

# REGIONE CAMPANIA

Acqua Campania S.p.A.

UTILIZZO IDROPOTABILE DELLE ACQUE  
DELL'INVASO DI CAMPOLATTARO E  
POTENZIAMENTO DELL'ALIMENTAZIONE  
POTABILE PER L'AREA BENEVENTANA

## PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICA ED ECONOMICA

Stralcio Allegato IV D.L. 31.05.2021 n.77 - L. di conversione 21.07.2021 n.108

Responsabile Unico del Procedimento  
Dirigente Ciclo Integrato delle Acque della G.R. della Campania  
Ing. Rosario Manzi

Il Concessionario  
**Acqua Campania S.p.A.**  
Direttore Generale  
Area Tecnica  
(Ing. Gianluca Maria SALVIA)



I Progettisti



Coordinatore responsabile della  
Integrazione delle Prestazioni  
Specialistiche

Revisione	Data	Descrizione	Redatto	Controllato	Approvato
0	Dicembre 2021	EMISSIONE PER VIA	P. Fantini	G. Ragazzo	F. Rossi
TITOLO : <b>RELAZIONE TECNICA</b> <b>GALLERIA DI DERIVAZIONE E</b> <b>OPERE CONNESSE</b>			Progettazione:  <b>VIANINI LAVORI S.p.A.</b>  <b>FINALCA</b> ingegneria Srl		
Allegato	<b>ED.02.7</b>		Revisione: 0	Scala: -	

## **INDICE**

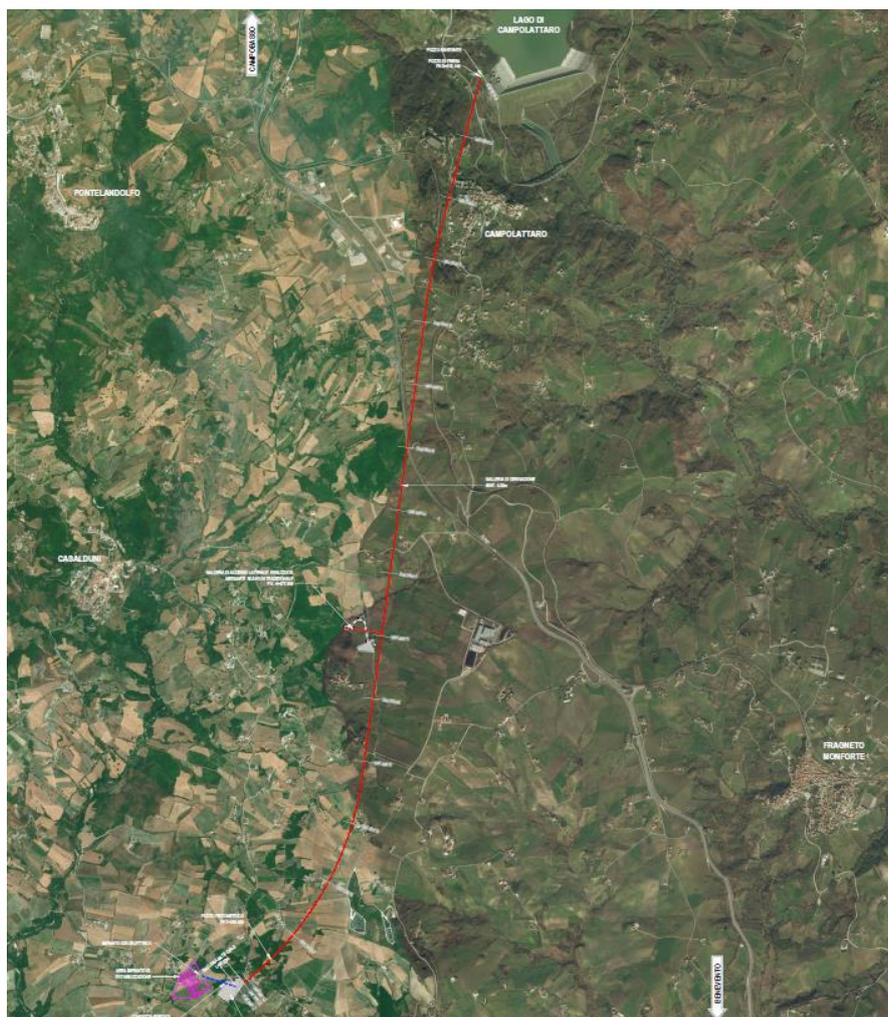
<b>1. INTRODUZIONE .....</b>	<b>3</b>
<b>2. DESCRIZIONE DELLE OPERE.....</b>	<b>5</b>
2.1 GALLERIA DI DERIVAZIONE .....	5
2.2 GALLERIA DI ACCESSO LATERALE .....	11
2.3 POZZO PIEZOMETRICO .....	14
<b>3. CONSIDERAZIONI GENERALI.....</b>	<b>16</b>
3.1 SCELTA DI ADOTTARE UNA GALLERIA PORTA-TUBI.....	16
<b>4. INQUADRAMENTO GEOLOGICO-GEOTECNICO .....</b>	<b>20</b>
4.1 MODELLO GEOLOGICO DI SOTTOSUOLO .....	20
4.2 CARATTERIZZAZIONE GEOTECNICA DEL SITO .....	24
4.3 RISCHI POTENZIALI .....	25
<b>5. METODI DI SCAVO .....</b>	<b>28</b>
5.1 SCAVO IN TRADIZIONALE .....	29
5.2 SCAVO IN MECCANIZZATO .....	38
<b>6. CONSIDERAZIONI QUALITATIVE SULLA SCELTA DEL METODO DI SCAVO .....</b>	<b>44</b>
6.1 GENERALE .....	44
6.2 CONFRONTO TRA SCAVO IN TRADIZIONALE E MECCANIZZATO.....	44
6.3 CONSIDERAZIONI SULLA PROGETTAZIONE E SUL TEMPO DI AVVIO.....	45
6.4 CONSIDERAZIONI SULLO SCOPO FINALE .....	46
6.5 SALUTE, SICUREZZA E AMBIENTE DI LAVORO .....	46
6.6 VELOCITÀ DI AVANZAMENTO .....	50
6.7 FLESSIBILITÀ .....	52
6.8 RISCHI GEOLOGICI .....	52
6.9 STABILITÀ DEL CAVO.....	55
6.10 PERSONALE OPERATIVO E DI COSTRUZIONE .....	55
6.11 QUALITÀ DEL PROFILO DI SCAVO.....	56
6.12 IMPATTO AMBIENTALE .....	56
<b>7. PREDIMENSIONAMENTO DEI RIVESTIMENTI.....</b>	<b>58</b>
7.1 SCAVO IN TRADIZIONALE DELLA DISCENDERIA DI ACCESSO LATERALE .....	58

**Regione Campania – Acqua Campania S.p.a.**  
*UTILIZZO IDROPOTABILE DELLE ACQUE DELL'INVASO DI CAMPOLATTARO  
E POTENZIAMENTO DELL'ALIMENTAZIONE POTABILE PER L'AREA BENEVENTANA  
PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICA ED ECONOMICA*

7.2	SCAVO IN MECCANIZZATO DELLA GALLERIA DI DERIVAZIONE .....	63
<b>8.</b>	<b>MONITORAGGIO E APPROCCIO OSSERVAZIONALE.....</b>	<b>67</b>
8.1	PIANO DI MONITORAGGIO .....	67
8.2	APPROCCIO OSSERVAZIONALE .....	70
<b>9.</b>	<b>CONCLUSIONI.....</b>	<b>85</b>
9.1	GALLERIA DI DERIVAZIONE .....	85
9.2	GALLERIA DI ACCESSO LATERALE .....	86
	<b>BIBLIOGRAFIA.....</b>	<b>88</b>

## 1. INTRODUZIONE

Le opere previste si inquadrano nell'ambito del Progetto di Fattibilità Tecnica ed Economica dell'"Utilizzo idropotabile delle acque dell'invaso della diga di Campolattaro", e tratta in particolare la galleria di derivazione e le opere ad essa connesse (pozzo di interconnessione presso l'opera di presa; discenderia laterale; pozzo piezometrico e le opere nell'area di imbocco).



**Figura 1: Planimetria di inquadramento.**

La presente relazione ha lo scopo di fornire una panoramica di carattere tecnico-descrittivo sulle principali peculiarità che caratterizzano le opere previste in progetto.

Nei successivi capitoli verranno illustrati i seguenti argomenti:

- descrizione sintetica delle opere;
- considerazioni generali di carattere costruttivo;
- descrizione del modello geologico-geotecnico della tratta oggetto di studio;
- descrizione delle principali metodologie utilizzate per lo di scavo di una galleria;
- considerazioni di carattere qualitativo sulla scelta del metodo di scavo;
- predimensionamento dei rivestimenti.

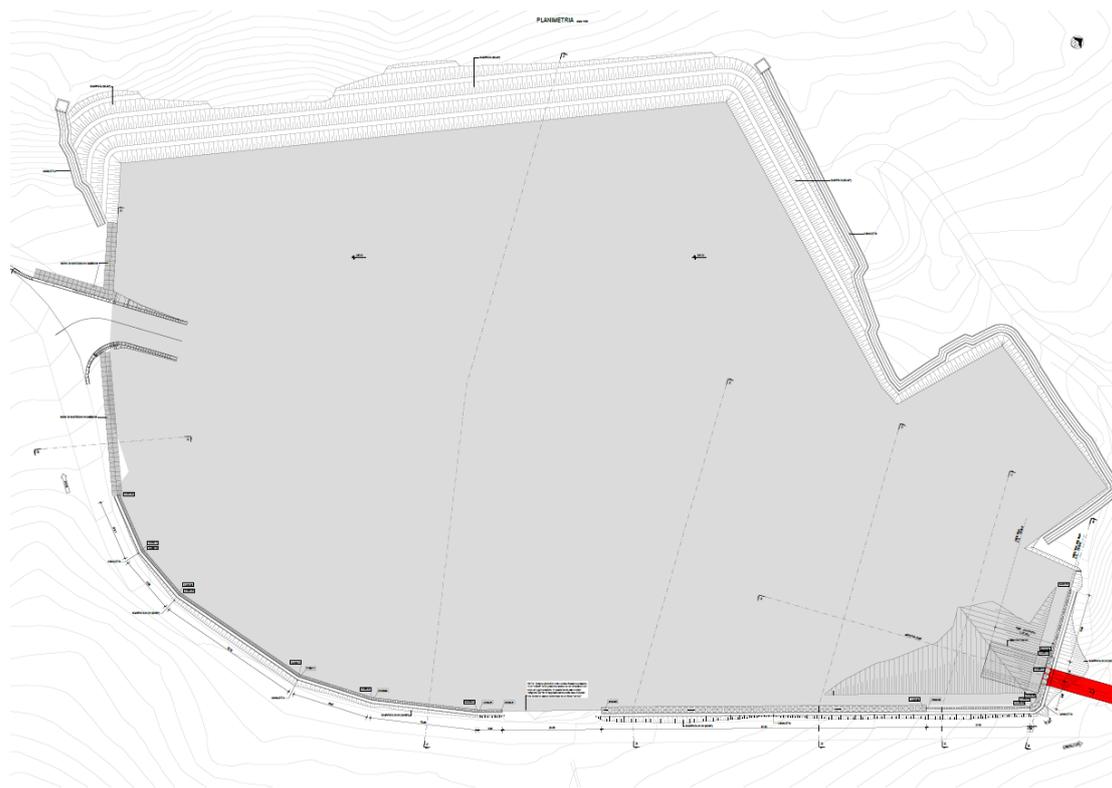
## 2. DESCRIZIONE DELLE OPERE

### 2.1 GALLERIA DI DERIVAZIONE

Una parte centrale del progetto è costituita dalla galleria di derivazione che garantisce il trasporto dell'acqua dall'invaso di Campolattaro fino all'area impianti. L'itinerario, per conservare la quota della livelleta dell'acquedotto intorno a 340m slm, prevede l'attraversamento dell'area con una galleria avente uno sviluppo pari a 7,602 km.

#### 2.1.1 Area di imbocco

L'area di cantiere per lo scavo della galleria di derivazione è situata nei pressi della progressiva 7+542,8 ed ha un'estensione di circa 24300 m<sup>2</sup>.



