire prove specifiche (come descritto nel paragrafo 4.1.1)

Dalle indagini preliminari si è anche dedotto il modello idrogeologico nell'area limitrofa al tracciato della galleria Casalnuovo, caratterizzato da:

- Livello di falda variabile tra 12 e 22 m s.l.m.;
- Soggiacenza compresa tra 2.5 e 23 m;
- Variazioni del livello piezometrico comprese tra 1 e 5 m;
- Deflusso con basse velocità e basso gradiente idraulico (0.1%).

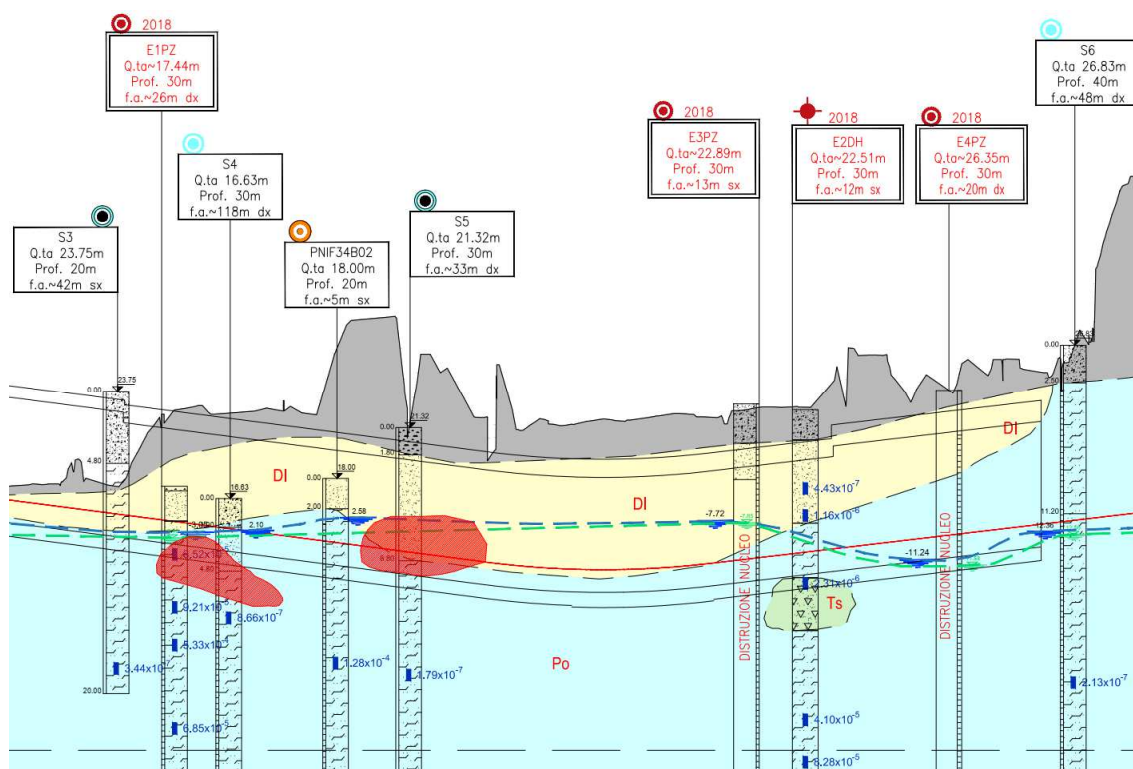


Figura 5-20: Profilo idrogeologico lungo il tracciato della galleria Casalnuovo. (da elaborato 1.e)

Il piano di monitoraggio dei livelli piezometrici definito dal Progetto Esecutivo (elaborato 1.f) prevede le seguenti letture:

- **Lettura 0:** misura iniziale del livello piezometrico effettuata al termine dell'installazione dei piezometri;
- **Lettura durante la fase di scavo:** una lettura ogni:
  - o 7 giorni per i piezometri posti in corrispondenza del compartimento adiacente a quello in corso di scavo;
  - o 15 giorni per i piezometri posti in corrispondenza dei compartimenti successivi a quello in corso di scavo;
  - o 15 giorni per i piezometri in corrispondenza dei compartimenti già scavati, fino al termine dei lavori in atmosfera iperbarica.

Inoltre, si considera che tale frequenza di lettura potrà essere incrementata nel caso in cui si notassero variazioni significative del livello piezometrico rispetto a quello considerato in fase di progettazione.

La misurazione verrà effettuata manualmente da un operatore e i dati ottenuti verranno raccolti in un database digitale che verrà trasmesso alla Direzione Lavori ed al Progettista,

i quali in caso di discostamento dai valori attesi, dovranno valutare le opportune contromisure da attuare per evitare venute d'acqua all'interno della camera di lavoro.

Il Progetto Esecutivo non approfondisce le possibili influenze, sui livelli piezometrici, determinate dai contributi antropici locali (emungimento d'acqua dai pozzi presenti), da eventi meteorici e dalla presenza di aree esondabili. Tali fattori potrebbero comportare repentine variazioni dei livelli piezometrici, con conseguenti rischi per le attività di scavo e per la sicurezza dei lavoratori, soprattutto in relazione alla frequenza ed alle modalità previste per la lettura dei piezometri. Oltretutto non prevede l'esecuzione di campagne annuali di monitoraggio da svolgere in fase di progettazione preliminare in maniera tale da valutare le fluttuazioni stagionali del livello di falda. Considerando che la prima parte del tracciato (pk 0+000 a pk 1+000) è ubicata nelle immediate vicinanze del Fosso Volla, ricadente in un'area P1 (zona a pericolosità alluvioni bassa) con tempi di ritorno di 300-500 anni, non si può omettere la possibilità che durante la fase di costruzione o di esercizio dell'opera si possano verificare eventi meteorologici intensi capaci di causare un allagamento della zona di imbocco della galleria o un repentino innalzamento dei livelli di falda dovuto ad un maggior contributo d'infiltrazione.

Per garantire maggiori condizioni di sicurezza occorre, oltre ad approfondire i fattori indicati nel capoverso precedente, adottare un diverso sistema di monitoraggio dei livelli di falda in fase di scavo, caratterizzato da una maggiore frequenza di lettura con intervalli di misurazione non superiori ad un'ora nel compartimento in fase di scavo e con cadenza giornaliera in quelli adiacenti.

Una lettura di questo tipo svolta in modalità manuale risulterebbe troppo onerosa e difficilmente gestibile in maniera efficace. È necessario implementare un sistema di acquisizione e trasmissione automatica delle letture, come descritto nel paragrafo 0, in grado di rendere le informazioni disponibili in tempo reale al Manager delle Operazioni Iperbariche (MOI) ed al direttore di cantiere, che dovranno regolare il livello di pressurizzazione in camera di lavoro in funzione delle eventuali variazioni (rispetto ai valori piezometrici attesi) riscontrate dal sistema di monitoraggio.

Attraverso questo approccio si consegue una gestione dinamica del sistema di pressurizzazione garantendo una maggiore e più sicura gestione della fase di scavo in ambiente iperbarico.

Inoltre, particolare attenzione va posta nella dislocazione dei piezometri lungo il tracciato, affinché il monitoraggio piezometrico sia efficace ed uniformemente distribuito per caratterizzare l'intera area di progetto.

Infine, occorre considerare che l'applicazione della sovrappressione in camera di lavoro induce, nelle immediate vicinanze della galleria, un aumento transitorio del livello di falda originario.

### 5.3.2 Realizzazione dei diaframmi

La costruzione della galleria, realizzata attraverso il metodo Milano prevede la realizzazione di diaframmi come opere di fondazione e di sostegno dello scavo, queste opere si estendono sino ad una profondità di 30 metri attraversando gli strati di Piroclastici recenti (PO) sino allo strato di Ignimbrite Campana (IC).

La realizzazione a regola d'arte dei diaframmi, del solettone di copertura e dei relativi sistemi di impermeabilizzazione tra gli stessi è indispensabile per garantire la tenuta idraulica degli elementi al fine di evitare perdite di pressurizzazione e infiltrazioni d'acqua di falda.

Per prevenire perdite d'aria e venute d'acqua, i progettisti hanno previsto particolari soluzioni d'impermeabilizzazione sia nella realizzazione dei diaframmi che nella realizzazione del rivestimento definitivo della galleria. I punti critici per l'impermeabilità sono localizzati nei giunti strutturali (connessione copertura-diaframmi laterali, riprese di getto) e nei punti di giunzione dei pannelli primari e secondari che formano i diaframmi laterali.

Secondo quanto indicato nella "relazione calcolo pressioni avanzamento" (elaborato 1.g) l'impermeabilità dei pannelli primari e secondari sarà garantita dall'installazione di sistemi waterstop e dalla sagomatura maschio-femmina della giunzione tra i pannelli adiacenti (Figura 5-21).

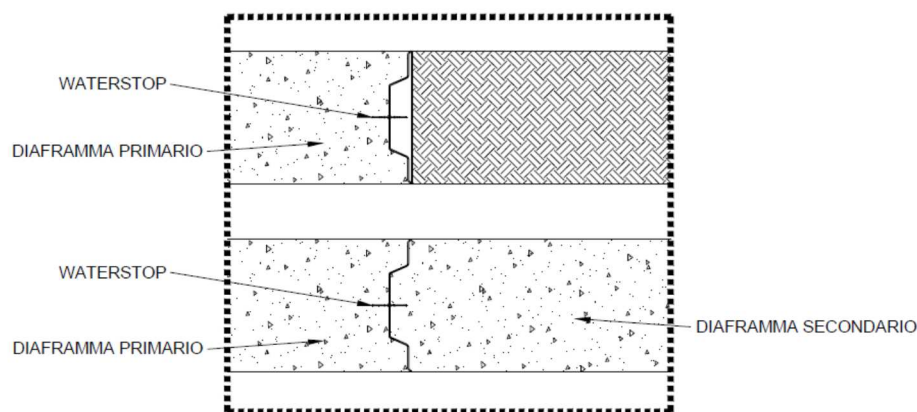


Figura 5-21: Realizzazione dei giunti tra i pannelli primari e quelli secondari (da elaborato I.g)

Considerando che l'opera si trova in una zona con pericolosità sismica 2, come precedentemente indicato nel paragrafo (5.2.1), occorre porre particolare attenzione alle conseguenze che un eventuale sisma potrebbe avere sia durante la fase di costruzione che in quella di esercizio dell'opera. In particolare, il verificarsi di un sisma durante la fase di costruzione della parte di galleria Casalnuovo realizzata in condizioni iperbariche potrebbe indurre delle fessurazioni nei diaframmi e nel solettone causando una conseguente perdita d'aria di pressurizzazione.

Inoltre, tra la progressiva pk 0+850 e pk 1+000 circa il tracciato della galleria, in questo segmento scavato in condizioni iperbariche, incontra una lente di terreno suscettibile al fenomeno della liquefazione. La liquefazione è un fenomeno fisico che avviene in particolari condizioni, ad esempio in occasione di eventi sismici o quando il terreno è soggetto ad un carico monotono costante, che causa la rapida perdita di resistenza al taglio il quale assume un comportamento simile ad un fluido. Nel caso in cui avvenisse un sisma, contemporaneamente allo scavo della zona con terreni liquefacibili, si potrebbe verificare una perdita di consistenza del materiale del fronte con susseguenti problemi di stabilità e crollo dello stesso. In questo caso il crollo, anche se riferito ad un volume di materiale relativamente limitato e confinato al solo terreno all'interno della struttura diaframmi-copertura, potrebbe provocare danni alle attrezzature ad ai lavoratori presenti all'interno del volume di scavo.

Un possibile rischio che negli elaborati progettuali non viene considerato è quello derivante dal magrone a perdere posto sul terreno per regolarizzare e omogenizzare il terreno su cui poi verrà realizzato il solettone armato di copertura. Durante la fase di scavo all'interno dello scatolare, questo magrone, potrebbe distaccarsi anche in lastre di grande

entità andando a creare un pericolo di caduta di materiale dall'alto per le manovalanze e per i mezzi operanti al di sotto di esso.