**Figura 2: Planimetria area di cantiere – Galleria di derivazione.**

La realizzazione del piazzale di progetto prevede una riprofilatura del terreno in sito, parte in rinterro (sostenuta mediante realizzazione di muri di sostegno in terra armata) e parte in scavo (sostenuta mediante realizzazione di paratie di

micropali).



Figura 3: Sezione area di cantiere – Galleria di derivazione.

La figura seguente mostra il particolare dell'opera di sostegno nella zona di imbocco della galleria di derivazione.

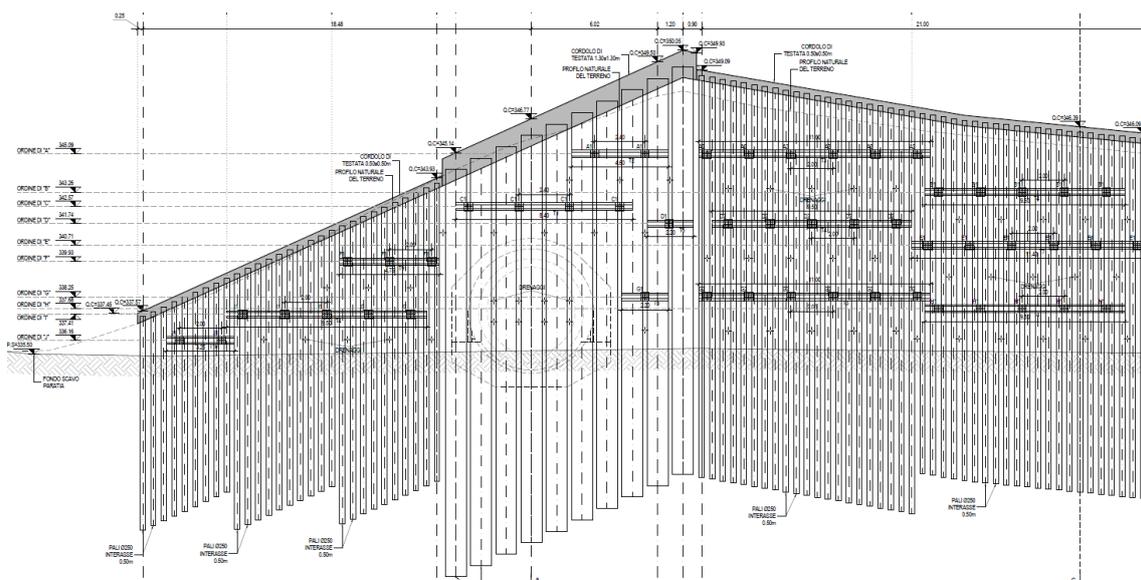
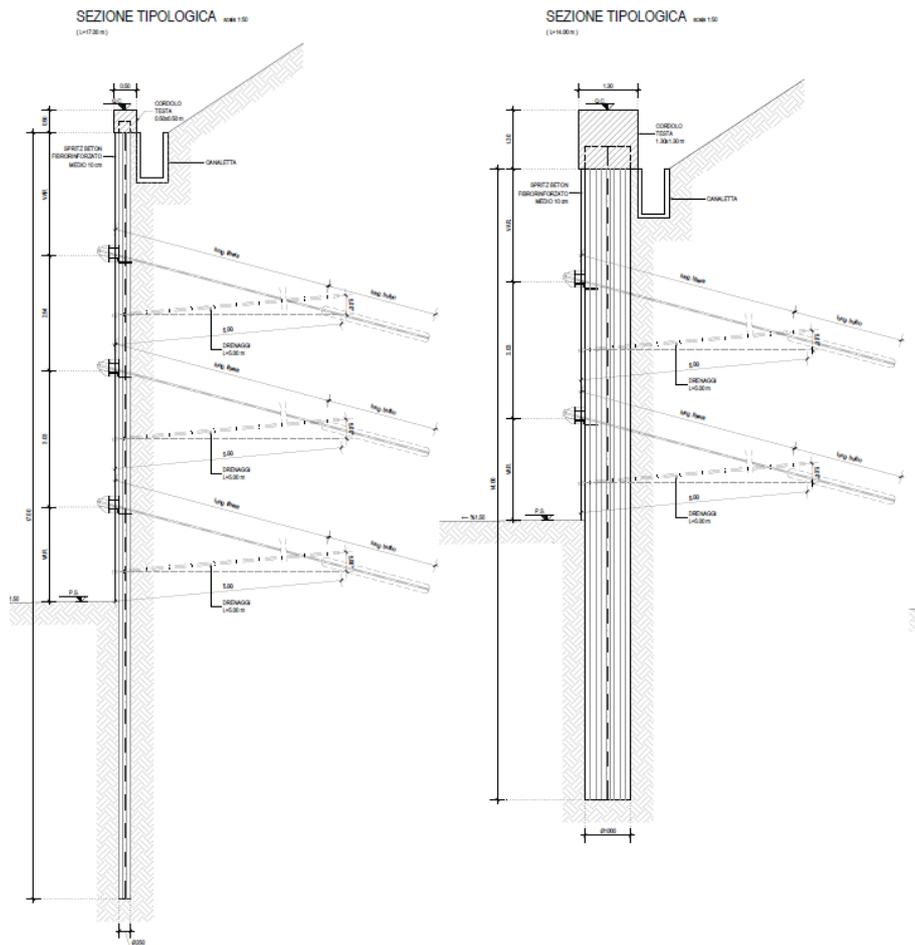


Figura 4: Zona di imbocco galleria di derivazione – sviluppata paratia di micropali.

La sezione tipo di tale opera prevede la realizzazione di pali  $\Phi 1000\text{mm}$  e interasse 1,2 m e micropali aventi diametro pari a 250 mm e passo pari a 50 cm. Per tale paratia sono previsti tre livelli di ancoraggio realizzati mediante esecuzione di tiranti provvisori a quattro trefoli alloggiati in preforo.

**Regione Campania – Acqua Campania S.p.a.**  
**UTILIZZO IDROPOTABILE DELLE ACQUE DELL'INVASO DI CAMPOLATTARO**  
**E POTENZIAMENTO DELL'ALIMENTAZIONE POTABILE PER L'AREA BENEVENTANA**  
**PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICA ED ECONOMICA**



**Figura 5: Sezione tipo paratia di micropali.**

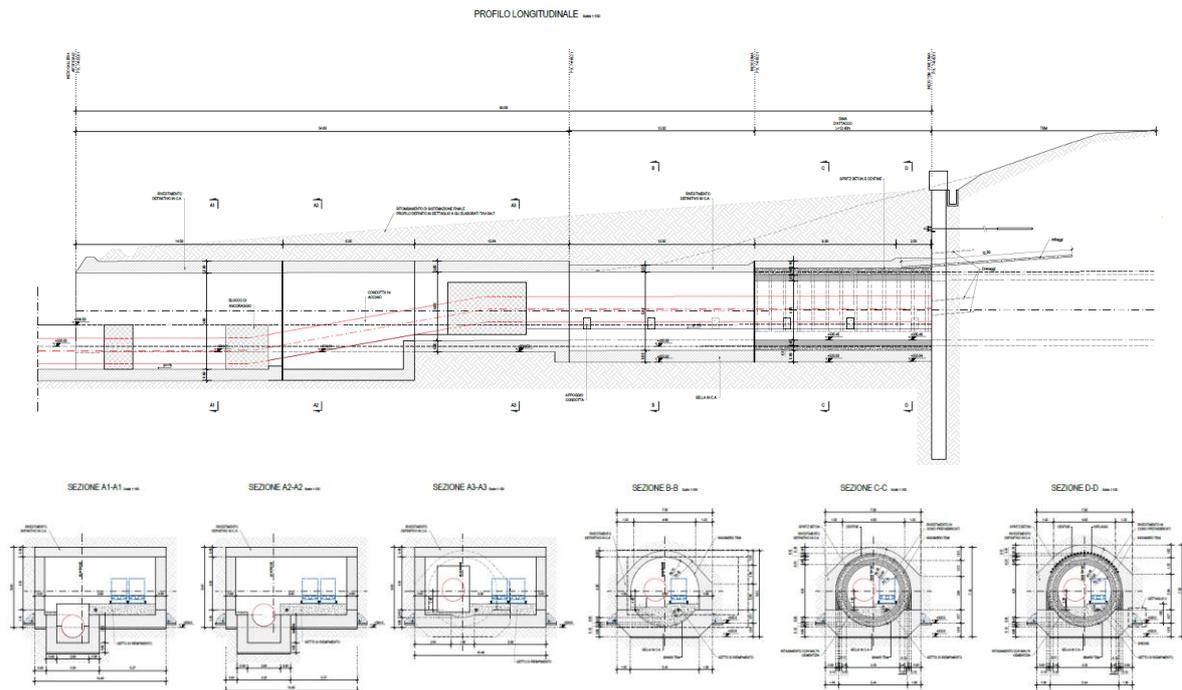
Una galleria artificiale di lunghezza pari a 60 m verrà realizzata in questo portale. Essa sarà composta da due sezioni tipo principali:

- sezione con volta circolare, in corrispondenza della dima e della sella della TBM,
- sezione scatolare, in corrispondenza della sella del back-up della TBM.

Nella seconda parte della galleria artificiale, inoltre, è previsto l'interramento della condotta forzata sotto il piano di calpestio nonché una zona di ricarica per i mezzi di manutenzione, alimentati a batteria.

Un ritombamento della galleria artificiale con conseguente rinverdimento è previsto nella sistemazione finale del portale per un migliore inserimento dell'opera nell'ambiente circostante.

**Regione Campania – Acqua Campania S.p.a.**  
**UTILIZZO IDROPOTABILE DELLE ACQUE DELL'INVASO DI CAMPOLATTARO**  
**E POTENZIAMENTO DELL'ALIMENTAZIONE POTABILE PER L'AREA BENEVENTANA**  
**PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICA ED ECONOMICA**



**Figura 6: Profilo con sezioni della galleria artificiale**

### **2.1.2 Connessione con la galleria esistente**

Nei pressi del lago di Campolattaro, più precisamente tra la progressiva 0+000.00 e 0+500.00, è presente un tratto esistente della galleria di derivazione, connesso al pozzo ed alla galleria di presa. Tale tratto dovrà essere raccordato alla restante parte di galleria di derivazione da realizzare.

Tale collegamento si compone di due strutture:

- un pozzo del diametro interno di 6 m e di circa 45 m di profondità,
- una galleria di collegamento tra il pozzo in progetto e quello esistente.

Il pozzo garantisce:

- l'accesso per l'installazione e la manutenzione degli impianti idraulici, ovvero della valvola di sezionamento e della condotta di derivazione;
- la ventilazione per la galleria di derivazione;

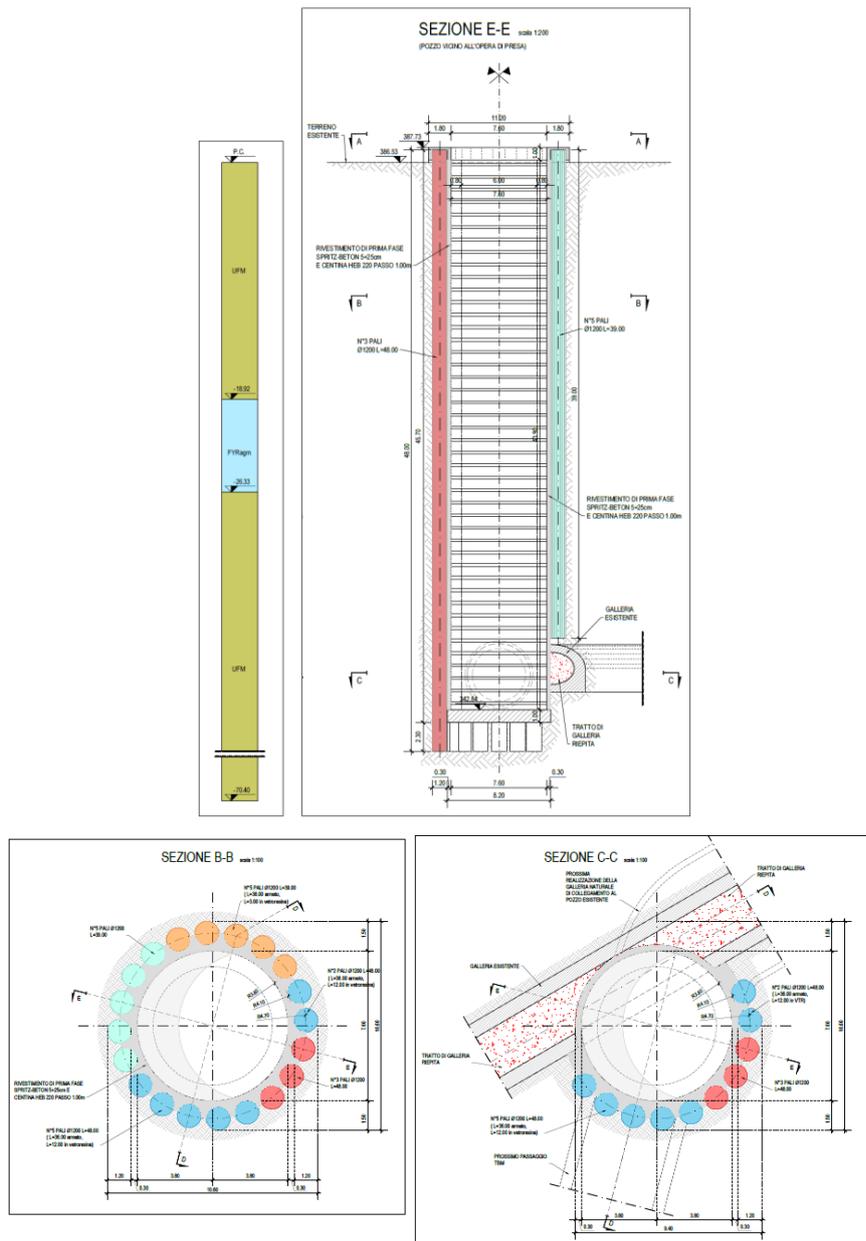
La sezione funzionale del pozzo garantisce:

- l'installazione e la movimentazione della valvola di sezionamento e della condotta;

**Regione Campania – Acqua Campania S.p.a.**  
**UTILIZZO IDROPOTABILE DELLE ACQUE DELL'INVASO DI CAMPOLATTARO**  
**E POTENZIAMENTO DELL'ALIMENTAZIONE POTABILE PER L'AREA BENEVENTANA**  
**PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICA ED ECONOMICA**

- l'alloggiamento di una scala di accesso tra il piano campagna e la galleria di derivazione;
- lo spazio per il veicolo di manutenzione.

Lo smontaggio e l'estrazione della macchina di scavo avverranno, inoltre, all'interno del pozzo.



**Figura 7: Connessione con tratto di galleria esistente.**



## 2.2 GALLERIA DI ACCESSO LATERALE

Alla progressiva chilometrica 4+477,8 è prevista una galleria di accesso laterale il cui sviluppo è circa pari a 275m con una pendenza del 13,5%.

Tale tunnel, oltre alla funzione di accesso laterale alla galleria di derivazione, assicura anche un'uscita di emergenza intermedia nonché il corretto funzionamento della ventilazione dell'intero sistema di gallerie grazie alla centrale di ventilazione realizzata al suo imbocco.

Per tale opera la realizzazione della piazzola di imbocco prevede l'esecuzione di un'opera di sostegno allo scavo realizzata mediante paratia di pali.

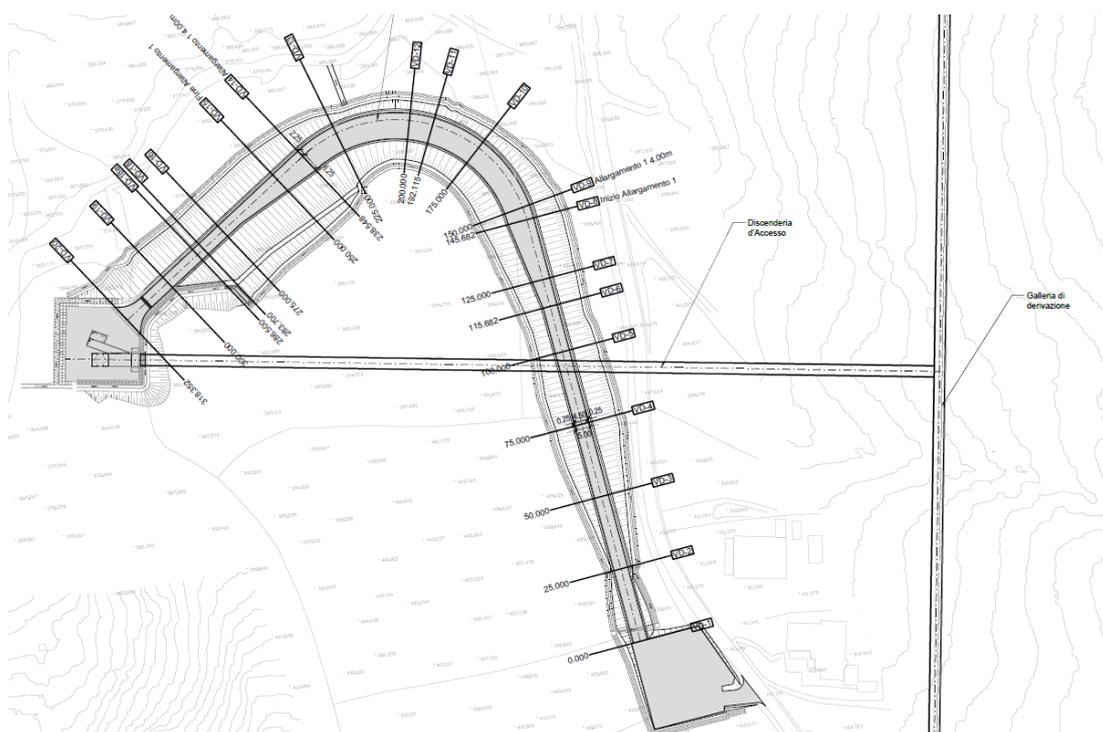
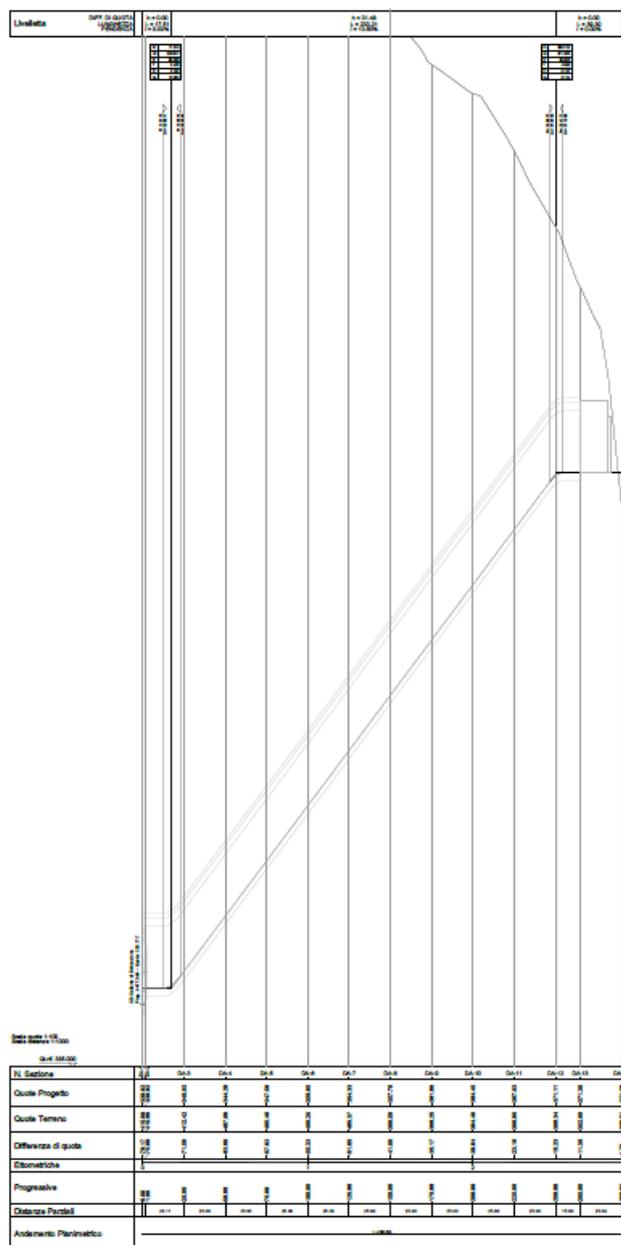


Figura 9: Planimetria - Galleria di accesso laterale.

**Regione Campania – Acqua Campania S.p.a.**  
**UTILIZZO IDROPOTABILE DELLE ACQUE DELL'INVASO DI CAMPOLATTARO**  
**E POTENZIAMENTO DELL'ALIMENTAZIONE POTABILE PER L'AREA BENEVENTANA**  
**PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICA ED ECONOMICA**



**Figura 10: Sezione - Galleria di accesso laterale.**

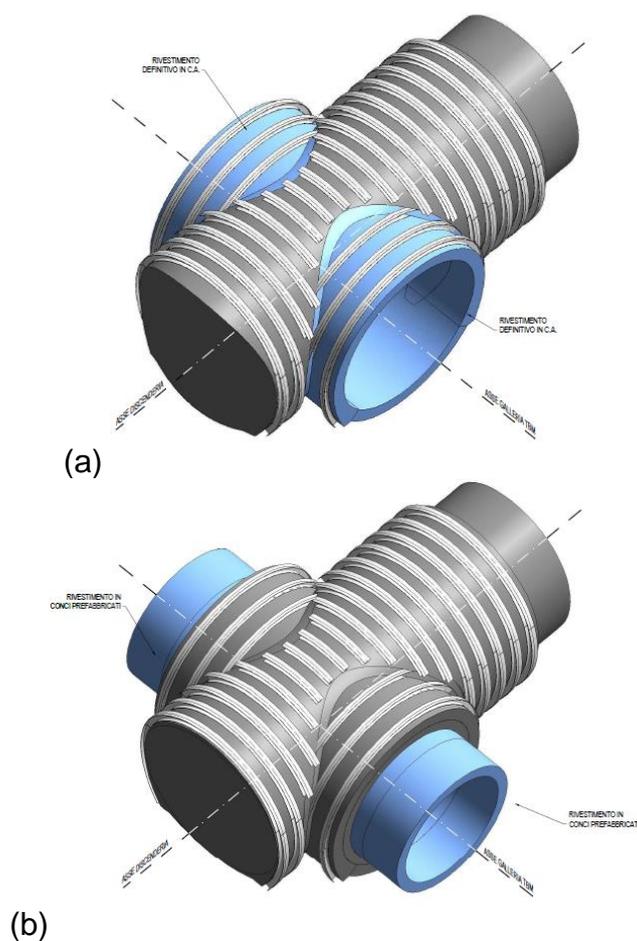
Nella zona di connessione tra la galleria di accesso laterale e la galleria di derivazione è prevista la realizzazione di una camera di collegamento in modo da permettere un accesso dei mezzi di manutenzione per la fase di esercizio. Anche in questo caso il camerone sarà scavato in tradizionale.

L'intersezione tra la galleria di derivazione e la discenderia di accesso laterale è

ubicata alla progressiva chilometrica 4+477,8 della galleria di derivazione ed è scavata in metodo tradizionale a partire dalla discenderia. La camera di intersezione è, dunque, realizzata prima del passaggio della macchina di scavo, momento in cui anche il rivestimento definitivo della camera sarà già stato gettato.

Il sostegno temporaneo è previsto con centine e calcestruzzo proiettato mentre il rivestimento definitivo è in cemento armato.

La figura seguente presenta una vista assonometrica della camera di collegamento prima e dopo il passaggio della fresa.



**Figura 11: Camera di collegamento alla discenderia prima (a) e dopo (b) il passaggio della macchina di scavo**

### **2.3 POZZO PIEZOMETRICO**

Tra le opere idrauliche legate al funzionamento della diga una delle più importanti è il pozzo piezometrico che permette di proteggere la condotta in pressione dalla sovrappressione del colpo d'ariete. Tale pozzo è posto alla progressiva chilometrica 7+258, ovvero a monte della condotta forzata.