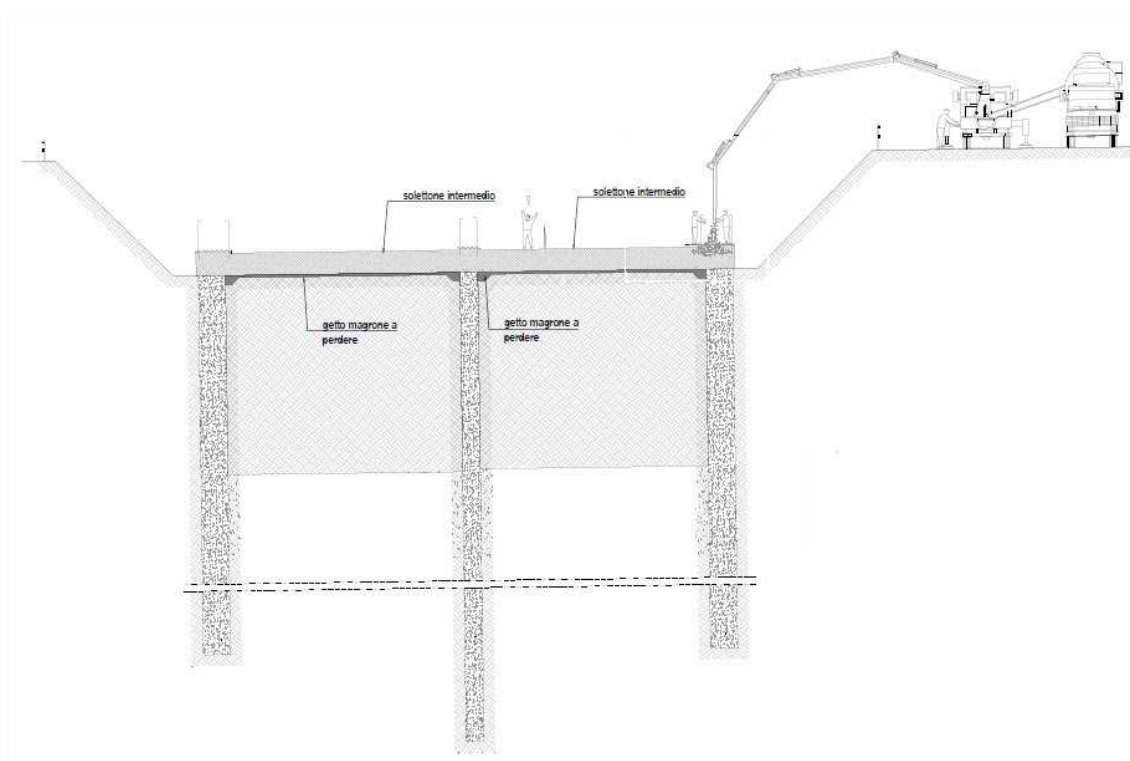


Figura 5-22: Fase di getto del solettone di copertura(da elaborato1.g)

Per massimizzare le condizioni di sicurezza dei lavoratori sarebbe buona pratica, prima del proseguo dell'avanzamento, effettuare in primo luogo un accurato esame della superficie della copertura da bonificare dalle eventuali porzioni di magrone instabile e procedere successivamente ad un disgiungimento di sicurezza seguendo le modalità di verifica e di esecuzione riportate nella Linea guida n°13-Lavori a ridosso del fronte (cap. 8).

### 5.3.3 Calcolo della portata d'aria e dimensionamento del sistema di pressurizzazione

Nell'elaborato del PSC "Relazione di calcolo pressioni di avanzamento" (elaborato 1.g) della galleria Casalnuovo viene riportata la procedura di calcolo della portata d'aria necessaria alla pressurizzazione, la quale viene effettuata considerando i tre seguenti fattori:

1. Perdite d'aria attraverso i giunti strutturali;
2. Perdite d'aria dovute all'apertura e chiusura delle porte delle camere di compensazione per mezzi e personale;

3. L'aspirazione forzata per il mantenimento delle condizioni di salubrit  nell'ambiente di lavoro.

La stima delle perdite attraverso il terreno ed i giunti strutturali viene effettuata attraverso la formula di Schenck & Wagner:

$$Q = \frac{2k_a}{\gamma_w} \frac{(P_1 - P_2)}{L} A \frac{P_1}{P_2}$$

Dove:

- $k_a$ = coefficiente di permeabilit  all'aria del terreno (assunto pari a 70  $k_w$ );
- $P_{tun}$ = pressione necessaria ad abbassare la falda al di sotto della quota di fondo scavo;
- $P_1$ = pressione assoluta all'interno del tunnel ( $P_{tun}+P_{atm}$ );
- $A$ = area attraverso cui avvengono le perdite;
- $L$ = lunghezza del percorso dell'aria corrispondente al ricoprimento del tunnel;
- $\gamma_w$ = peso specifico dell'acqua.

Tale formula fa riferimento a scavi di gallerie con il metodo tradizionale, realizzate senza nessuna struttura che si contrappone alla fuga d'aria, come invece avviene nel metodo Milano tramite lo scatolare. Inoltre, la permeabilit  del terreno all'aria  $K_a$  viene assunta pari a 70 volte la permeabilit  all'acqua utilizzando la relazione di Javadi (paragrafo 4.1.1).

Le possibili perdite d'aria dai portelloni di chiusura posti all'ingresso della galleria non vengono considerate nel calcolo poich  esse sono derivanti solo da imperfezioni costruttive.

Per quanto riguarda la portata d'aria necessaria per il ricircolo, essa viene determinata in funzione del numero del personale operante all'interno della galleria in maniera tale da mantenere salubre e confortevole l'ambiente di lavoro.

Rispetto a quanto illustrato nel PSC, si riportano le seguenti osservazioni:

- Considerando solamente la permeabilit  all'aria del terreno  $K_a$ , che risulta essere nettamente superiore rispetto alla permeabilit  all'aria del calcestruzzo, si sovrastimano le perdite d'aria nel caso in esame;

- La permeabilità all'aria del terreno deve essere determinata, prima del dimensionamento definitivo e della costruzione dell'impianto di pressurizzazione, tramite prove specifiche di permeabilità (paragrafo 4.1.1);
- Una volta pressurizzato il volume di terreno da scavare nel nuovo compartimento (a seguito dell'abbattimento del diaframma), le perdite d'aria devono essere calcolate utilizzando i coefficienti di permeabilità dei diaframmi in calcestruzzo e del rivestimento definitivo, per le relative superfici;
- Le perdite dal piano di fondo scavo, al di sotto del quale il terreno è saturo, sono nulle (Yoshimi e Ostergerg, 1963, paragrafo 4.1.1)
- Le perdite d'aria attraverso i portelloni di chiusura delle camere di compensazione per mezzi e personale, che in via preliminare possono essere considerate nulle, devono essere determinate effettuando un collaudo e un controllo periodico della tenuta stagna;
- Non è chiaro se nella valutazione della portata di ricircolo sia stato considerato il contributo dovuto al calore prodotto dai mezzi d'opera da disperdere per il mantenimento di idonee condizioni igrometriche all'interno del volume di scavo e della portata necessaria a garantire la velocità minima di riflusso come indicato nel paragrafo 4.4.2.

Di seguito si illustra il calcolo della portata d'aria per mantenere la pressurizzazione nella camera di lavoro, nelle varie fasi di realizzazione della galleria, secondo le indicazioni illustrate nel paragrafo 4.4.2:

Il calcolo è stato effettuato prendendo come riferimento la soluzione costruttiva ed i parametri caratteristici della galleria Casalnuovo. In relazione all'attuale stato delle conoscenze sono state adottate le seguenti ipotesi semplificative:

- Le perdite dai portelloni delle camere di compensazione per mezzi, personale e vasche sono considerate nulle. Come già accennato, tale valore deve essere successivamente sostituito con quello ottenuto in seguito al collaudo e alle verifiche periodiche di tenuta.
- Con riferimento al cronoprogramma delle fasi realizzative (Figura 5-23), per il calcolo della portata di ricircolo è stata considerata la situazione più onerosa, che riguarda il contemporaneo svolgimento delle fasi di armatura e getto della soletta di base, dell'applicazione della membrana impermeabile alle pareti e dell'armatura ed il getto delle pareti laterali. Per ogni attività è stato ipotizzato



(con riferimento a quanto riportato nell'elaborato 1.a Cap 16) il numero e la categoria di personale ed il tipo di mezzi d'opera necessario allo svolgimento (Tabella 9). Il fabbisogno d'aria è stato fissato a 18 Normo m<sup>3</sup>/h/persona (con riferimento alla normativa inglese, Tabella 3).

- La velocità di riflusso interna alla galleria è stata fissata a 0.3 m/s in accordo con quanto indicato nel paragrafo 4.4.2.
- In assenza dei valori ottenuti dalle prove specifiche di permeabilità all'aria da eseguire su tutti i litotipi attraversati è stato assunto un valore pari a 70 volte la permeabilità all'acqua. Con riferimento a quanto riportato nel paragrafo 4.1.1, sono stati assunti valori di permeabilità all'acqua pari a 10<sup>-8</sup> m/s e 10<sup>-6</sup> m/s rispettivamente per il rivestimento definitivo e per i diaframmi laterali e trasversali e il solettone di copertura.
- Il valore di sovrappressione per ogni compartimento è stato determinato in base al livello massimo di falda previsto all'interno di ogni compartimento, incrementato di un metro;
- Il rivestimento definitivo viene messo in opera soltanto alla fine dello scavo dell'intero compartimento.

### PROGRAMMA DI ESECUZIONE SCAVO GA IN PRESSIONE

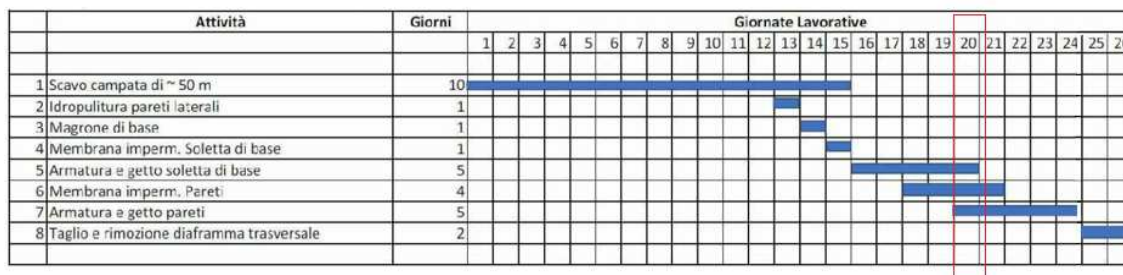


Figura 5-23: Programma temporale delle fasi operative per la realizzazione della galleria Casalnuovo, in rosso la situazione più onerosa in termini di mezzi d'opera e personale utilizzato contemporaneamente. (da elaborato 1.i).

Tabella 9: Dettaglio delle attività, dei mezzi d'opera e della tipologia di personale utilizzato contemporaneamente.

| Tipo di attività                         | Mezzi d'opera             | Personale                                |
|--|---------------------------|--|
| Armatura e getto soletta di base         | Pompa calcestruzzo        | 2 manovalanze e 1 pompista               |
| Applicazione impermeabilizzazione pareti | Piattaforma elevabile     | 2 manovalanze                            |
| Armatura e getto pareti                  | Gru<br>Pompa calcestruzzo | 1 gruista, 1 pompista, 2 manovalanze.    |
| Attività di controllo                    | /                         | Ril (responsabile intervento iperbarico) |
| <b>Totale</b>                            | <b>4</b>                  | <b>10</b>                                |

Tabella 10: Significato delle sigle utilizzate nel calcolo.

| SIGLA             | SIGNIFICATO  |
|-------------------|--|
| $Q_{scav}$        | Portata da fornire durante lo scavo del compartimento  |
| $Q_{diaf}$        | Portata da fornire durante la fase di abbattimento del diaframma                                   |
| $Q_{loss\ riv}$   | Perdite dalla superficie rivestita ed impermeabilizzata  |
| $Q_{loss\ (-)nr}$ | Perdite dalla superficie non rivestita   |
| $Q_{press}$       | Portata necessaria per pressurizzare il volume di terreno da scavare nel compartimento successivo. |
| $Q_{ric}$         | Portata di ricircolo per i fabbisogni del personale e per la ventilazione                          |
| (numero)          | Indica il compartimento di riferimento   |

Le singole portate, espresse in condizioni atmosferiche normobariche, utilizzate nella procedura sono state calcolate con le seguenti formule:

1. **La portata di ricircolo  $Q_{ric}$**  è stata valutata in funzione del fabbisogno di aria pulita ( $Fab_{persona}$ ) per i lavoratori presenti in galleria ( $N_{persone}$ ), della sezione di scavo ( $A_{scavo}$ ) e della velocità di riflusso  $V_{riflusso}$  da garantire:

$$Q_{ric} = (Fab_{persona} * N_{persone}) + (A_{scavo} * V_{riflusso})$$

Tale portata deve essere sempre garantita in presenza di lavoratori all'interno della camera di lavoro.

2. **Portata d'aria per compensare le perdite dalla superficie rivestita  $Q_{loss\ riv}$ :** viene calcolata in funzione della permeabilità all'aria del rivestimento definitivo, dell'area della superficie rivestita (pareti laterali rivestite e solettone di copertura, cfr. paragrafo 5.3.6), del battente idraulico e della copertura della galleria:

$$Q_{loss\ riv} = 70 * 2 * K_{riv} * A * \frac{Battente}{Copertura} * (1 + \Delta P)$$

1. **Portata d'aria per compensare le perdite dalla superficie non rivestita  $Q_{loss\ nr}$ :** in questo caso viene utilizzato il valore della permeabilità all'aria delle superfici non rivestite. L'area della superficie disperdente è formata dai diaframmi laterali non rivestiti e dai diaframmi trasversali:

$$Q_{loss\ nr} = 70 * 2 * K_{nr} * A * \frac{Battente}{Copertura} * (1 + \Delta P)$$

2. **Portata d'aria per pressurizzare il volume di terreno da scavare nel compartimento successivo  $Q_{press}$ :** l'abbattimento del diaframma rappresenta una fase transitoria durante cui, a causa della differenza di pressione tra il compartimento appena terminato ed il compartimento successivo, si genera un flusso d'aria attraverso il terreno da scavare. Tale flusso genera una perdita d'aria

che comporta una riduzione della pressione iperbarica fino al raggiungimento delle condizioni di equilibrio. Per raggiungere il livello di pressione calcolato per il compartimento da scavare (e quindi poter completare l'abbattimento del diaframma al di sotto del livello piezometrico originario) senza comportare patologie barotraumatiche, la variazione di pressione deve essere inferiore a 0.4 bar/min (cfr.paragrafo 4.5.1).

La perdita d'aria può essere calcolata con la seguente formula:

$$Q_{press} = 70 * 2 * K_w * A * \frac{P_1 - P_2}{L} * (1 + \Delta P)$$

dove  $K_w$  = permeabilità all'acqua del terreno;  $P_1$  = pressione assoluta nel compartimento completato;  $P_2$  = pressione assoluta nel compartimento successivo prima della pressurizzazione;  $L$  = lunghezza del compartimento;  $A$  = superficie del fronte attraverso cui fluisce l'aria.

Nel calcolo  $A$  è stata considerata pari alla superficie compresa tra l'intradosso del solettone di copertura ed il livello piezometrico.

Nel seguito (Tabella 11) vengono riportati i valori dei dati di input, relativi alla galleria Casalnuovo, utilizzati nella procedura di calcolo delle portate  $Q$  d'aria.

Tabella 11: Dati relativi alla galleria Casalnuovo utilizzati per la procedura di calcolo delle portate d'aria

| Compartimento | Lunghezza (m) | Larghezza (m) | Area in pianta (m <sup>2</sup> ) | Sezione Tipo | Altezza(m) | Fronti d'avanzamento | Area sezione (m <sup>2</sup> ) | Volume di scavo(m <sup>3</sup> ) | Pressione necessaria (Bar) |
|---------------|---------------|---------------|----------------------------------|--------------|------------|----------------------|--------------------------------|----------------------------------|----------------------------|
| 1             | 65            | 10,46         | 680                              | B            | 9,11       | 1                    | 95,3                           | 6194,8                           | 0,36                       |
| 2             | 65            | 10,62         | 690                              | B            | 9,11       | 1                    | 96,7                           | 6285,9                           | 0,44                       |
| 3             | 65            | 10,62         | 690                              | B            | 9,11       | 1                    | 96,7                           | 6285,9                           | 0,52                       |
| 4             | 40,7          | 14,99         | 610                              | B            | 9,11       | 1                    | 136,6                          | 5557,1                           | 0,58                       |
| 5             | 24,3          | 14,81         | 360                              | B            | 9,11       | 1                    | 134,9                          | 3279,6                           | 1,03                       |
| 6             | 50            | 10,6          | 530                              | B/C1         | 9,85       | 1                    | 104,4                          | 5220,5                           | 0,79                       |
| 7             | 40            | 21,25         | 850                              | C1/C2        | 9,48       | 2                    | 201,5                          | 8058                             | 0,75                       |
| 8             | 40            | 20            | 800                              | C2           | 9,48       | 2                    | 189,6                          | 7584                             | 0,79                       |
| 9             | 40            | 20            | 800                              | C1/C2        | 9,11       | 2                    | 182,2                          | 7288                             | 0,86                       |
| 10            | 40            | 20,75         | 830                              | C1/C2        | 9,11       | 2                    | 189,0                          | 7561,3                           | 0,67                       |
| 11            | 65            | 20,31         | 1320                             | D            | 10,01      | 2                    | 203,3                          | 13213,2                          | 0,61                       |
| 12            | 72,65         | 19,68         | 1430                             | D            | 10,01      | 2                    | 197,0                          | 14314,3                          | 0,56                       |
| 13            | 33,11         | 9,66          | 320                              | B1           | 9,05       | 1                    | 87,4                           | 2896                             | 0,52                       |
| 14            | 38,5          | 14,81         | 570                              | B1           | 9,05       | 1                    | 134,0                          | 5158,5                           | 0,44                       |
| <b>Totale</b> | <b>679,26</b> | <b>/</b>      | <b>10480</b>                     | <b>/</b>     | <b>/</b>   | <b>/</b>             | <b>/</b>                       | <b>98897,1</b>                   | <b>/</b>                   |

La procedura di pressurizzazione si articola nelle seguenti fasi:

1. Scavo del compartimento numero 1 a pressione atmosferica e posa del rivestimento definitivo fino a 2 metri dal diaframma trasversale successivo;
2. Pressurizzazione del compartimento 1 fino al livello di sovrappressione pari a 0,36 bar. Supponendo che questa fase venga effettuata senza la presenza di personale all'interno del compartimento, la pressurizzazione può avvenire a "sistema chiuso" cioè chiudendo il sistema di aspirazione ed isolando la camera di lavoro. In questo modo è possibile utilizzare tutta la capacità dell'impianto per la pressurizzazione. La portata d'aria necessaria può essere desunta da:

$$Q_{(1press)} = \frac{V_{(1)}}{T} * \Delta P + Q_{loss(1)riv}$$

Con:

$Q_{(1press)}$  = Portata d'aria necessaria alla pressurizzazione del compartimento 1.

$V_{(1)}$  = volume del compartimento 1 (m<sup>3</sup>);

T = tempo richiesto per raggiungere la sovrappressione prevista;

$\Delta P$  = valore di sovrappressione per il compartimento 1;

$P_{atm}$  = pressione iniziale nel compartimento 1, pari alla pressione atmosferica.

3. Una volta raggiunto il livello di pressione atteso nel compartimento 1 si può riattivare il sistema di ricircolo e consentire l'accesso del personale all'interno del volume di scavo. La portata da fornire in questa fase risulta essere pari a:

$$Q_{(1)} = Q_{ric} + Q_{loss(1)riv}$$

4. Si procede quindi con l'abbattimento del diaframma per la messa in comunicazione del compartimento successivo. Si porta il compartimento 2 al valore di sovrappressione calcolato (1.44 bar).

La portata d'aria minima da fornire sarà:

$$Q_{diaf} = Q_{ric} + Q_{loss(1)riv} + Q_{loss(2)nr} + Q_{press(2)}$$

5. Si inizia la fase di avanzamento dello scavo fino al diaframma posto tra i compartimenti 2 e 3, la portata d'aria pari a :

$$Q_{scav(2)} = Q_{ric} + Q_{loss(2)nr} + \sum Q_{loss riv}$$

Il contributo delle perdite non rivestite nello scavo della parte iniziale del compartimento risulterà massimo ed andrà via via diminuendo con l'avanzamento della posa del rivestimento definitivo.

6. Si prosegue poi con l'abbattimento del diaframma tra il compartimento 2 e 3 nella

stessa maniera del punto 4 adeguando i valori delle pressioni e delle perdite ai nuovi compartimenti. La formula generale al punto 4 diventa:

$$Q_{diaf(k,k+1)} = Q_{ric} + \sum_{i=1}^k Q_{loss(i) riv} + Q_{loss(k+1)nr} + Q_{press(k+1)}$$

Dove k è il numero dell'ultimo compartimento scavato.

Il calcolo della portata ( $Q_{press}$ ) relativa al diaframma posto tra in compartimento 12 e 13 e quello alla fine del compartimento 14 non viene effettuato, poiché sono direttamente a contatto con l'ambiente atmosferico (innesto Circumvesuviana e fine tratto iperbarico).

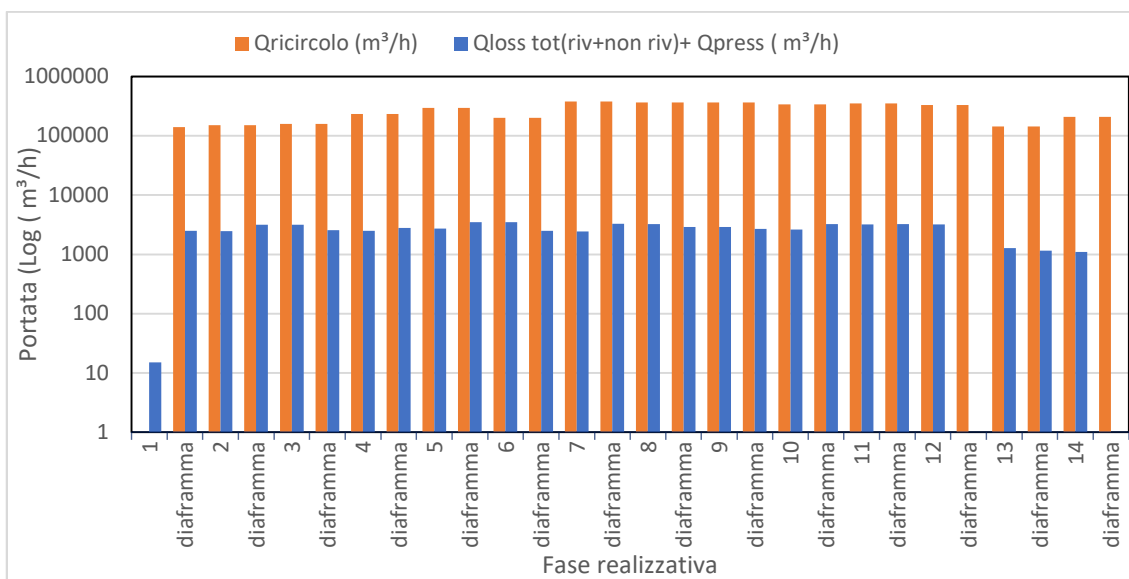


Figura 5-24: Portate d'aria (normobariche) calcolate per le diverse fasi realizzative dell'opera. I valori sono espressi in scala logaritmica

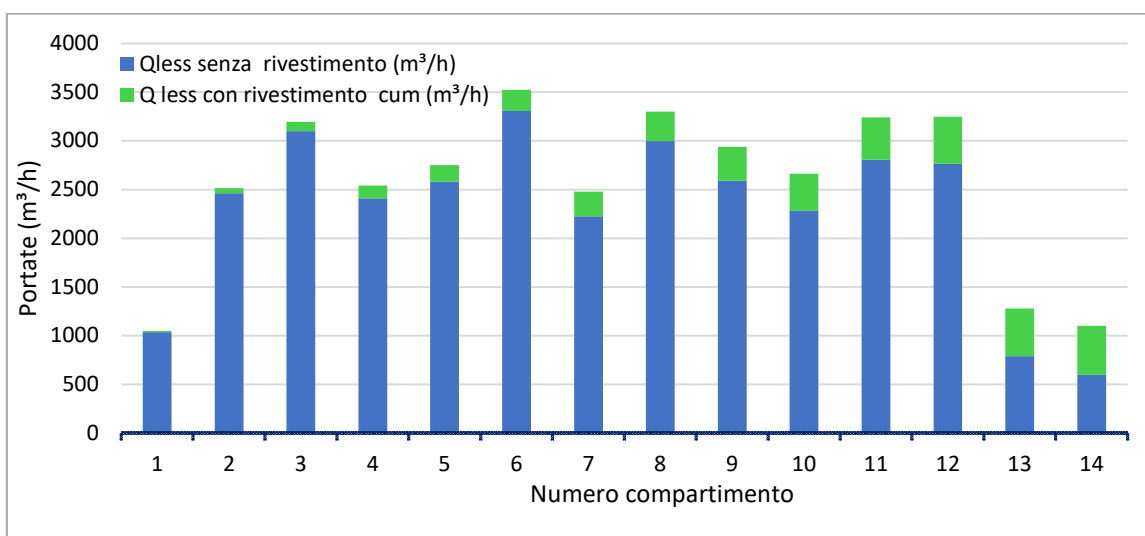


Figura 5-25: Perdite d'aria (normobariche) calcolate durante lo scavo nei diversi compartimenti, espresse come somma delle perdite dalla superficie rivestita definitivamente (in verde) e quella non rivestita (in blu).