Il pozzo piezometrico ha una profondità di circa 80 m ed un diametro interno di 5 m, ad eccezione del punto di intersezione con il tunnel dove è richiesto un diametro interno di 6,5 m.

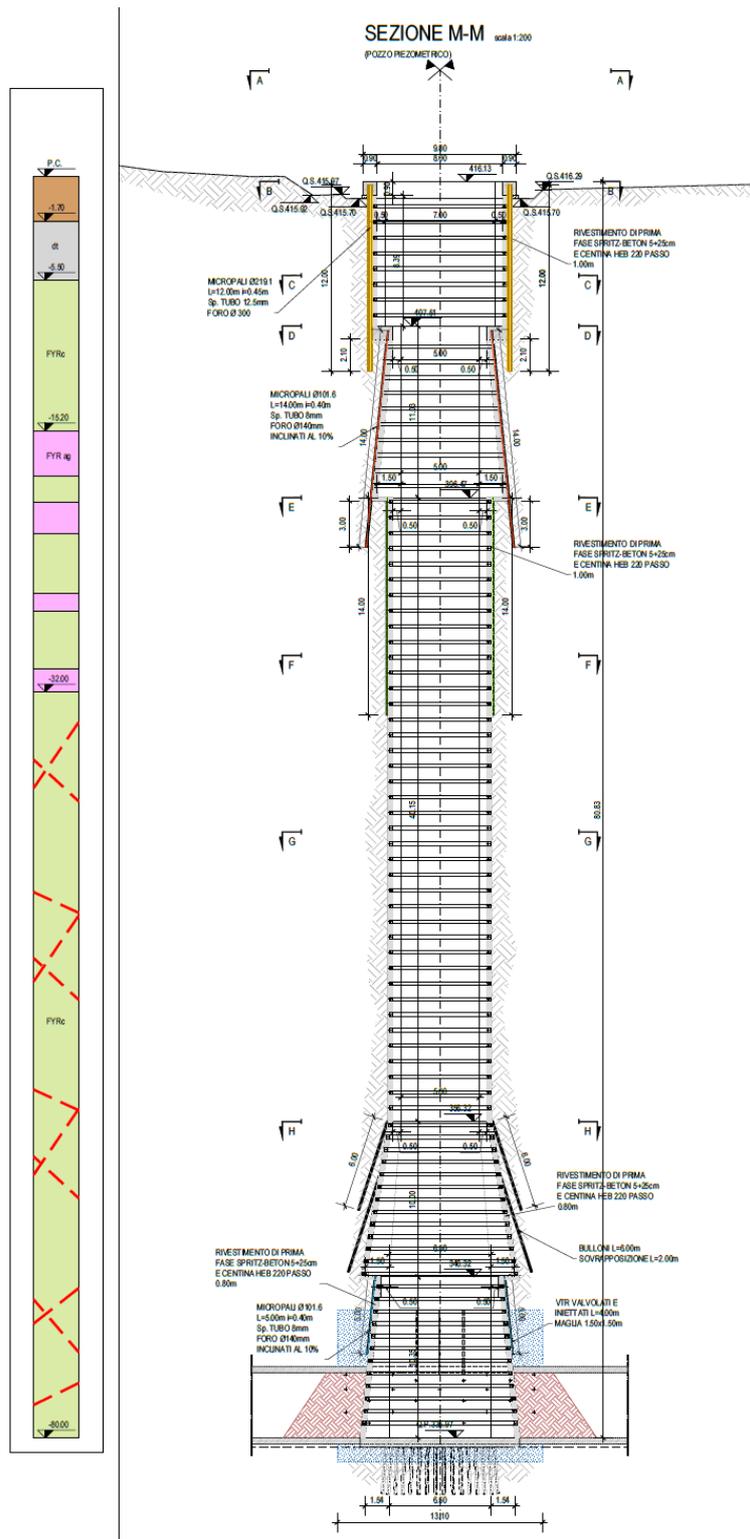
All'interno del pozzo una condotta con un diametro nominale di 2200 mm, ancorata al rivestimento definitivo, assicura la funzionalità idraulica mentre l'accesso per motivi di ispezione e manutenzione è garantito da una scala che permette la discesa dalla superficie al livello del tunnel.

Il pozzo è realizzato per sottomurazione e sostenuto da un supporto temporaneo di prima fase caratterizzato da centine HEB 220 con interasse di 1 m e da uno strato di 30 cm di calcestruzzo proiettato. Nella sezione finale troncoconica prima dell'intersezione con la galleria, l'interasse tra le centine si riduce a 0.8 m.

Il pozzo emerge in superficie con un manufatto sommitale circolare di diametro interno 9,20 m e di altezza netta 3,50 m. La copertura è dotata di botola apribile ovvero di elementi fissi, asportabili in caso di necessità, per assicurare lo sfilamento, ai fini della sostituzione, della tubazione DN 2200.

Il rivestimento definitivo sarà realizzato in calcestruzzo armato con spessore minimo di 50 cm e variabile fino a 150 cm nelle zone troncoconiche.

**Regione Campania – Acqua Campania S.p.a.**  
**UTILIZZO IDROPOTABILE DELLE ACQUE DELL'INVASO DI CAMPOLATTARO**  
**E POTENZIAMENTO DELL'ALIMENTAZIONE POTABILE PER L'AREA BENEVENTANA**  
**PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICA ED ECONOMICA**



**Figura 12: Scavo del pozzo piezometrico e stratigrafia attraversata**

### **3. CONSIDERAZIONI GENERALI**

#### **3.1 SCELTA DI ADOTTARE UNA GALLERIA PORTA-TUBI**

A seguito degli studi geologici e geotecnici preliminari, preso atto della elevata sismicità della zona, **si è deciso di optare per una galleria porta tubi.**

In queste condizioni, infatti, non sarebbe possibile garantire le necessarie condizioni di sicurezza per una galleria idraulica in pressione anche con rivestimenti molto importanti. In caso di un evento sismico significativo ci sarebbe un rischio elevato di avere delle fessure nel rivestimento con conseguenti perdite di acqua che verrebbe rilasciata all'interno del terreno creando potenzialmente fenomeni di instabilità in superficie.

Una galleria porta tubi con all'interno una condotta in acciaio è invece molto più sicura da questo punto di vista essendo la tubazione separata dal rivestimento della galleria. Tale configurazione inoltre garantisce l'ispezionabilità della condotta anche mentre essa è in esercizio. Per inciso, una soluzione del genere era stata già valutata da ASEA nello studio di fattibilità tecnico economica del 2017, con un diametro interno della galleria porta-tubi sensibilmente maggiore di quello ipotizzato nella presente relazione

I calcoli idraulici preliminari hanno stabilito che la condotta idraulica deve avere un diametro di 2200mm.

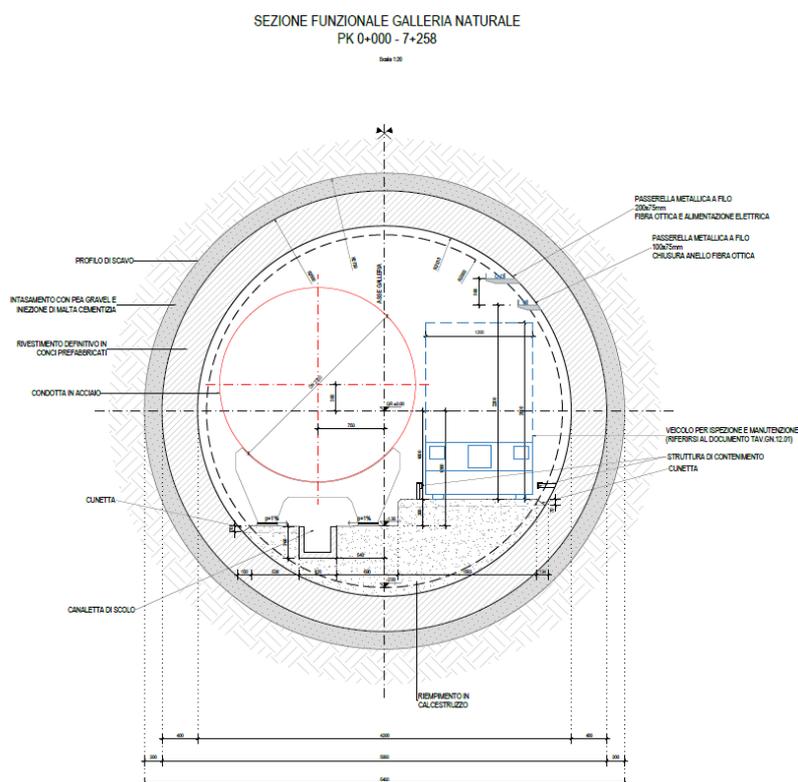
La galleria porta tubi sarà realizzata con scavo meccanizzato. La sezione funzionale è, di seguito, descritta.

##### **3.1.1 Sezione tipo della galleria nell'ipotesi di scavo in meccanizzato**

La galleria porta-tubo sarà realizzata con un sistema di scavo meccanizzato la cui sezione presenta le seguenti caratteristiche principali:

- Diametro di scavo = 5,40 m,
- Diametro all'estradosso del rivestimento = 5,00 m
- Diametro intradosso del rivestimento = 4,20
- Spessore dei conci = 0,40 m.

**Regione Campania – Acqua Campania S.p.a.**  
**UTILIZZO IDROPOTABILE DELLE ACQUE DELL'INVASO DI CAMPOLATTARO**  
**E POTENZIAMENTO DELL'ALIMENTAZIONE POTABILE PER L'AREA BENEVENTANA**  
**PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICA ED ECONOMICA**



**Figura 13: Sezione funzionale galleria di derivazione**

### 3.1.2 Premessa

Per la definizione delle dimensioni della galleria con scavo meccanizzato è necessario fare la seguente premessa: l'approccio al progetto della galleria di derivazione con TBM fa esplicito riferimento alla recente realizzazione da parte dell'ATI con VIANINI LAVORI capogruppo della galleria Pavoncelli Bis, di circa 8.5 km.

### 3.1.3 Cenni sulla galleria Pavoncelli Bis

La realizzazione della galleria Pavoncelli Bis si è resa necessaria in quanto la preesistente galleria Pavoncelli, costruita agli inizi del 900, a seguito del terremoto del novembre 1980, subì gravi dissesti.

I lavori della nuova galleria sono stati avviati ai primi anni 90, **ma per una serie di vicissitudini tecniche e contrattuali non sono mai stati conclusi.**

Il 26 aprile del 2012 l'ATI di cui sopra si è aggiudicata i lavori di realizzazione della nuova galleria Pavoncelli Bis; con la tecnica dello scavo meccanizzato, nonostante le difficoltà incontrate in ordine alla geologia dei terreni, alle loro caratteristiche, alla presenza di faglie, e soprattutto alla presenza del gas che ha comportato la riclassificazione della galleria in relazione al rischio metano, **i lavori sono stati portati a termine ad ottobre 2017 e collaudati a maggio del 2019.**

La VIANINI LAVORI nell'ambito dell'ATI, ha pertanto messo a disposizione della regione Campania e Puglia lo strumento di distribuzione dell'acqua atteso da circa 30 anni.

#### **3.1.4 Approccio al progetto della galleria di derivazione di Campolattaro**

Gli studi e gli approfondimenti geologici eseguiti, come meglio e più ampiamente descritto nella relazione specialistica, hanno evidenziato come i terreni attraversati presentano caratteristiche geologiche di complessità più o meno simili, ma non analoghe, a quelle in cui è stata realizzata recentemente la galleria Pavoncelli bis, **ivi incluso lo scavo in galleria grisutosa di Classe II.**

La contemporanea presenza di situazioni geologiche complesse, di per sé critiche per la fase di costruzione, e la presenza di gas in fase di scavo hanno inciso negativamente sull'andamento dei lavori di realizzazione della galleria. Pertanto, nella scelta delle modalità esecutive della galleria in oggetto, si è doverosamente fatto tesoro dell'esperienza e degli studi fatti nell'ambito della realizzazione della galleria Pavoncelli BIS.