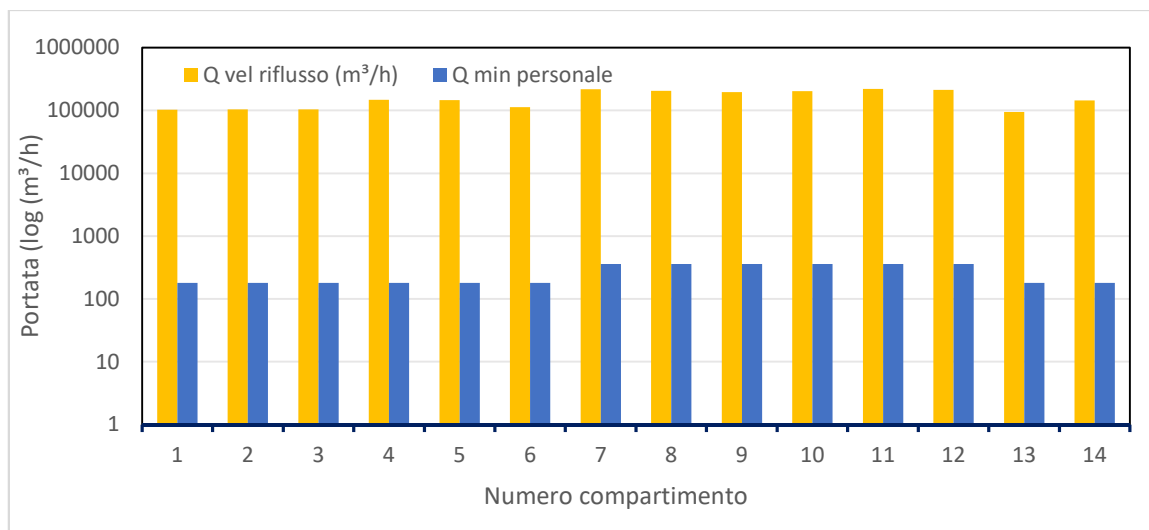


Figura 5-26: Confronto tra le portate necessarie a garantire la velocità minima di riflusso in galleria e il ricambio d'aria per il personale. I valori sono espressi in scala logaritmica.

Dai risultati ottenuti nel calcolo delle portate d'aria pressurizzata da fornire nelle varie fasi di realizzazione della galleria, si evince che la richiesta d'aria maggiore deriva dalla portata di ricircolo ( $Q_{ric}$ ), in particolar modo dalla portata necessaria a garantire una velocità di riflusso all'interno della galleria di almeno 0.3m/s. Come già spiegato in precedenza nel paragrafo 4.4.2, questo valore è funzione della sezione di scavo, occorrerà quindi aggiornare la  $Q_{ric}$  ad ogni cambio di sezione di scavo durante l'avanzamento nei compartimenti successivi.

Inoltre, considerato che la permeabilità all'aria del rivestimento definitivo e dei diaframmi differisce di due ordini di grandezza, le perdite d'aria relative al tratto non rivestito ( $Q_{loss\ nr}$ ) rispetto a quello rivestito ( $Q_{loss\ riv}$ ) risultano essere di gran lunga maggiori. Per questo motivo sarebbe opportuno procedere con le operazioni d'impermeabilizzazione e di posa in opera del rivestimento definitivo in contemporanea con l'avanzamento dello scavo, cercando di minimizzare quanto più possibile la distanza tra le due operazioni così da limitare la portata delle perdite d'aria.

#### 5.3.4 Camere di compensazione per il personale, per i mezzi e vasche per la raccolta temporanee del materiale scavato.

Prima dello scavo verrà realizzata una struttura (lunga 40 m, ed internamente alta 7 m e larga 13 m) posizionata all'ingresso della galleria (precisamente nella porzione terminale della galleria Parapioggia) che ospiterà al suo interno i sistemi necessari ad effettuare le procedure di compressione e decompressione del personale e dei mezzi d'opera, nonché

le vasche per consentire il trasporto all'esterno del materiale di risulta dello scavo (cfr. paragrafo 5.3.5). Sarà quindi suddivisa in tre vani (Figura 5-27):

- Due vasche (A e B) larghe 3.5 metri per l'accumulo temporaneo del marino conferito dal sistema di nastri trasportatori installati all'interno della camera di lavoro;
- Camere di compensazione, su due livelli, per il transito del personale (D - livello superiore), dei mezzi e delle attrezzature (C - livello inferiore).

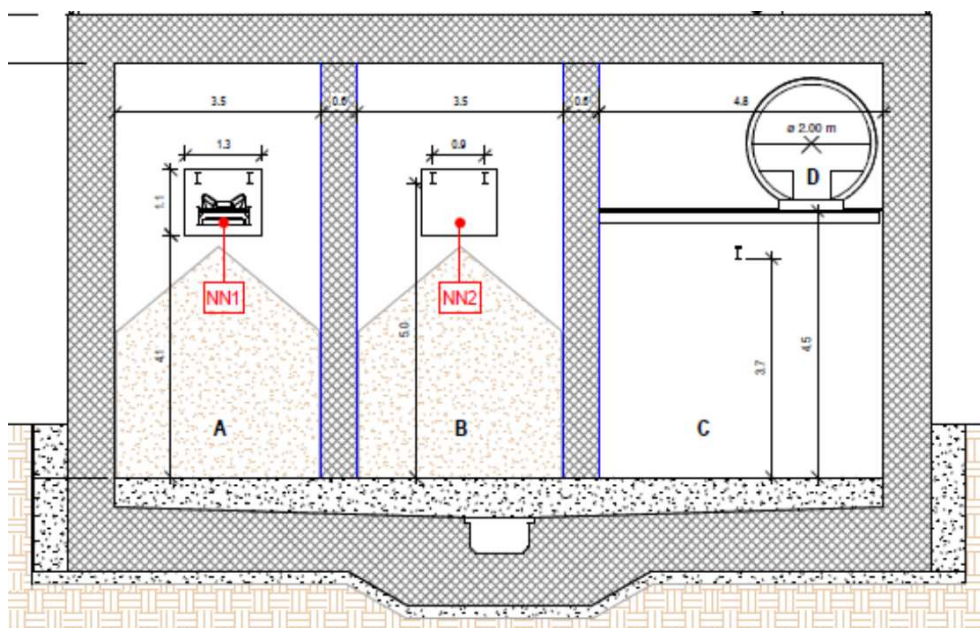


Figura 5-27: Sezione trasversale della struttura di accesso al cantiere in aria compressa. Vasche A-B-C-D (da elaborato 2.d)

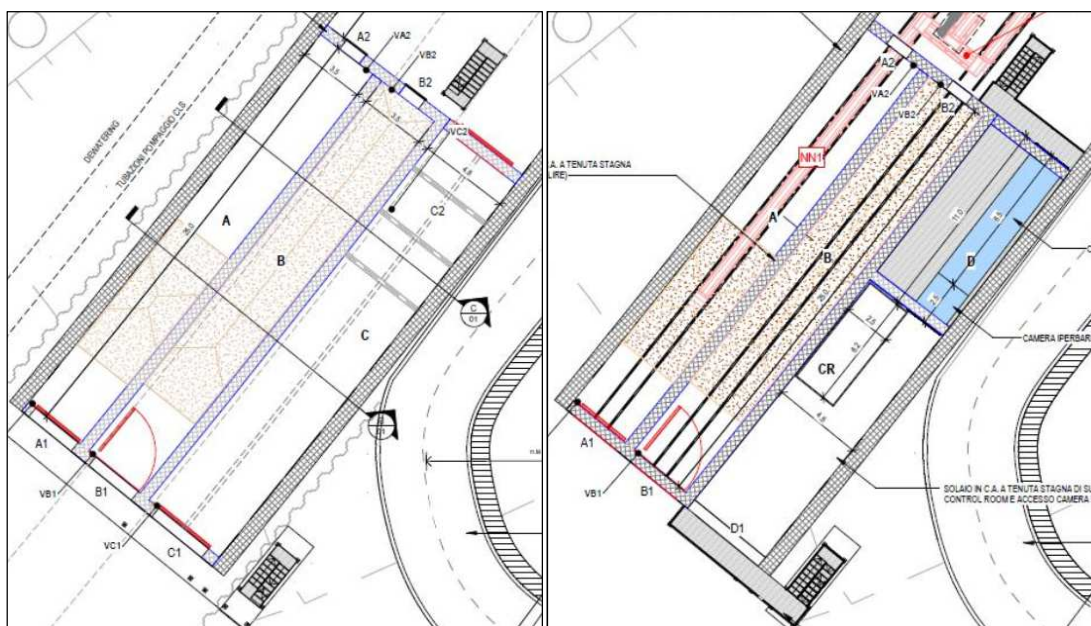


Figura 5-28: Planimetrie della struttura di accesso al cantiere in aria compressa, (a sinistra) livello inferiore, (a destra) livello superiore. (da elaborato 2.d)

La camera di compensazione dedicata al personale (PSC, elaborato 1.g) sarà suddivisa in due compartimenti, così da garantire un possibile doppio accesso in caso di emergenza, ma tale soluzione non viene rappresentata nelle planimetrie e nelle sezioni grafiche disponibili.

Posizionare la camera di compensazione per il personale superiormente risulta essere una buona soluzione per le condizioni di sicurezza, poiché in caso di allagamento della camera di lavoro essa risulta essere in una posizione tale da garantire l'esecuzione della procedura di decompressione all'asciutto. Tuttavia, richiede l'installazione di una scala e di un ascensore, opportunamente dimensionati ed accessibili facilmente dal personale e dalle attrezzature di soccorso o in caso di evacuazione.

Non risultano invece disponibili informazioni riguardo le metodologie di dimensionamento e sulla capienza della camera di compensazione. La capienza massima della camera di compensazione del personale è un parametro imprescindibile nella valutazione delle procedure di emergenza, poiché da questo fattore dipenderà la velocità d'intervento dei mezzi di soccorso e di evacuazione del personale. Per il suo corretto dimensionamento e per le dotazioni impiantistiche di cui deve essere dotata si rimanda alle informazioni contenute nel paragrafo 4.4.1.

Nella camera di compensazione per i mezzi ed i materiali, opportunamente dimensionata in base agli ingombri, durante il passaggio dall'ambiente esterno alla camera di scavo e



viceversa non dovrà mai essere presente personale, che dovrà accedere tramite la camera di compensazione al livello superiore seguendo le procedure di compressione e decompressione descritte nel paragrafo 4.5.

### 5.3.5 Sistema di smarino e trasporto

Per il trasporto all'esterno del materiale di risulta dello scavo il Piano Esecutivo (elaborato 2.c) prevede l'utilizzo di un nastro trasportatore, vincolato al solettone di copertura, che trasporterà il materiale preso dal fronte fino alle vasche A e B poste nella struttura all'ingresso della galleria. Il materiale scavato verrà caricato sul nastro trasportatore direttamente dalla macchina di scavo dotata di un nastro regolabile in lunghezza ed in altezza.

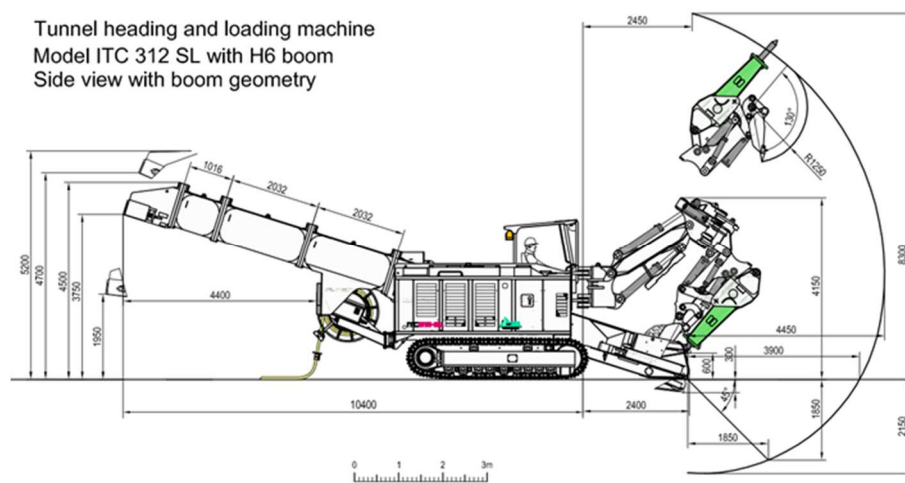


Figura 5-29: Mezzo d'opera previsto per lo scavo ed il caricamento del materiale

Le due vasche A e B consentiranno il trasporto all'esterno del materiale scavato dal cantiere iperbarico senza soluzione di continuità. Mentre una delle due vasche (A o B), in comunicazione con la camera di lavoro ed isolata dall'ambiente esterno, viene riempita di marino, l'altra vasca (B o A), riempita precedentemente, viene messa in comunicazione con l'ambiente esterno (ed isolata dalla camera di lavoro) per asportare il marino con una pala caricatrice.

Le due verranno riempite tramite un particolare sistema di nastri trasportatori estensibili che smisteranno il materiale in arrivo dal fronte in maniera alternata tra di esse. Inoltre, le vasche saranno dotate di sensori di riempimento a fotocellula che segnaleranno il momento in cui occorrerà spostare il nastro estensibile nella vasca adiacente.

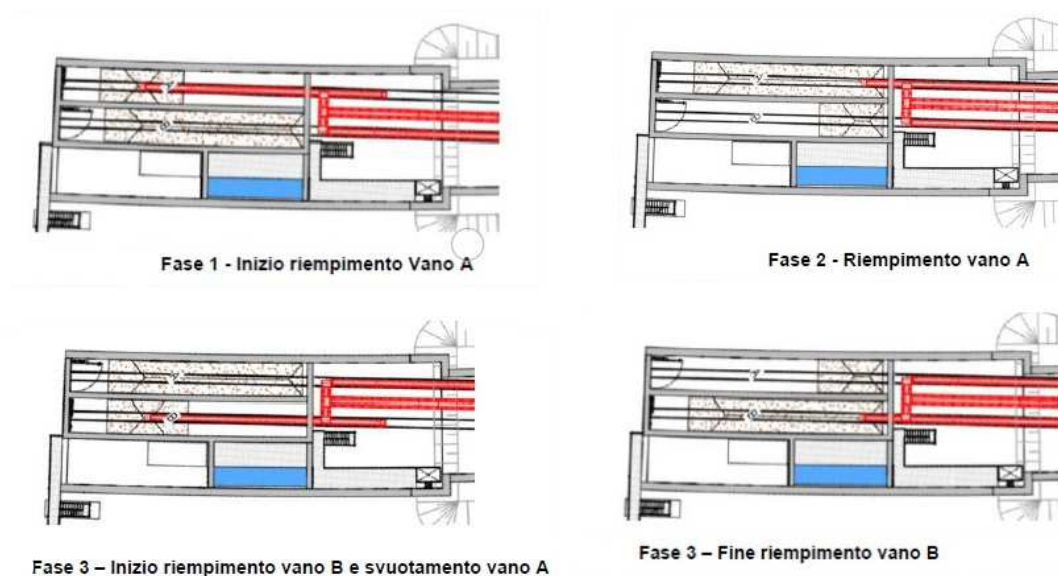


Figura 5-30: fasi di riempimento e svuotamento delle vasche di accumulo temporaneo del materiale. (da elaborato 1.g)

Questa soluzione garantisce un maggior controllo della sovrappressione interna evitando perdite d'aria dovute all'apertura e alla chiusura dei portali di accesso alla camera di compensazione per mezzi e materiali (C), nel caso di trasporto all'esterno con dumper.

Inoltre, l'utilizzo del nastro trasportatore risulta in accordo con quanto indicato nelle Linee Guida nazionali, poiché permette una riduzione del numero di mezzi e di uomini all'interno della galleria consentendo un miglior controllo delle attività lavorative da parte del preposto oltre alla diminuzione della probabilità di incidenti all'interno della galleria.

Tuttavia, l'utilizzo del nastro trasportatore può indurre un possibile rischio di caduta di materiali dall'alto determinato da malfunzionamenti o da un eccessivo accumulo di materiale sul nastro. È limitare quindi il passaggio del personale al di sotto di esso, individuando specifici percorsi pedonali da utilizzare all'interno della galleria.

Anche se il materiale scavato sarà umido, l'aria di ventilazione può asciugarlo e favorire la dispersione di polveri in camera di lavoro. Pertanto, è necessario prevedere sistemi di abbattimento delle polveri (nebulizzatori) al fronte e nei punti di scarico da un nastro al successivo e dal nastro trasportatore alle vasche di accumulo temporaneo.

### 5.3.6 Impermeabilizzazione della galleria

Successivamente alla fase di scavo verrà realizzata l'impermeabilizzazione e il rivestimento definitivo che dovrà garantire la tenuta stagna durante la realizzazione dei

compartimenti successivi e durante la vita utile dell'opera. Prima della posa in opera dell'impermeabilizzazione, il Progetto Esecutivo prevede il lavaggio delle superfici con acqua ad alta pressione, per eliminare eventuali residui di terreno e di magrone sulle pareti.

La membrana impermeabilizzante multistrato sarà costituita da due strati di TNT in Polipropilene che fungono come protezione e compensazione per i due strati di guaine in PVC posti al loro interno. Il pacchetto impermeabilizzante verrà posizionato tra la struttura in diaframmi e il rivestimento definitivo (fodera) gettato in opera successivamente alla sua installazione (Figura 5-31). I giunti tra i getti successivi verranno impermeabilizzati tramite l'applicazione di waterstop, pannelli di polistirolo ed un cordone in gomma idroespansiva.

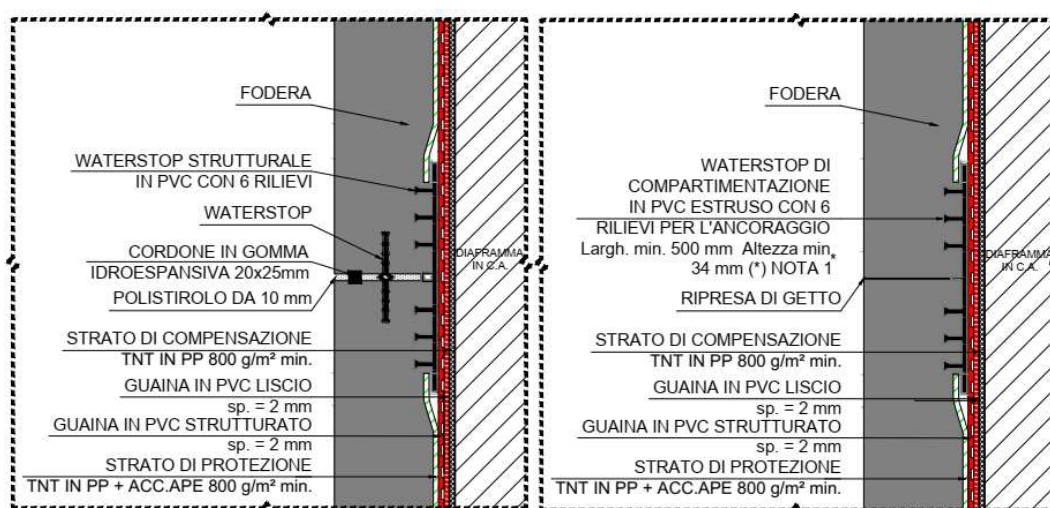


Figura 5-31: Impermeabilizzazione e rivestimento definitivo delle pareti laterali. (da elaborato I.g)

Con l'avanzamento dello scavo verrà realizzata anche la platea di fondazione fino ad una distanza di 2 metri dal diaframma trasversale da demolire per iniziare la fase di scavo del compartimento successivo.

Prima del getto della platea di fondazione (Figura 5-32), la superficie della galleria verrà omogenizzata tramite la realizzazione di uno strato con uno spessore di circa 10 cm di magrone, ed impermeabilizzata tramite il fissaggio meccanico del rivestimento multistrato. Al di sopra di questi due strati verrà gettato in opera il solettone di fondazione in calcestruzzo. Anche in questo caso le riprese di getto verranno impermeabilizzati con waterstop, polistirolo e cordoni in gomma idroespansiva.

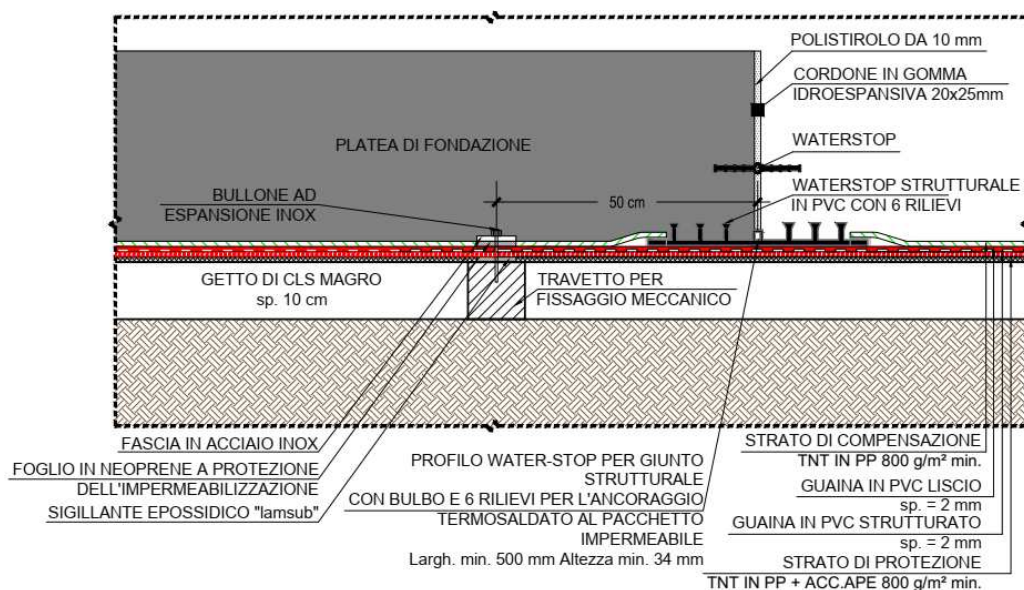


Figura 5-32: Impermeabilizzazione e rivestimento del solettone di base.(da elaborato 1.g)

Per l'impermeabilizzazione del giunto tra solettone di copertura e i diaframmi laterali è prevista l'installazione di un waterstop, posizionato nella parte interna della galleria tra le fodere e i diaframmi, con lo scopo di bloccare un'eventuale risalita d'acqua. Il pacchetto di impermeabilizzazione (Figura 5-33) della copertura, necessario a fornire protezione verso l'infiltrazione d'acqua di precipitazione, verrà invece fissato meccanicamente nell'estradosso della copertura prima della fase di ritombamento dello scavo.