Le maggiori dimensioni previste per la galleria di Campolattaro rispetto a quella di Pavoncelli (4.20 rispetto a 3.40) consentono l'adozione di sistemi di ventilazione particolarmente efficaci che contribuiranno alla diminuzione dei fermi macchina per superamento della concentrazione di gas.

### **3.1.5 Miglioramenti previsti alla TBM da utilizzare per la galleria di derivazione di Campolattaro in funzione della progressa e recente esperienza della Galleria Pavoncelli.**

Proprio sulla scorta dell'esperienza maturata nell'ambito dei lavori di realizzazione della Galleria Pavoncelli bis, si è ritenuto opportuno adottare, per la galleria di Campolattaro, una macchina TBM maggiormente attrezzata che consenta di raggiungere un sufficiente livello di confidenza per la realizzazione dell'opera in condizioni geologiche particolarmente sfidanti.

Si ricorda a questo proposito che la Galleria Pavoncelli bis rappresenta sotto moltissimi aspetti un "case study" che ha fatto scuola nel mondo del tunneling.

Si ritiene le modifiche più significative da adottare alla nuova TBM, sono:

- l'allargamento del diametro interno da 3.40 mt a 4.20 (spazio utile alle operazioni di macchina e aggiunta di attrezzature a supporto della fase di scavo);
- la maggiorazione della potenza dei motori (da 800 kW a 1200 kW);
- l'aumento della coppia per la fase di spinta e di sblocco in caso di bloccaggio della macchina (da 33.000 kN a 47.400 kN circa);
- la maggiore superficie coperta da cilindri di spinta (da 11 a 22 cilindri);
- la installazione già in fase di costruzione di sistemi puntuali per il monitoraggio gas con ridondanze per una maggiore sicurezza;
- l'utilizzo di motori idraulici e non elettrici maggiormente compatibili con la presenza di gas;
- possibilità di perforazioni in avanzamento per esplorazioni e/o iniezioni di consolidamento.

Le migliorie di cui sopra consentono un notevole incremento delle possibilità di effettuare lo scavo in sicurezza della galleria di Campolattaro, grisutosa in Classe II ed in condizioni geologiche complesse.

## **4. INQUADRAMENTO GEOLOGICO-GEOTECNICO**

### **4.1 MODELLO GEOLOGICO DI SOTTOSUOLO**

Nel seguito si riportano i caratteri salienti di tipo geologico del tracciato in esame.

La galleria Campolattaro – Ponte attraversa un settore collinare dei Monti del Sannio lungo un tracciato che si sviluppa in sotterraneo a quote comprese tra 343 m e 335 m s.l.m., corrispondenti ad un profilo topografico esterno che si sviluppa tra 338 m s.l.m. e 550 m s.l.m. con copertura massima di 208 m.

Il tracciato sotterraneo della galleria attraversa una serie di unità geologiche strutturalmente complesse, caratterizzate da successioni stratificate discontinue di natura arenaceo-calcaree-marnose, arenaceo-pelitiche, calcareo-marnoso-pelitiche ed argilloso-marnose. Si tratta sia di unità bacinali pre-orogene di età Cretacico sup. – Miocene inf., riferibili all'Unità del Fortore (Argille Varicolori, Formazione di Corleto Perticara, Formazione di Paola Doce o Tufiti di Tusa) e all'Unità del Sannio/Frigento (Flysch Rosso, Flysch Numidico), che di successioni flyscioidi sinorogene (Formazione di San Giorgio, Unità Fragneto Monforte) di età Miocene medio-superiore.

La caratterizzazione geotecnica dei litotipi individuati è stata eseguita sulla base dell'interpretazione delle indagini in sito e delle prove di laboratorio eseguite nel corso delle fasi progettuali di Progetto di Fattibilità Tecnica ed Economica e del Progetto Definitivo. Nelle seguenti figure si riportano il profilo geologico complessivo con la localizzazione delle indagini eseguite e, per ciascun riquadro di dettaglio, le indagini eseguite lungo ciascuna verticale indagata.

A seconda delle diverse tratte del tunnel si possono incontrare successioni prevalentemente calcaree, attribuibili al membro calcareo del Flysch rosso (**FYRC**), costituita da calcareniti, calciruditi e calcilutiti, talora brecciati, intercalati da marne e sottili livelli di argilliti arrossate, oppure strati di marne e calcari marnosi da riferire al membro argilloso-manoso del Flysch rosso (**FYRAgM**).

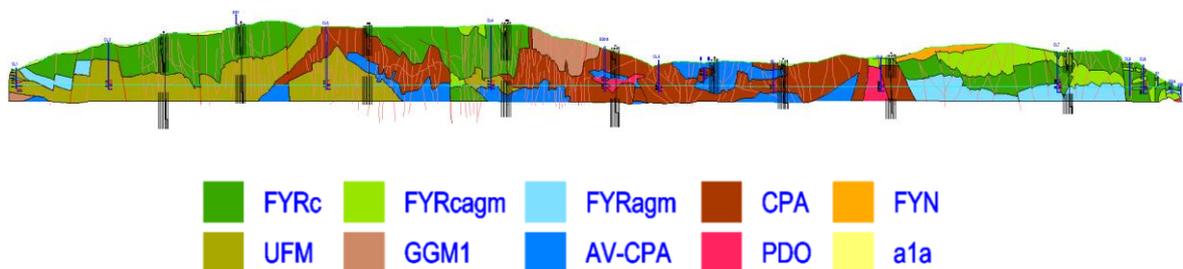
L'Unità Fragneto Monforte (**UFM**), caratterizzata da una successione formata da arenarie, argille, marne e subordinati calcari a grana fine e sottili livelli di microconglomerati è diffusa in varie parti del tracciato; nel tratto tra il comune di Campolattaro e la Collina Mottola l'unità tettonica di Frigento, formata dai calcari del F. Rosso e dalle arenarie del F. Numidico e dalle soprastanti arenarie della formazione di Fragneto (**UFM**) è stata piegata, sollevata e rovesciata sui termini arenacei (**GGM**) più recenti della unità tettonica Valle del Tammaro (Formazione di S. Giorgio La Molarata del Miocene superiore).

Più a sud il sollevamento della struttura geologica ha portato in superficie i terreni del substrato profondo come i calcari e le marne della Formazione Corleto Perticara (**CP**) ed i terreni delle Argille Varicolori (**AV**).

Nel settore meridionale è presente un'ampia struttura geologica che dalla valle del F. Lenta si sviluppa fino all'abitato di Fragneto.

Si tratta di una successione, forse anche raddoppiata dalla tettonica, costituita alla base da argilliti e calcari marnosi della Formazione delle Argille Varicolori su cui poggiano con contatto stratigrafico i calcari marnosi della formazione di Corleto Perticara (**CP**) in eteropia con la formazione arenacea tufitica della Paola Doce (**PD**) ed ancora più in alto la formazione del F. Rosso costituita alla base dalla litofacies dei calcari detritici e calciruditi (**FRC**) ben cementate ed in alto dalla litofacies argilloso calcareo (**FRag**). Infine, ancora più in alto seguono le quarzoareniti del F. Numidico.

La galleria artificiale è collocata in corrispondenza del portale lato Monte. Il profilo geologico è riportato qui di seguito.



**Figura 14: Profilo geologico del tracciato.**

I parametri risultanti dalla caratterizzazione geotecnica sono riassunti nelle seguenti tabelle:

**Regione Campania – Acqua Campania S.p.a.**  
**UTILIZZO IDROPOTABILE DELLE ACQUE DELL'INVASO DI CAMPOLATTARO**  
**E POTENZIAMENTO DELL'ALIMENTAZIONE POTABILE PER L'AREA BENEVENTANA**  
**PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICA ED ECONOMICA**

LONTANO DALLE ZONE DI FAGLIA									
UFM PDO	<b>copertura</b>	$\gamma$	$c'$	$\varphi'$	$E'$	$k_o$	GSI	Ksat	
	[m]	[kN/mc]	[kPa]	[°]	[MPa]	[-]	[-]	[m/s]	
	<50	22 - 24	40	31 - 35	80 - 100	0.9	21 - 26	1.00E-07	1.00E-08
	50-100	22 - 24	80	31 - 35	200 - 250	0.9	21 - 26	1.00E-07	1.00E-08
	100-150	22 - 24	105	31 - 35	250 - 300	0.8	21 - 26	1.00E-07	1.00E-08
150-200	22 - 24	120	31 - 35	300 - 400	0.7	21 - 26	1.00E-07	1.00E-08	
FYR-C	<b>copertura</b>	$\gamma$	$c'$	$\varphi'$	$E'$	$k_o$	GSI	Ksat	
	[m]	[kN/mc]	[kPa]	[°]	[MPa]	[-]	[-]	[m/s]	
	<50	25 - 27	50	35	300	1.1	30 - 35	1.00E-02	1.00E-05
	50-100	25 - 27	120	36	400	0.9	30 - 35	1.00E-02	1.00E-05
	100-150	25 - 27	150	37	600	1	30 - 35	1.00E-02	1.00E-05
150-200	25 - 27	160	37	650	1	30 - 35	1.00E-02	1.00E-05	
FYR-ag	<b>copertura</b>	$\gamma$	$c'$	$\varphi'$	$E'$	$E_u$	$k_o$	$c_u$	Ksat
	[m]	[kN/mc]	[kPa]	[°]	[MPa]	[MPa]	[-]	[-]	[m/s]
	<50	19 - 20	10	24 - 26	110	180	0.6	150	1.00E-08 1.00E-09
	50-100	19 - 20	30	24 - 26	160	240	1	200	1.00E-08 1.00E-09
	100-150	20 - 21	40	26 - 28	300	500	0.8	450	1.00E-08 1.00E-09
150-200	20 - 21	45	26 - 28	350	600	0.8	500	1.00E-08 1.00E-09	
CPA	<b>copertura</b>	$\gamma$	$c'$	$\varphi'$	$E'$	$E_u$	$k_o$	$c_u$	Ksat
	[m]	[kN/mc]	[kPa]	[°]	[MPa]	[MPa]	[-]	[-]	[m/s]
	<50	20 - 21	40	27.5	80 - 130	480	1	400	1.00E-07 1.00E-08
	50-100	20 - 21	45	27.5	130 - 200	720	0.9	600	1.00E-07 1.00E-08
	100-150	20 - 22	60	24	200 - 350	840	0.8	700	1.00E-07 1.00E-08
100-200	20 - 22	70	24	350 - 450	1080	0.8	900	1.00E-07 1.00E-08	
AV-CPA	<b>copertura</b>	$\gamma$	$c'$	$\varphi'$	$E'$	$E_u$	$k_o$	$c_u$	Ksat
	[m]	[kN/mc]	[kPa]	[°]	[MPa]	[MPa]	[-]	[-]	[m/s]
	<50	19 - 21	25	23 - 25	30 - 70	480	1.1	400	1.00E-08 1.00E-09
	50-100	19 - 21	30	23 - 25	70 - 150	720	1	600	1.00E-08 1.00E-09
	100-150	19 - 21	35	23 - 25	150 - 250	840	0.9	700	1.00E-08 1.00E-09
100-200	19 - 21	50	23 - 25	250 - 450	1080	0.8	900	1.00E-08 1.00E-09	