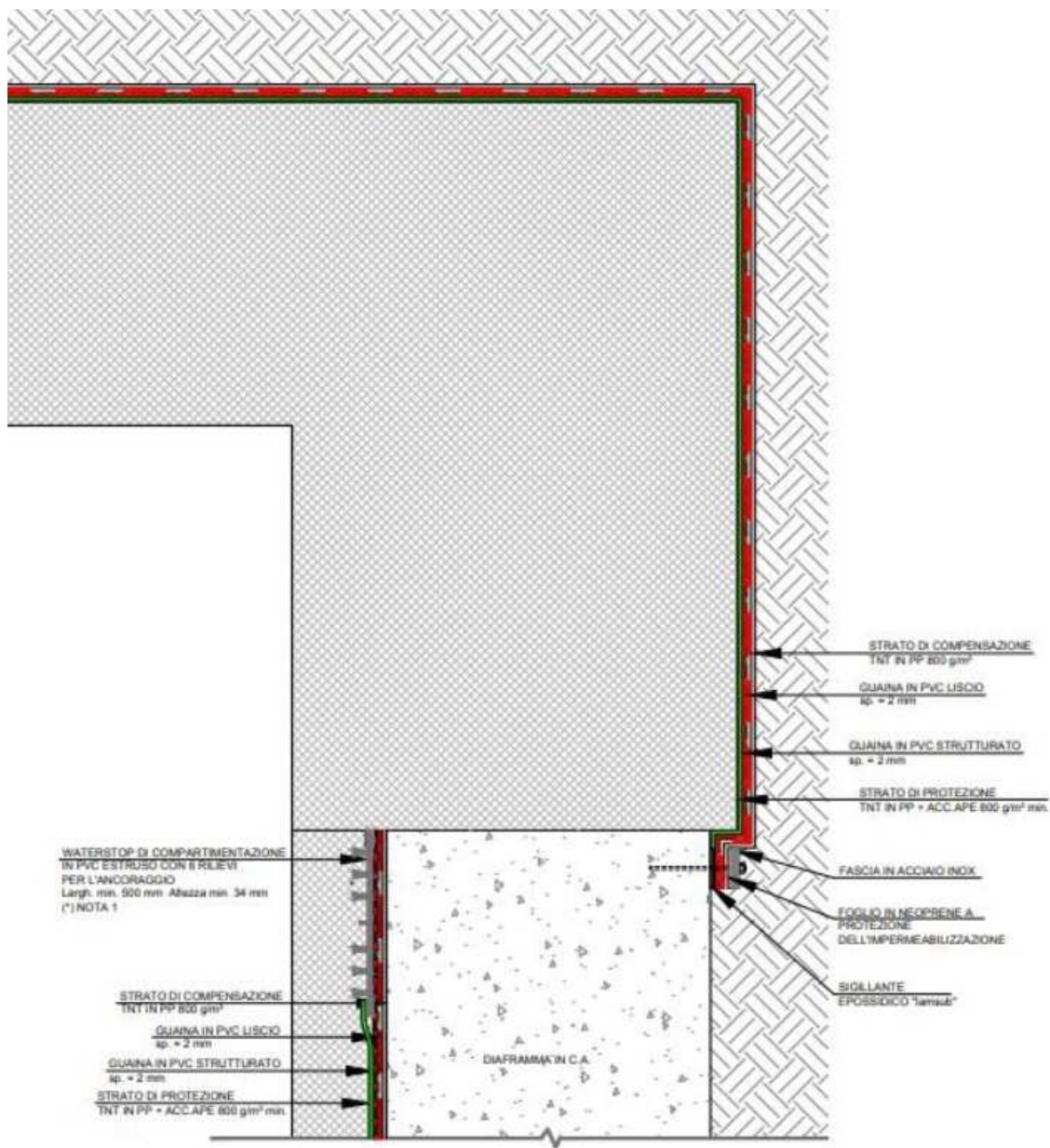


Figura 5-33: Particolari d'impermeabilizzazione del solettone di copertura e dei giunti tra solettone e diaframmi laterali.(da elaborato I.g)

Inoltre, il pacchetto d'impermeabilizzazione verrà ricoperto con un massetto di protezione (Figura 5-34) in calcestruzzo armato per evitare deterioramenti dello stesso una volta a contatto con il terreno.

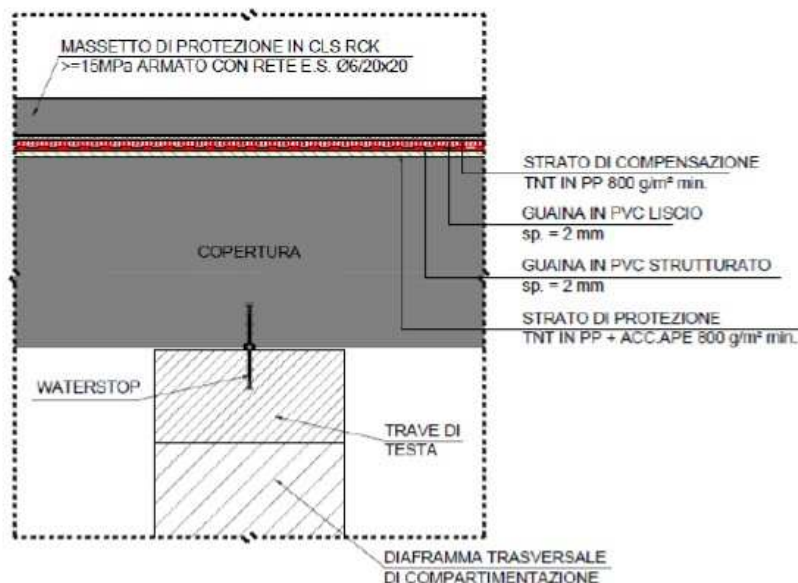


Figura 5-34: Particolare del pacchetto di impermeabilizzazione del solettone di copertura con la realizzazione del massetto di protezione.(da elaborato I.g)

La corretta messa in opera dei sistemi di tenuta idraulica è di fondamentale importanza per minimizzare le perdite di pressione (durante la realizzazione dell'opera) ed impedire infiltrazioni d'acqua (in fase di realizzazione e di esercizio ferroviario). Pertanto, è necessario effettuare accurate verifiche e collaudi dell'efficacia dell'intervento d'impermeabilizzazione, testando la tenuta delle saldature tra teli adiacenti, degli elementi waterstop e degli ancoraggi meccanici.

### 5.3.7 Taglio diaframma

L'abbattimento dei diaframmi trasversali, che costituiscono la separazione provvisoria tra i vari compartimenti adiacenti, inizierà solo dopo aver completato le operazioni di rivestimento definitivo ed impermeabilizzazione fino ad una distanza di 2 metri dal diaframma stesso.

L'operazione verrà effettuata tramite l'utilizzo di macchinari di taglio a filo diamantato. Queste macchine, sviluppate inizialmente per l'estrazione di roccia ornamentale nelle cave, nel tempo si sono ben prestate anche al taglio di calcestruzzo armato nelle costruzioni civili.

La macchina tagliatrice è costituita da una sezione di comando posta lontano dal punto di taglio della parete, collegata ad un sistema di pulegge che vengono azionate da un motore elettrico tramite cui viene messo in tensione e fatto ruotare un cavetto di acciaio con

spessore variabile tra i 5-8 mm rivestito da piccoli cilindri di acciaio (perline) ricoperte da diamanti sintetici abrasivi ed alternate da molle che garantiscono l'elasticità e la maggior scorrevolezza al cavo

Questi fili possono essere principalmente di due tipi:

- Perla elettrodeposta in cui le perline sono costituite da un supporto circolare di acciaio rivestito da diamanti legati su di esso tramite elettrolisi, in questo modo queste perline risultano essere più robuste ed efficaci garantendo un'ampia versatilità durante l'uso (10-20 l/min. come consumo d'acqua, la potenza necessaria è di 25 CV)
- Perla a concrezione: in cui di diamanti sintetici sono distribuiti all'interno della lega metallica che forma la perlina, essi hanno un costo maggiore rispetto a quelli elettrodeposti, ma in compenso hanno una maggior resistenza e durata e possono mantenere una velocità di taglio pressoché costante durante la loro vita utile (richiedono almeno 40 CV di potenza, 20-50 l/min. di acqua).



Figura 5-35: Tipi di perline che costituiscono il filo diamantato per il taglio. ([www.diamant-boart.com](http://www.diamant-boart.com))

Questa tecnologia, che da un lato garantisce una veloce e semplice operazione di taglio del materiale, dall'altro espone gli operatori ad un rischio infortunistico causato dal possibile distaccamento delle perline dal cavo principale in acciaio e dal cosiddetto "colpo di frusta" cioè dalla rottura stessa del cavo causata da un improvviso aumento di tensione o dall'eccessiva usura delle giunzioni. Per evitare l'insorgenza di incidenti durante le fasi di taglio sono necessarie due condizioni che devono essere contemporaneamente rispettate:

- Il corretto modo di operare da parte dei lavoratori coinvolti nell'attività.
- Garantire la sicurezza intrinseca dei macchinari e delle attrezzature utilizzate durante il taglio.

Secondo le indicazioni riportate nel Piano Sicurezza e Coordinamento (PSC) della realizzazione della Galleria GA01 Casalnuovo, il taglio dei diaframmi tra i vari compartimenti avverrà in tre fasi consecutive:

- **Fase preliminare:** la quale avverrà prima del getto dei diaframmi in cui verranno predisposti dei tubi in polietilene, legati all'armatura e annegati nel getto, che saranno successivamente utilizzati per l'inserimento del filo diamantato nel diaframma. Tale tecnica, nel caso in cui non venisse realizzata a regola d'arte, potrebbe creare delle problematiche. Innanzitutto, il tubo in Polietilene deve essere posizionato nella parte più esterna del diaframma e deve essere direttamente a contatto con il terreno in modo da essere subito rintracciabile una volta effettuato lo scavo; operazione non facile da realizzare a causa del fatto che il tubo viene legato direttamente all'armatura e potrebbe subire spostamenti dovuti ad urti nella fase di inserimento dell'armatura nello scavo. Un'ulteriore problematica può essere causata dall'ondulazione della superficie esterna del diaframma trasversale che potrebbe portare ad avere un tubo di polietilene completamente affondato nel cls e quindi non immediatamente individuabile;

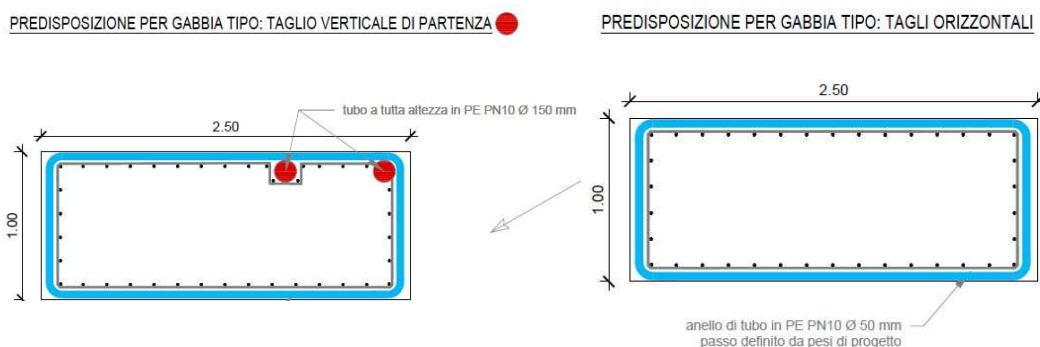


Figura 5-36: Particolari della gabbia di armatura dei diaframmi con l'ubicazione dei tubi di polietilene. (da elaborato 2.e)

- **Fase di taglio:** nella quale verranno effettuati tutti i tagli sia orizzontali che verticali necessari a suddividere l'intero diaframma in vari blocchi. Prima di tale fase di taglio verranno realizzate delle perforazioni orizzontali nel diaframma stesso in modo da mettere in comunicazione idraulica i due diaframmi limitrofi e



garantire così un bilanciamento delle pressioni tra i due compartimenti adiacenti.

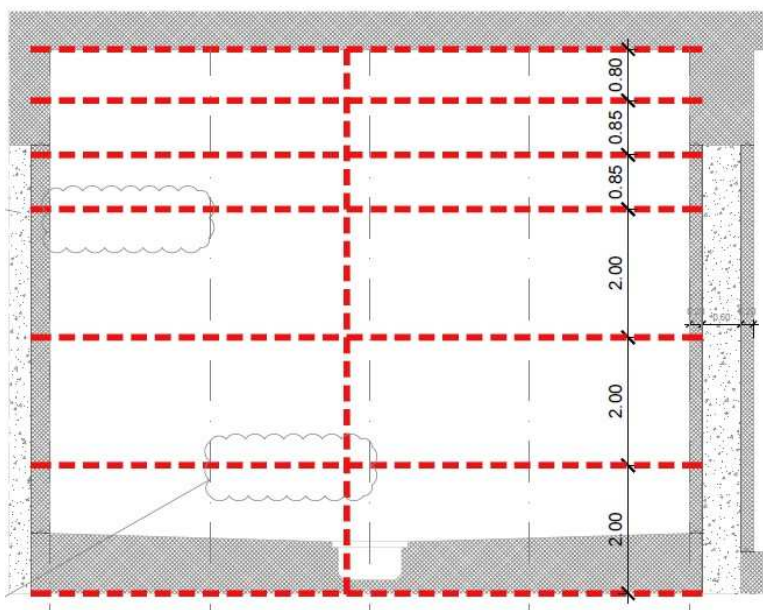


Figura 5-37: Sezionatura in blocchi del diaframma trasversale. (da elaborato 2.e)

- **Fase di rimozione dei blocchi:** realizzata partendo dal blocco posto in alto, sarà alternata allo scavo del terreno retrostante in maniera tale da evitare la sua caduta verso l'interno della galleria.