**Tabella 1: Parametri geotecnici – lontano dalle zone di faglia**

ATTRaversAMENTO FAGLIE									
UFM PDO	<b>copertura</b>	$\gamma$	$c'$	$\varphi'$	$E'$	$k_o$	GSI	Ksat	
	[m]	[kN/mc]	[kPa]	[°]	[MPa]	[-]	[-]	[m/s]	
	<50	23 - 25	20	31	70	0.7 - 0.9	18	1.00E-07	1.00E-08
	50-100	23 - 25	40	31	170	0.7 - 0.9	18	1.00E-07	1.00E-08
	100-150	23 - 25	50	31	190	0.7 - 0.9	18	1.00E-07	1.00E-08
150-200	23 - 25	60	31	230	0.7 - 0.9	18	1.00E-07	1.00E-08	
FYR-C	<b>copertura</b>	$\gamma$	$c'$	$\varphi'$	$E'$	$k_o$	GSI	Ksat	
	[m]	[kN/mc]	[kPa]	[°]	[MPa]	[-]	[-]	[m/s]	
	<50	25 - 27	20	33	80	0.8	25	1.00E-02	1.00E-05
	50-100	25 - 27	50	33	160	0.8	25	1.00E-02	1.00E-05
	100-150	25 - 27	60	33	300	0.8	25	1.00E-02	1.00E-05
150-200	25 - 27	70	33	350	0.8	25	1.00E-02	1.00E-05	
FYR-ag	<b>copertura</b>	$\gamma$	$c'$	$\varphi'$	$E'$	$E_u$	$k_o$	$c_u$	Ksat
	[m]	[kN/mc]	[kPa]	[°]	[MPa]	[MPa]	[-]	[-]	[m/s]
	<50	19 - 20	10	23	66	180	0.5	150	1.00E-08 1.00E-09
	50-100	19 - 20	10	23	96	240	0.9	200	1.00E-08 1.00E-09
	100-150	20 - 22	10	23	180	500	0.7	450	1.00E-08 1.00E-09
150-200	20 - 22	10	23	210	600	0.7	500	1.00E-08 1.00E-09	
CPA	<b>copertura</b>	$\gamma$	$c'$	$\varphi'$	$E'$	$E_u$	$k_o$	$c_u$	Ksat
	[m]	[kN/mc]	[kPa]	[°]	[MPa]	[MPa]	[-]	[-]	[m/s]
	<50	20 - 21	10	24	60	480	0.9	400	1.00E-07 1.00E-08
	50-100	20 - 21	10	24	90	720	0.8	600	1.00E-07 1.00E-08
	100-150	20 - 21	10	24	150	840	0.7	700	1.00E-07 1.00E-08
100-200	20 - 22	70	24	350 - 450	1080	0.7	900	1.00E-07 1.00E-08	
AV-CPA	<b>copertura</b>	$\gamma$	$c'$	$\varphi'$	$E'$	$E_u$	$k_o$	$c_u$	Ksat
	[m]	[kN/mc]	[kPa]	[°]	[MPa]	[MPa]	[-]	[-]	[m/s]
	<50	19 - 21	10	22	30	480	1	400	1.00E-08 1.00E-09
	50-100	19 - 21	10	22	50	720	0.9	600	1.00E-08 1.00E-09
	100-150	19 - 21	10	22	130	840	0.8	700	1.00E-08 1.00E-09
100-200	19 - 21	10	22	230	1080	0.7	900	1.00E-08 1.00E-09	

**Tabella 2: Parametri geotecnici – attraversamento delle faglie**

**Regione Campania – Acqua Campania S.p.a.**  
*UTILIZZO IDROPOTABILE DELLE ACQUE DELL'INVASO DI CAMPOLATTARO  
 E POTENZIAMENTO DELL'ALIMENTAZIONE POTABILE PER L'AREA BENEVENTANA  
 PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICA ED ECONOMICA*

Le distanze progressive e parziali di intersezione tra le formazioni geologiche e l'asse della galleria sono riportate nella tabella di cui sotto.

Descrizione	PK inizio [m]	Pk fine [m]
Pozzo Campolattaro	0	30
UFM / FYR-ag	30	370
Faglia	370	430
UFM	430	700
Faglia	700	760
UFM / FYR-c	760	1200
Faglia	1200	1260
UFM	1260	1675
AV / CPA	1675	1835
UFM	1835	2435
AV / CPA	2435	2545
CPA	2545	2650
AV / CPA + Faglia	2650	2880
FYR-c/agm	2880	3040
UFM / AV	3040	3190
UFM	3190	3230
AV / CPA	3230	3620
CPA	3620	3665
Faglia	3665	3725
CPA	3725	3890
AV / CPA	3890	4120
CPA	4120	4420
AV + Discenderia	4420	4730
CPA	4730	5025
Faglia	5025	5145
CPA	5145	5345
AV	5345	5505
PDO / CPA	5505	5650
Faglia	5650	5870
FYR-c FYR-ag	5870	6760
Faglia	6760	6820
FYR-ag	6820	7190
Faglia + Pozzo piezometrico	7190	7290
FYR-c/agm	7290	7513
Imbocco Monte + dima	7513	7543

**Tabella 3: Formazioni geologiche in funzione dell'asse della galleria di derivazione.**

## **4.2 CARATTERIZZAZIONE GEOTECNICA DEL SITO**

Dall'analisi del tracciato emerge che, durante le fasi di realizzazione della galleria, potrebbero essere attraversate le seguenti formazioni:

- **GGM** – formazione di San Giorgio costituita da arenarie quarzose a grana fine con intercalazioni di calcareniti, calcari marnosi e marne;
- Unità tettonica della Valle del Tammaro (**VT**):
  - **CP** – formazione di Corleto Perticara costituita da calcilutiti biancastre e marne a frattura concoide, in banchi e strati medi, con arenarie nella porzione alta della formazione;
  - **AV** – formazione delle Argille Varicolori costituita da argilliti scagliettate, con intercalazioni di calcilutiti calcareniti, calcari selciosi, in strati sottili medi, presenza di olistoliti calcarei e/o argillitici, struttura caotica;
  - **PDO** – Formazione di Paola Doce, costituita da arenarie grigiastre o giallognole, arcose ed arcose-litiche con quarzo, a grana medio-grossolana e medio-fine, da litareniti micacee e tufitiche in strati e banchi massivi e fratturati;
- **FR/FRc** – litofacies calcarea del Flysch Rosso costituita da calcareniti, calcilutiti, calciruditi, marne rosse calcaree, in strati medi e sottili, evolvente verso l'alto ad arenarie quarzose del Flysch Numidico;
- **FRag** – litofacies argillosa del Flysch Rosso costituita da una successione prevalentemente argillosa in banchi, e marnosa in strati sottili e medi, con frequenti intercalazioni calcareo-clastiche;
- **UFM** – Unità Fragneto Monforte, caratterizzata da una successione formata da arenarie, argille, marne e subordinati calcari a grana fine e sottili livelli di microconglomerati, che presenta uno spessore complessivo di almeno varie decine di metri;
- **FN** – formazione del Flysch Numidico costituita da alternanze di quarzareniti a cemento siliceo e matrice argillosa, con clasti arrotondati e smerigliati di quarzo, sottili intercalazioni di argilliti e marne rossastre.

### **4.3 RISCHI POTENZIALI**

Le principali criticità, legate al contesto geologico, idrogeologico, geotecnico e ambientale, che potrebbero avere ripercussioni in fase realizzativa, riguardano principalmente l'instabilità del fronte durante lo scavo, i fenomeni di rigonfiamento dei litotipi argillosi sotto scarico tensionale, le potenziali venute d'acqua nelle zone di passaggio tra litotipi a permeabilità differente e la presenza di sacche di gas altamente infiammabile (come evidenziato nella Relazione Geologica).

#### **4.3.1 Instabilità del fronte**

Potenziali rischi di instabilità del fronte possono interessare soprattutto le tratte di galleria a basse coperture, in prossimità delle zone di imbocco, e nell'attraversamento di zone di faglia.

#### **4.3.2 Fenomeni di rigonfiamento**

Al fine di definire il comportamento al rigonfiamento dei materiali attraversati sono state effettuate delle prove edometriche a rigonfiamento impedito, che hanno fornito i valori seguenti:

- **FYRag**: indice di rigonfiamento  $C_r$  stimato tra 0.02 e 0.11;
- **CPA**: indice di rigonfiamento  $C_r$  stimato tra 0.01 e 0.14;
- **PDO**: indice di rigonfiamento  $C_r$  massimo stimato pari a 0.07;

Il rigonfiamento, tipico delle argille scagliose, si traduce in sito, in occasione di scavo, in una elevata pressione sulle strutture di sostegno intesa a contrastare il rigonfiamento. Tale aspetto dovrà essere opportunamente tenuto in conto.

#### **4.3.3 Venute d'acqua in galleria**

Il potenziale rischio di venute d'acqua concentrate e con portate significative in galleria in fase di scavo dipende dalla conducibilità idraulica dei materiali attraversati e dal carico idraulico. Tale rischio potrebbe risultare poco significativo in presenza di terreni a bassa permeabilità quali le Argille Varicolori ed il Flysch Rosso nella componente argillosa (**FRag**) ma, in presenza di

lineamenti tettonici significativi quali, ad esempio, le faglie e gli accavallamenti tettonici individuati nei profili geologici, la possibilità di emergenze idriche può essere ritenuta probabile. Il rischio derivante dalla presenza di emergenze idriche durante le fasi di realizzazione della galleria aumenta notevolmente in presenza di passaggi litologici tra formazioni a bassa permeabilità (**AV**) e formazioni a media permeabilità (**CP, GGM**).

#### **4.3.4 Presenza di gas**

Al fine di acquisire conoscenze sulla presenza di gas nelle formazioni geologiche presenti nel sottosuolo dell'area in cui sono previsti gli scavi della galleria, è stata condotta una preliminare indagine conoscitiva a carattere bibliografico. In generale, la presenza di vuoti e di fessure nel sottosuolo è molto sviluppata nelle zone di faglia dove le rocce si presentano fratturate, pertanto in queste zone più permeabili è facile trovare elevate concentrazioni di gas [Wakita et al., 1978; Irwin & Barnes, 1980; Ware et al., 1985; King, 1986; 1990;].

Lo studio geologico svolto ha evidenziato che il territorio del beneventano in cui si prevede l'attraversamento in galleria, presenta un assetto strutturale molto articolato in cui sono evidenti numerosi lineamenti tettonici di tipo trascorrente compressivo e distensivo, che hanno disarticolato le originarie formazioni geologiche, attribuendo ad esse un elevato stato di fratturazione.

La letteratura scientifica segnala la presenza di manifestazioni di fluidi gassosi provenienti dal sottosuolo strettamente connessi con lineazioni tettoniche in alcuni siti del beneventano e dell'avellinese non molto lontani dall'area in studio. Infatti, importanti manifestazioni di risalita di gas di provenienza profonda si registrano nella zona di Telesse ad ovest dell'area in studio, distante circa 18km.

Numerosi sondaggi geognostici eseguiti in recenti campagne di indagine dalla **RFI** per l'Alta Velocità nelle aree beneventane dello spartiacque appenninico, hanno evidenziato la presenza di gas, sia in fase di perforazione sia di monitoraggio (RFI,2018). Tali fenomeni sono stati riscontrati nei terreni che

vengono ricondotti ai complessi caotici dell'Appennino meridionale (Argille Varicolori, unità del bacino lagonegrese molisano, Flysch Rosso e depositi arenacei riconducibili a bacini di wedge-top).

Anche durante gli scavi della **Galleria Pavoncelli bis**, in Provincia di Avellino, dove l'assetto geologico e strutturale dell'Appennino è analogo a quello del territorio beneventano in studio, sono state rinvenute durante la fase di scavo importanti fuoriuscite di gas che hanno interessato la formazione del Flysch Rosso (FYR), le Argille Varicolori (AV), le arenarie del F. Numidico e della Formazione di Castelvete, e che hanno generato anche lunghe interruzioni tecniche.

In particolare, durante la realizzazione della galleria **Orsara**, mediante indagini dirette consistite nei rilievi di gas a bocca foro durante la perforazione dei sondaggi e nel monitoraggio dell'aria mediante analizzatore di gas a bocca foro in corrispondenza delle verticali di sondaggio, era stato possibile rilevare la presenza di gas nelle formazioni interessate dallo scavo della galleria, associando una classe di rischio gas 2: gallerie/tratti per le quali le indagini bibliografiche, storiche e le indagini sperimentali di superficie e profonde, fanno ritenere che, a causa della realizzazione degli scavi, siano probabili afflussi significativi di grisù in galleria in corrispondenza di strutture geologiche, tecnicamente note come potenziali trappole di idrocarburi. Attraversando le trappole, o comunque a causa del collegamento idraulico con esse realizzato a seguito dello scavo, sono da attendersi flussi di grisù continui oppure discontinui ma con frequenza tale da non farli ritenere un evento eccezionale. Tale possibilità dovrà essere portata in conto per la progettazione dello scavo con metodo meccanizzato, equipaggiando la TBM degli opportuni accorgimenti per gestire il potenziale rischio di presenza di gas.

## **5. METODI DI SCAVO**

Per lo scavo di gallerie possono essere individuate due metodologie principali:

- Scavo di gallerie, in tradizionale, mediante un processo ciclico: costruzione di tunnel mediante il metodo convenzionale, che comprende diverse tecniche come il nuovo metodo di austriaco (NATM), il Drill and Blast (D&B), NTM (metodo di scavo norvegese). Il fronte di scavo della galleria avanza ciclicamente. In questo ciclo il supporto viene posizionato dopo il completamento dello scavo del fronte. Se necessario, lo scavo della galleria può essere suddiviso in diverse sezioni (scavo parzializzato).
- Scavo di gallerie in meccanizzato: galleria scavata mediante l'utilizzo di una Tunnelling Boring Machine (TBM). Il fronte di scavo della galleria avanza continuamente ed è scavato immediatamente dalla testa della TBM. Il supporto, costituito da un rivestimento in conci prefabbricati, viene installato contemporaneamente all'avanzamento della macchina.

Nei paragrafi successivi vengono descritte nel dettaglio le due metodologie, evidenziando sinteticamente i principi fondamentali di funzionamento.

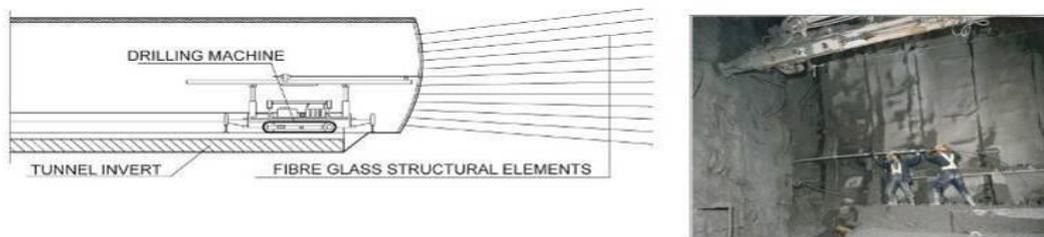
## 5.1 SCAVO IN TRADIZIONALE

In generale esistono due metodologie costruttive per la realizzazione di una galleria mediante metodo in tradizionale. Queste sono:

- “Scavo convenzionale”, comunemente detto in “tradizionale”;
- “Scavo mediante sistemi meccanici” (prevede l’uso di macchine fresatrici).

Le metodologie di avanzamento per lo scavo in tradizionale (che rappresentano le differenti fasi lavorative inerenti alla realizzazione di una galleria) sviluppatasi nel corso degli ultimi anni, grazie alle numerose esperienze maturate nel settore dei consolidamenti, tendono preferenzialmente alla tecnica dello “scavo a piena sezione”.

Il ciclo produttivo previsto dello “scavo a piena sezione” prevede che, dopo gli interventi di consolidamento in calotta e/o al fronte, una fase di abbattimento del materiale con il piano di scavo coincidente con la base dei piedritti. A tale fase segue (in relazione all’evoluzione delle deformazioni rilevate nel corso degli scavi) lo scavo ed il getto delle murette (strutture di raccordo tra piedritto ed arco rovescio) e dell’arco rovescio. In ultimo ad una determinata distanza dal fronte di scavo (che dipenderà sempre dalle deformazioni registrate in galleria nonché dagli spazi necessari per il montaggio dei casseri) andrà eseguito il getto del rivestimento definitivo di calotta. Nelle Figura riportate di seguito viene schematizzato il ciclo relativo alle lavorazioni necessarie per la realizzazione “finita” di una galleria realizzata mediante metodo tradizionale.



**Figura 15: Fase A – Preconsolidamento nucleo.**

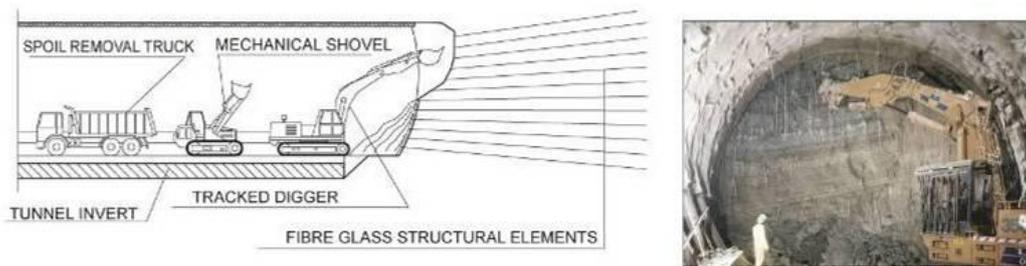


Figura 16: Fase B – Scavo e smarino.

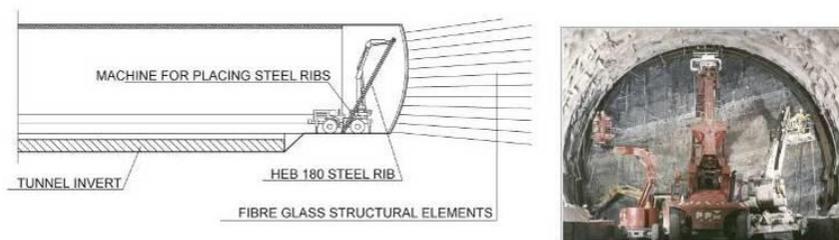


Figura 17: Fase C.1 – Rivestimento di prima fase – messa in opera centine metalliche.

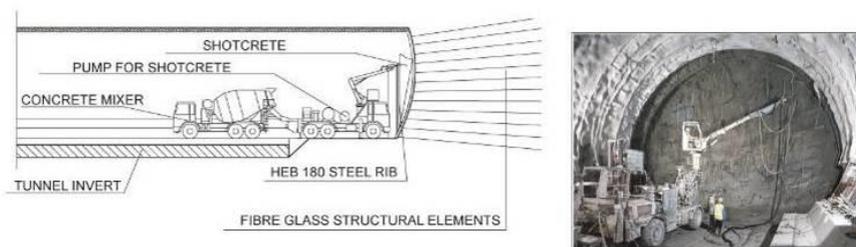


Figura 18: Fase C.2 – Rivestimento di prima fase – messa in opera spritz-beton.

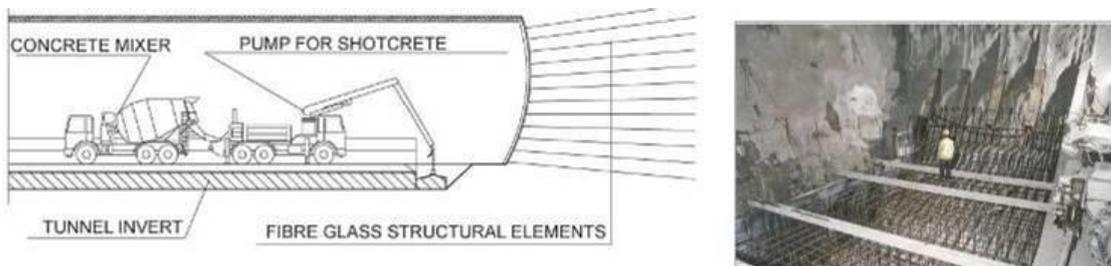
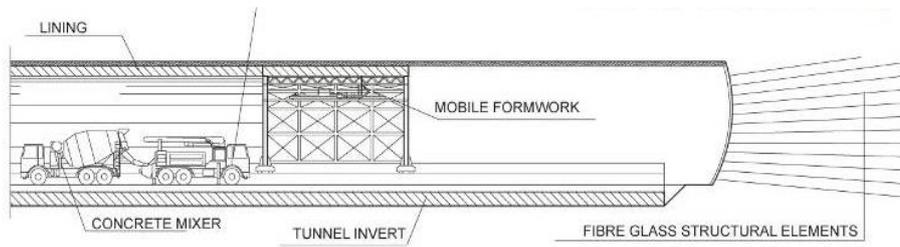


Figura 19: Fase D.1 – Getto rivestimento definitivo – getto arco rovescio e murette.



**Figura 20: Fase D.2 – Getto rivestimento definitivo – getto calotta.**

Di seguito vengono descritte nel dettaglio le diverse operazioni sopra riportate, indicando la modalità di esecuzione della singola lavorazione.

#### **5.1.1 Preconsolidamento**

Se previsto dalle sezioni tipologiche, l'avanzamento degli scavi potrebbe prevedere l'impiego di interventi di preconsolidamento sia al fronte che al contorno del cavo mediante la posa in opera di elementi strutturali in vetroresina e di tubi metallici in acciaio. In linea di massima gli elementi strutturali in VTR, applicati solitamente al fronte di avanzamento, risultano solo cementati, viceversa i tubi metallici in acciaio, previsti generalmente al contorno del cavo, risultano cementati ed iniettati.

#### **5.1.2 Modalità operative per l'esecuzione delle iniezioni al contorno dai tubi in acciaio**

Vengono di seguito descritte le principali operazioni necessarie per eseguire le iniezioni dei tubi metallici in acciaio al contorno della cavità. Si tratti di "interventi conservativi" il cui scopo è quello di limitare le pressioni di contenimento dello scavo, mantenendo indisturbate, quanto possibile, le condizioni tensio – deformative dell'ammasso.

Le tecniche di iniezione da foro allestito mediante tubo con valvole si possono riassumere nelle seguenti fasi:

- realizzazione del foro: le perforazioni vengono eseguite mediante appositi utensili montati su veicoli gommati (posizionatori). La perforazione avviene mediante aste, alla cui estremità è montato l'utensile di taglio, azionate a mezzo di perforatrici idrauliche (o pneumatiche) che imprimono ad esse un

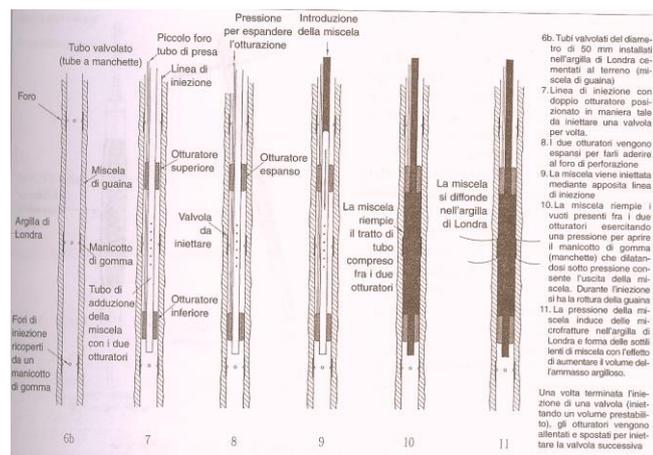
moto di roto-percussione. Un braccio meccanico permette di posizionare l'utensile utilizzato per la perforazione nella posizione desiderata;



**Figura 21: Perforazioni al fronte scavo mediante posizionario.**

- inserimento del tubo metallico dotato di valvole: le valvole sono costituite da manicotti di gomma che coprono una coppia di fori passanti ad incrocio. Le valvole si aprono al passaggio delle miscele quando si raggiungono le pressioni di iniezioni prefissate. Sarebbe opportuno dotare l'elemento strutturale di un tappo di fondo per evitarne l'occlusione durante l'operazione di inserimento nell'apposito foro;
- riempimento della cavità tra tubo valvolato e pareti del foro con una miscela di cemento e bentonite (detta miscela di guaina) avente lo scopo di sostenere le pareti del foro e di impedire la risalita della miscela di iniezione lungo il foro stesso, obbligando la miscela ad interessare di volta in volta le singole sezioni definite dalla posizione delle valvole;
- isolamento delle singole valvole con doppio otturatore ad espansione ed iniezione della miscela di consolidamento secondo le fasi di indicate in figura.