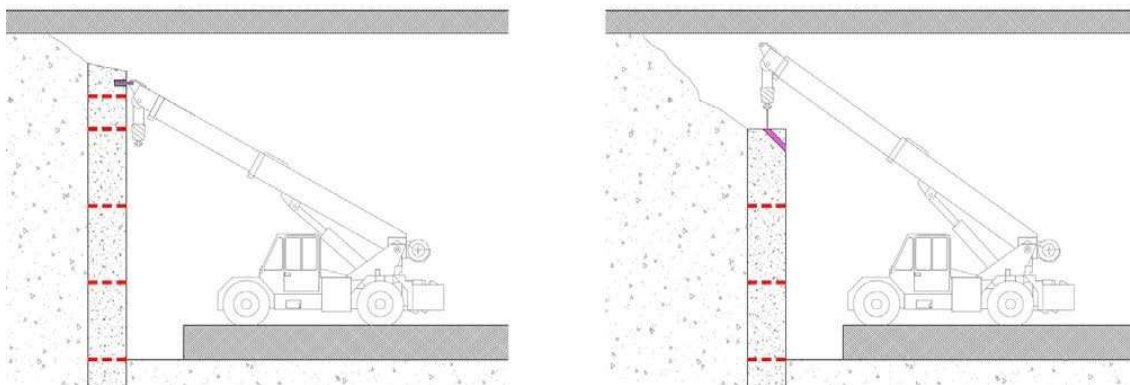


Figura 5-38: Fase di movimentazione tramite autogrù dei blocchi di diaframma precedentemente tagliati (da elaborato 2.e)

Per svolgere le attività di taglio e la movimentazione dei blocchi in condizioni di massima sicurezza sono necessari una serie di accorgimenti descritti in seguito:

- Occorre installare dispositivi di protezione dai colpi di frusta e dall'eventuale proiezione delle perline, questi possono essere realizzati mediante l'impiego di

materiali da costruzione come acciaio con profili ad U o H, canalette in legno o in griglia metallica, lamiere di acciaio o alluminio;

- Utilizzare fili diamantati certificati e dotati di protezione esterna in materiale plastico atta ad evitare il distacco ed il lancio di perline. Tali fili devono essere conservati in luoghi adatti e devono essere sottoposti ad un attento controllo prima dell'impiego per valutare la presenza di corrosione o di punti deboli;
- Cercare di limitare al minimo la lunghezza del tratto di filo libero durante l'installazione della macchina da taglio in modo da circoscrivere l'area di pericolo del colpo di frusta;
- Assicurarsi che il personale impegnato nelle operazioni si trovi ad una distanza di sicurezza dalla macchina e fuori dal cono di proiezione del filo in caso di colpo di frusta;
- Assicurarsi della stabilità dei blocchi già tagliati prima della loro movimentazione tramite autogrù;
- Evitare la contemporaneità tra la fase di taglio ed altre lavorazioni nelle immediate vicinanze al diaframma da abbattere e alla macchina tagliatrice.

Durante la fase di abbattimento del diaframma occorre un costante controllo dei livelli di pressurizzazione interna, poiché alla messa in comunicazione idraulica dei due compartimenti adiacenti, corrisponderà un calo di pressione determinato dall'aumento di volume da pressurizzare.

### **5.3.8 Procedure di accesso-uscita e tabelle di decompressione utilizzate**

Nel Piano di Sicurezza e Coordinamento (elaborato 2.a - Scavo galleria in pressione cap. 8) vengono riportate le procedure di compressione e decompressione previste per l'ingresso e l'uscita del personale all'interno della camera di scavo.

Sono descritte le procedure di competenza dell'Operatore Tecnico Iperbarico (OTI), del Manager delle Operazioni iperbariche (MOI) e del Medico Iperbarico (MI). Inoltre, vengono descritte le procedure che il personale deve seguire, quali:

- Check preliminare della camera di compensazione;
- Pressurizzazione della camera principale;
- Depressurizzazione ed uscita dalla camera di lavoro;
- Registrazione del report delle operazioni iperbariche.

- Procedure di emergenza;
- Tabelle di decompressione e durata dei turni di lavoro.

Le prescrizioni seguono quanto descritto nel paragrafo 4.5 (Procedure di ingresso-uscita dalla camera di lavoro).

Le tabelle di decompressione utilizzate nel progetto della galleria Casalnuovo derivano dalla normativa francese e tengono in considerazione le soste da effettuare durante la decompressione e la variazione della durata del turno di lavoro in funzione del livello di pressurizzazione in accordo con quanto indicato nelle buone pratiche (paragrafo 4.5.1).

La corretta applicazione delle procedure di compressione e decompressione rappresenta la principale misura di sicurezza per prevenire l'insorgenza di malattie di tipo barotraumatico (Barotrauma, Embolie, Osteonecrosi iperbarica). Occorre quindi impiegare personale specializzato (Operatore Tecnico Iperbarico, Medico iperbarico) e sistemi di controllo e registrazione dei parametri di riferimento (sovrappressione, tempo di esposizione, ecc.).

### **5.3.9 Sistema di Gestione e Piano delle emergenze**

Nel Progetto Esecutivo è presente un'appendice specifica riguardo il "Piano delle emergenze" (elaborato 2.g) riferita alla galleria Casalnuovo. Tale documento ha l'obiettivo di:

- Definire i vari scenari di emergenza possibili;
- Definire le regole generali di comportamento in caso di emergenza;
- Garantire le misure necessarie a garantire un celere intervento da parte dei soccorritori;
- Evidenziare le informazioni necessarie per la redazione dei piani di emergenza ed evacuazione;
- Specificare le mansioni delle figure professionali coinvolte nella gestione delle emergenze.

#### **5.3.9.1 Comunicazione e coordinamento sicurezza**

Nel caso della galleria GA01 Casalnuovo, il massimo livello di sovrappressione che si raggiunge (1 bar nel compartimento 5) risulta essere inferiore alla soglia di 1.5 bar indicata nel DPR n. 321-56 come il limite oltre il quale occorre disporre di una camera

iperbarica terapeutica in cantiere. Come già specificato in precedenza questo DPR risulta obsoleto ed aspecifico, occorre quindi far riferimento alla paragrafo 327 della “A guide to the work in compressed air regulation” (British Tunnelling Society, 2012) che indica l’obbligo della presenza della camera iperbarica terapeutica in cantiere con pressioni di lavoro superiori a 0.7 Bar. I progettisti, seguendo la normativa italiana, hanno invece optato per il trasporto dell’infortunato direttamente in una delle 5 strutture ospedaliere esterne presenti sul territorio oggetto dell’intervento.

Per avere un celere intervento in caso di incidente risulta però necessario, non solo individuare una struttura ospedaliera esterna, ma anche un’attenta valutazione dei tragitti migliori e dei tempi d’intervento con cui la squadra di soccorso riesca a prestare assistenza al cantiere. La forte antropizzazione dell’opera condiziona gli accessi al cantiere e la viabilità esterna, per questo motivo nell’elaborato 2.f sono state individuate le principali interferenze tra il tracciato dell’opera e la viabilità preesistente. Inoltre, il progetto di cantierizzazione prevede la suddivisione dell’intera area interessata dall’opera in 9 zone caratterizzate ognuna da:

- Un varco di accesso dalla viabilità esterna;
- Una viabilità interna idonea al passaggio dei mezzi di soccorso ed utilizzabile anche in presenza di condizioni meteo avverse;
- Un posizionamento dei varchi di accesso in grado di garantire almeno 2 percorsi di viabilità esterna ai mezzi di soccorso per il raggiungimento delle strutture ospedaliere in circa 20 minuti;
- Presenza di un container prefabbricato nelle disponibilità del servizio sanitario interno al cantiere destinato a locale infermeria.

Nel “Piano delle emergenze” vengono inoltre riportati gli accordi ed i protocolli operativi da redigere con enti pubblici e di soccorso (118, VVFF) e vengono previste delle riunioni periodiche, con cadenza mensile, in cui l’impresa affidataria informa il personale tecnico degli enti coinvolti nelle operazioni dei contenuti e delle eventuali modifiche al piano delle emergenze.

Nel presente elaborato si è individuata la presenza nel territorio di presidi ospedalieri “pertinenti” (in accordo con quanto indicato nel paragrafo 4.7) , cioè dotati di camera iperbarica e di personale idoneo alla gestione di una malattia da decompressione; oltre alla localizzazione delle stazioni dei vigili del fuoco.

I centri iperbarici individuati fanno parte della rete nazionale SIMSI (Società Italiana di Medicina Subacquea ed Iperbarica), associazione non a scopo di lucro impegnata nella ricerca scientifica e medica nell'ambito delle patologie di carattere iperbarico.

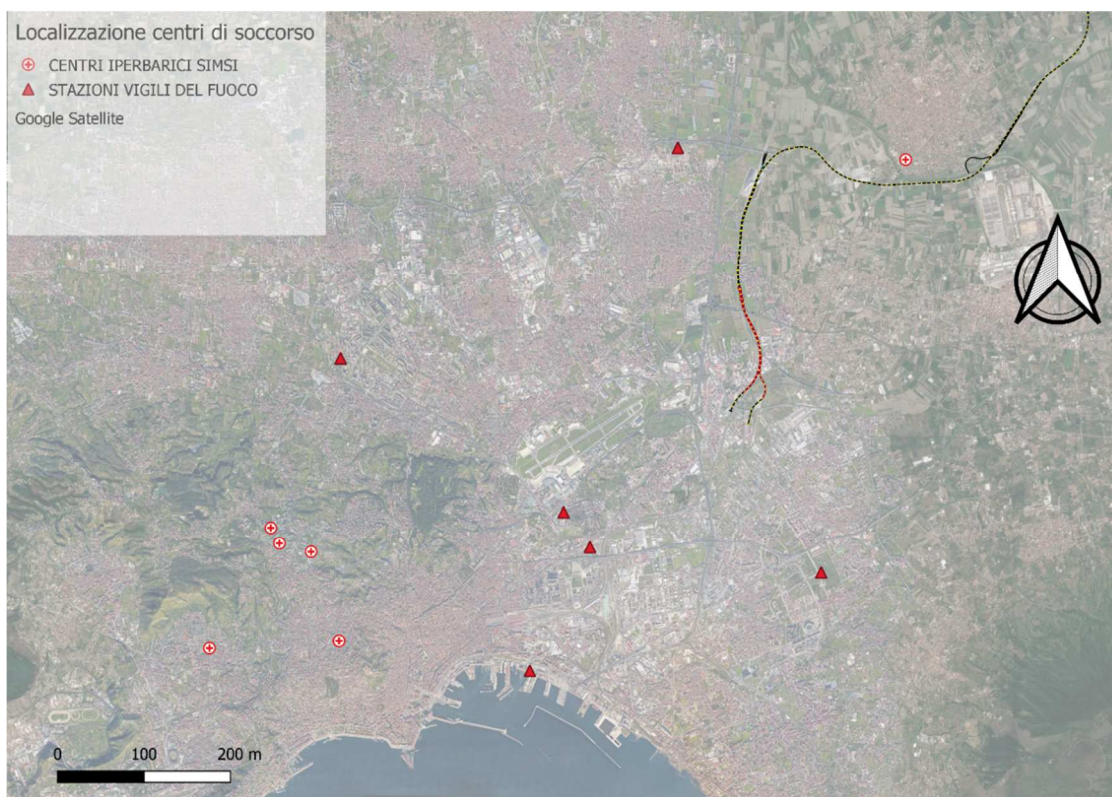


Figura 5-39: localizzazione dei centri di medicina iperbarica (SIMSI) e delle stazioni dei vigili del fuoco.

### 5.3.9.2 *Prevenzione e protezione dal rischio d'incendio*

Nel piano di Sicurezza e Coordinamento (elaborato 2.a) vengono descritte le misure di prevenzione e protezione adottate per il rischio incendio.

Inoltre, viene svolta un'attenta valutazione del rischio incendio, considerando la maggior infiammabilità dei materiali dovuta all'aumento della pressione parziale dell'ossigeno ( $PpO_2$ ) generata dal maggior livello di pressione rispetto a quello atmosferico. Infatti, all'interno di un ambiente iperbarico i materiali risultano maggiormente infiammabili rispetto alle condizioni atmosferiche anche se all'interno della galleria non si raggiungono mai temperature tali per il verificarsi di fenomeni di autocombustione dei materiali presenti. Quindi lo scoppio di un incendio deve essere sempre provocato da un innesco.

Nei cantieri iperbarici, rispetto ad una galleria scavata in condizioni atmosferiche, occorre incrementare l'efficacia del sistema antincendio, oltre ad una maggiore attenzione nella

riduzione dei rischi limitando quanto più possibile la presenza di materiali infiammabili o l'uso di fiamme libere.

Nel piano delle emergenze (elaborato 2.g) vengono invece riportare le procedure di emergenza in caso di incendio e prescrizioni generali di comportamento per la prevenzione degli incendi. Essendo un cantiere classificato come luogo di “attività a rischio incendio elevato” l'impresa affidataria, così come le imprese esecutrici, devono organizzare un servizio specifico dedicato alle situazioni di emergenza incendio, designano un numero di lavoratori idoneo per la gestione della prevenzione incendi e nella gestione delle emergenze.

## 6. CONCLUSIONI

Lo scavo in atmosfera iperbarica rappresenta una valida alternativa alle tradizionali tecnologie di pretrattamento dei terreni nella realizzazione di gallerie sotto falda, in particolare quando è necessario preservare la qualità della risorsa idrica e minimizzare gli effetti di subsidenza. Tuttavia, tale tecnica introduce problematiche relative alla salute e sicurezza dei lavoratori esposti all'atmosfera iperbarica, che richiedono l'adozione di specifiche misure di prevenzione, approcci progettuali e soluzioni costruttive.

Inoltre, è necessario colmare il vuoto normativo (l'unico riferimento esistente, il DPR 321/56, è obsoleto e contempla tecniche di scavo differenti) per disciplinare la realizzazione di opere di scavo in atmosfera iperbarica sul territorio italiano, attingendo dalle linee guida e normative esistenti in ambito internazionale. La normativa francese ed inglese costituiscono, ad oggi, i riferimenti più esaurienti e specifici sul tema, insieme alle linee guida dell'ITA-AITES ed alle NIR (oggi Linee Guida).

L'analisi critica dei principali aspetti progettuali e realizzativi ha portato alla redazione delle Buone Pratiche illustrate nel capitolo 4, nonché ad individuare gli argomenti di maggior rilievo per garantire condizioni di massima sicurezza per i lavoratori e la realizzazione dell'opera nei tempi e costi stabiliti, ovvero:

- **Caratterizzazione geologica ed idrogeologica:** finalizzata a determinare la permeabilità all'aria dei terreni attraversati dal tracciato dell'opera, la stratigrafia, i livelli piezometrici ed i fattori (naturali e antropici) che possono influenzarli;
- **Il monitoraggio dei livelli piezometrici:** da svolgere, sia in fase preliminare di progettazione sia durante la fase di realizzazione dell'opera, utilizzando un sistema di monitoraggio automatico (per garantire un'adeguata frequenza di lettura e la trasmissione del dato in tempo reale al Manager delle Operazioni iperbariche);
- **Il calcolo dei fabbisogni e delle perdite d'aria:** essenziale per un corretto dimensionamento del sistema di generazione e distribuzione dell'aria compressa e per la gestione in sicurezza dell'attività iperbarica. La procedura di calcolo definita nel presente elaborato è un utile riferimento sia per la progettazione che per la costruzione dell'opera;
- **Le procedure di compressione/decompressione:** devono essere gestite da personale idoneo e qualificato, rispettando le tabelle di decompressione indicate dalle normative vigenti (se assenti, si suggerisce l'adozione di quella francese);

- Le **dotazioni tecnico-impiantistiche** utilizzate devono rispettare gli standard tecnici adottati.

Il progetto della Galleria Casalnuovo, utilizzato per la verifica delle “Buone Pratiche” proposte, applica le principali raccomandazioni indicate al capitolo 4. Per alcuni aspetti, quali il calcolo delle portate d’aria necessarie ed il monitoraggio piezometrico in corso d’opera, sono stati illustrati approcci e tecnologie che consentono di garantire una corretta gestione del cantiere iperbarico in condizioni di massima sicurezza.

Sebbene forniscano utili contributi allo stato dell’arte (suggerimenti per la redazione di una normativa nazionale sul tema, indicazioni per la corretta progettazione e costruzione di gallerie in atmosfera iperbarica, misure di prevenzione e protezione, ecc.), il carattere di novità ed innovatività della tecnica di scavo iperbarico (mai applicata in Italia e poco a livello internazionale) impone che le Buone Pratiche proposte siano validate, migliorate ed aggiornate, adottando l’approccio delle NIR / Linee Guida, sulla base delle evidenze che emergeranno in corso d’opera.



## RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

- Baldovin, G., Cicolani, A., Gioda, G., Lavorato, A., (1992) "Dispositivi di drenaggio forzato per lo scavo di una grande galleria", *Rivista italiana di geotecnica*, 1/92.
- Balossi Restelli, A., (1995) "Il congelamento del terreno può risolvere situazioni difficili di scavo sotto battente di falda", *Rivista italiana di geotecnica*, 3/95.
- Celico, P., Esposito, L., De Gennaro, M., Mastrangelo, E., (1994). "La falda ad oriente della città di Napoli: idrodinamica e qualità delle acque", *Atti del: "II convegno nazionale dei giovani ricercatori di geologia applicata"*. Roma (1994), 654-655.
- Grant, C., (2006). Chapter 61 Air Permeability., "Taylor & Francis Group", 2006.
- Palla, R., Leitner, S., Herdina, J., (2015) "Applicazione del jet grouting per scavi sottofalda in condizioni iperbariche nell'ambito di diversi lotti nella costruzione di gallerie", *Rivista: "Gallerie e grandi opere sotterranee"*, n.114-giugno 2015, pag 7-17.
- Schwarz, J., Hehenberger, D., (2004). "Compressed air for top down". *Tunnels & Tunnelling International*, 49–51.
- Schwarz, J., Meyer D., (2001). "AUDI-Tunnel Ingolstadt: Deckelbauweise unter Druckluft in gespanntem Druckwasser". *Stuva*.
- Javadi, A. A., Farmani, R., Toropov, V. V., & Snee, C. P. M. (1999). "Identification of parameters for air permeability of shotcrete tunnel lining using a genetic algorithm". *Computers and Geotechnics*, 25(1), 1–24.
- Russo, M., "Paratie: normative, dimensionamento ed esempi pratici", *Cours de perfectionnement professionnel "Opere di sostegno per scavi"*, SUPSI Lugano (CH), 23.03.2005
- Snee, C. P. M., & Javadi, A. A. (1996). Prediction of Compressed Air Leakage from Tunnels. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 11(2), 189–195.
- Chiarelli, M., (2016). "Il metodo top-down e bottom-up", *ferrovie & metropolitane*, 5-2016, 2–6.

## **RIFERIMENTI NORMATIVI**

*British Tunnelling Society, Compressed Air Working Group A guide to the Work in Compressed Air Regulations 1996. (June)*

*D.P.R. 22 ottobre 2001 n. 462, "Regolamento di semplificazione del procedimento per la denuncia di installazione e dispositivi di protezione contro le scariche atmosferiche, di dispositivi di messa a terra di impianti elettrici e di impianti elettrici pericolosi."*

*D.lgs. 9 aprile 2008, n. 81. "Testo unico sulla salute e sicurezza sul lavoro".*

*D.P.R. 20 marzo 1956 n. 321, "Norme per la prevenzione degli infortuni e l'igiene del lavoro nei cassoni ad aria compressa".*

*Arrêté du 28 janvier 1991, "Définissant les modalités de formation à la sécurité des personnels intervenant dans des opérations hyperbares".*

*Decret n 2011-45 du 11 janvier 2011, relatif "a la protezion dei travailleurs en millieu hyperbare", Ministere du travail, de l'emploi et de la santé.*

*Guidelines For Good Working Practice In High Pressure Compressed Air ITA Working Group n ° 5 Health & Safety in Works In Association With the British Tunnelling Society Compressed Air Working Group. (2015)*

*Consiglio federale svizzero, (2015), "Ordinanza sulla sicurezza dei lavoratori nei lavori in condizioni di sovrappressione". 15-aprile-2015, 1-22.*

*Norma UNI 11366. (2010), "Sicurezza e tutela della salute nelle attività subacquee ed iperbariche professionali al servizio dell'industria - Procedure operative", 24-giugno-2010.*

*Linea guida n.5, (Febbraio 2015), "Sicurezza antincendio nella realizzazione di gallerie", Conferenza delle Regioni e delle Provincie Autonome.*

*Linea guida n.7, (Settembre 2015), "Sistema di ventilazione premente in gallerie, controllo dei parametri di ventilazione", Conferenza delle Regioni e delle Provincie Autonome.*

*Linea guida n.4, (Febbraio 2015), "Sistema di gestione delle emergenze nei cantieri per lo scavo di gallerie", Conferenza delle Regioni e delle Provincie Autonome.*

## SITI INTERNET

- [http://zonesismiche.mi.ingv.it/mappa\\_ps\\_apr04/campania.html](http://zonesismiche.mi.ingv.it/mappa_ps_apr04/campania.html) (Visitato in data 23/06/2019)
- <https://simsi.it/wp-content/uploads/2019/06/Elenco-Centri-Iperbarici-Italia.pdf> (Visitato in data 23/06/2019)
- <http://www.vigilfuoco.it/sitiVVF/campania/> (Visitato in data 23/06/2019 )
- <http://www.unipd-org.it/rls/pericolirischi/Rischi/Fisico/Iperbariche/Atmosfere%20iperbariche.html> (Visitato in data 23/06/2019 )
- <https://www.msmanuals.com/it-it/casa/lesioni-e-avvelenamento/lesioni-da-immersione-e-da-aria-compressa> (Visitato in data 12-07-2019 )
- <https://cityrailways.com/tecniche-costruttive-per-gallerie-in-ambito-urbano/> (Visitato in data 22-10-2019 )
- <https://www.metro4milano.it/costruire-una-metropolitana/tecniche-di-costruzione/> (Visitato in data 22-10-2019 )
- <https://www.pizzi-instruments.it/piezometro-casagrande/> (Visitato in data 22-10-2019)
- <http://www.metroricerche.it/blog/2014/09/20/50-anni-della-linea-mm1-1964-2014-il-metodo-milano-e-la-icos/> (Visitato in data 27/11/2019 )
- <http://www.waterstops.it/> (Visitato in data 27/11/2019 )
- <https://www.trevispa.com/it/Tecnologie/jet-grouting>(Visitato in data 27/11/2019)
- <https://www.sisgeo.com/it/prodotti/piezometri/item/piezometri-casagrande-e-a-tubo-aperto.html> (Visitato in data 29/11/2019)
- <https://www.diamant-boart.com/it/>(Visitato in data 09/12/2019)
- <http://www.rfi.it/cms/v/index.jsp?vgnextoid=5c913e87c65ec410VgnVCM1000008916f90aRCRD&vgnextchannel=61fe3e87c65ec410VgnVCM1000008916f90aRCRD> (Visitato in data 11/12/2019)
- <https://www.ilsole24ore.com/art/alta-velocita-via-bari-napoli-investimento-62-miliardi-ACIsuvy> (Visitato in data 22/01/2020)
- <https://www.egeolab.it/datalogger-e-telemetrie/telemetria-sts-gsm> (Visitato in data 24/01/2020)
- [https://www.sfirion.de/images/projects/Projektdatenblatt\\_Knoten\\_Ingolstadt.pdf](https://www.sfirion.de/images/projects/Projektdatenblatt_Knoten_Ingolstadt.pdf) (Visitato in data 25/01/2020)