**Regione Campania – Acqua Campania S.p.a.**  
**UTILIZZO IDROPOTABILE DELLE ACQUE DELL'INVASO DI CAMPOLATTARO**  
**E POTENZIAMENTO DELL'ALIMENTAZIONE POTABILE PER L'AREA BENEVENTANA**  
**PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICA ED ECONOMICA**



**Figura 22: Esempio fasi operative delle iniezioni di tipo ripetuto e selettivo.**

### **5.1.3 Modalità operative per l'esecuzione della cementazione degli elementi strutturali in VTR al fronte**

Gli interventi di consolidamento del fronte di scavo hanno lo scopo di incrementare la rigidità del nucleo di terreno in avanzamento, limitano pertanto i fenomeni di convergenza (lontano dal fronte) ed estrusione al fronte di scavo. Dopo le operazioni di perforazione viene alloggiato nel foro l'elemento strutturale in VTR: sarebbe opportuno dotare tale elemento di un tappo di fondo per evitarne l'occlusione durante l'operazione di inserimento in foro. Dopo avere provveduto alla sigillatura della testa del foro (cianfrinatura) si procede all'iniezione della miscela cementizia da apposito tubo (diametro 10mm) in polietilene disposto all'interno dello stesso elemento strutturale curando che un tubicino di sfiato rimanga posizionato sopra l'asta di iniezione: la funzione del tubo di sfiato è quella di evitare la formazione di bolle d'aria, che impediscono il completo riempimento del foro, e favorire il refluito della miscela cementizia quando il foro è completamente riempito.

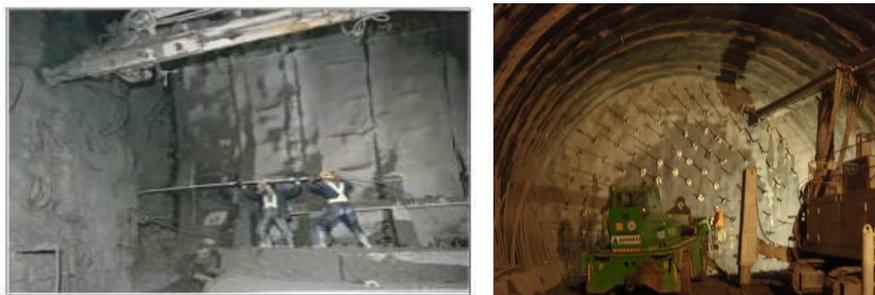


Figura 23: Messa in opera di elementi strutturali in VTR al fronte.

#### 5.1.4 Esecuzione scavo

In generale i mezzi utilizzati per la realizzazione di una galleria mediante il metodo in tradizionale possono essere distinti in:

- scavo meccanico;
- scavo con esplosivo.

Di seguito vengono fornite alcune informazioni sullo scavo eseguito mediante mezzi meccanici tradizionali. Esistono mezzi meccanici per l'abbattimento dei fronti di scavo particolarmente semplici oramai di uso comune nelle lavorazioni in sotterraneo. Si tratta di pale meccaniche (riservate a materiali incoerenti o debolmente coerenti), dei "rippers" (il braccio termina con un tagliante appuntito, particolarmente adatto per i terreni coesivi) e dei martelli demolitori (detti anche "martelloni" capaci di abbattere rocce non eccessivamente dure) montati in genere sul braccio di un escavatore convenzionale: questi ultimi mezzi possono essere utilizzati anche per riprofilare gli scavi dopo l'abbattimento mediante esplosivo.



Figura 24: Scavo mediante pala meccanica (sinistra) e martellone (destra).

La scelta sulla tipologia di utensile da impiegare per lo scavo dipende esclusivamente dalle condizioni geomeccaniche dell'ammasso: in letteratura esistono numerosi abachi che forniscono indicazioni di massima sui sistemi di abbattimento disponibili (esplosivo, martellone, pala meccanica, ...).

<b>Parametro</b>	<b>Resistenza a compressione della roccia (MPa)</b>		
Sistema di abbattimento	< 3	3-20	>20
	Ripper	Martellone / Frese ad attacco puntuale	Esplosivo

**Tabella 4: Indicazioni sul sistema di abbattimento.**

La fase successiva all'abbattimento è quella di recupero del materiale di risulta degli scavi: tale operazione viene chiamata in gergo "smarino". Le operazioni di smarino possono essere suddivise in due differenti momenti, ovvero:

- raccolta e caricamento del materiale abbattuto;
- trasporto del materiale dal fronte di scavo all'esterno della galleria.

Tali operazioni ovviamente dipendono dalle dimensioni della galleria.

### **5.1.5 Prerivestimento**

Nell'ambito delle tecnologie da applicare per l'esecuzione degli avanzamenti è previsto nella pratica, per l'esecuzione del pre-rivestimento, l'impiego di calcestruzzo proiettato, armato con le centine metalliche e rete elettrosaldata o in alternativa con fibre metalliche.

Il calcestruzzo proiettato viene trasportato sotto pressione in una tubazione chiusa dalla cui estremità fuoriesce urtando contro una superficie d'applicazione e rimanendo contemporaneamente costipato.

Esistono due procedimenti:

- a secco, dove l'impasto (miscela asciutta) è costituito da inerti e legante mentre l'acqua d'addizione viene aggiunta nella lancia utilizzata per la posa in opera,
- a umido, dove si utilizza un impasto già contenente l'acqua di addizione.

La qualità della superficie di applicazione è fondamentale per la perfetta aderenza: infatti quanto più è ruvida, solida e pulita la superficie di applicazione

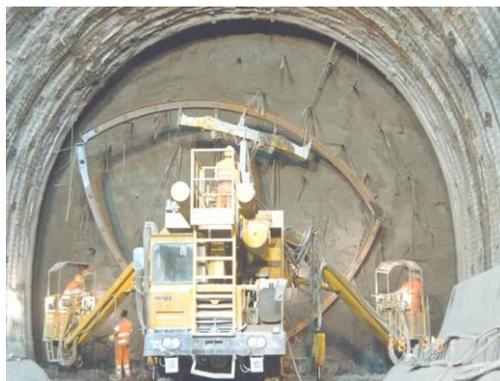
tanto più salda è l'aderenza dello spritz beton.

Occorre tenere in conto lo sfrido provocato dal fenomeno di rimbalzo tenendo altresì conto della zona che si sta rivestendo (in calotta le parti che rimbalzano cadono a terra, sul piedritto invece si produce uno sfrido minore).



**Figura 25: Messa in opera spritz beton sulle centine.**

Per le centine metalliche si prevede usualmente l'impiego di profilati in acciaio tipo IPN o HEB. La posa in opera delle centine potrà avvenire mediante apposite attrezzature quali "posa centine", (semplici o con bracci laterali) piattaforme elevabili (a pantografo o a sbalzo) e castelli idraulici (monobraccio o bibraccio).



**Figura 26: Messa in centine.**

### **5.1.6 Impermeabilizzazione**

Al fine di proteggere il manufatto dalle acque presenti nel sottosuolo, nasce l'esigenza di evitare la percolazione d'acqua all'interno della galleria. Il

rivestimento di impermeabilizzazione è realizzato da uno strato di compensazione di tessuto non tessuto (TNT) e da uno strato di fogli in polietilene (PVC) saldati ad aria calda e fissate al sottofondo (pre-rivestimento) da chiodi a sparo (lunghi solitamente 2-4 cm). La sua posa in opera è bene che avvenga poco prima del getto del rivestimento definitivo di calotta, ovvero quando le deformazioni di convergenza della cavità dovrebbero essersi per lo più esaurite.



**Figura 27: Messa in opera impermeabilizzazione.**

Si rende altresì necessario la presenza di un drenaggio, da disporre a tergo della geo-membrana, al fine di garantire un rapido e sicuro allentamento dell'acqua dalla calotta, avendo cura di raccordare tali geodeti al drenaggio.

#### **5.1.7 Rivestimento definitivo in calcestruzzo**

Oltre ad avere uno scopo prettamente funzionale di sostegno ed estetico, il rivestimento definitivo ha anche le funzioni tipiche di una tubazione (trasporto dei fluidi, acqua ed aria). Il rivestimento definitivo delle gallerie naturali, costituito da arco rovescio e calotta, è usualmente realizzato in calcestruzzo ( $R_{ck} \geq 30$  MPa), armato ove richiesto mediante barre in acciaio ad aderenza migliorata. In alternativa all'impiego di barre singole potranno impiegarsi in calotta tralicci reticolari, con quantitativi di armatura equivalenti, al fine di velocizzare la messa in opera dell'armatura.

Il getto in opere del rivestimento avviene mediante apposite casseforme. In generale possono utilizzarsi due differenti tipologie di casseri:

- il sistema a casseri con torretta porta-forme, con casseforme in più tronchi (4-6m), particolarmente adatto per lo scavo a mezza sezione;

- il sistema a casseri con carro portale, con casseforme in più tronchi (9-15m) adatto soprattutto per scavi a piena sezione.



Figura 28: Casseri autoportanti per getti del rivestimento di calotta.

## 5.2 SCAVO IN MECCANIZZATO

La buona riuscita di uno scavo di gallerie mediante metodo in meccanizzato è fortemente dipendente dalla tipologia di macchina adottata.

Nel seguito verranno forniti dei criteri generali di scelta della tipologia di macchina nonché i principi di funzionamento di uno scavo in meccanizzato.

### 5.2.1 Generalità sui criteri generali per la scelta della tipologia di macchina TBM

Qualsiasi attività di scavo di gallerie comprende tre principali operazioni:

- scavo del tunnel con lo scopo di ottenere il minimo disturbo del terreno al fronte ed attorno alla galleria;
- rimozione del materiale di scavo dalla galleria e suo successivo smaltimento;
- messa in opera del rivestimento della galleria.

In caso di terreno molto compatto, o meglio in roccia, è possibile l'uso di una fresa di tipo aperto con testa rotante. In caso di terreno meno stabile, come argille tenere, terreni incoerenti o rocce altamente fratturate (specialmente al di sotto della falda idrica), il fronte deve essere sostenuto durante le operazioni di scavo.

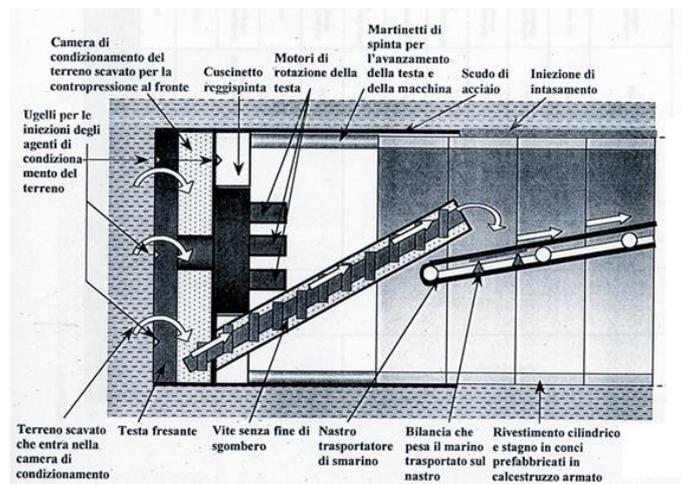
Tale sostenimento può essere eseguito in uno dei tre modi seguenti:

- attraverso un sostegno di tipo meccanico fornito dalla testa della macchina

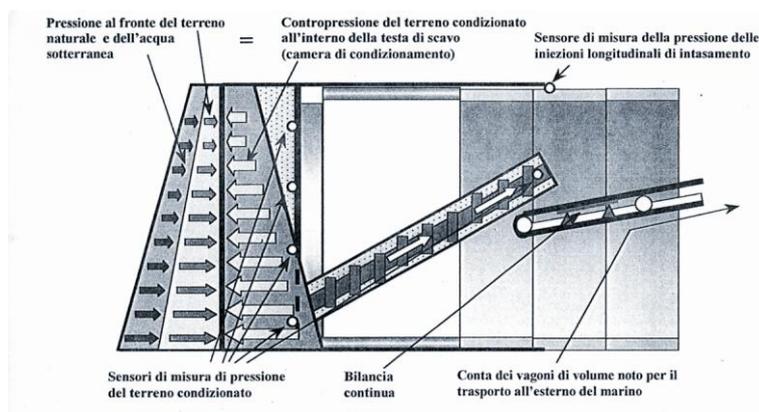
di tipo “chiuso”;

- attraverso la pressione di un fluido, solitamente fango bentonitico;
- attraverso la pressione del materiale di scavo all'interno della camera di lavoro dello scudo.

Gli ultimi due tipi sono solitamente indicati rispettivamente come “Slurry Tunneling Machines” (scudo a contropressione di fango, STMS) e “Earth Pressure Balance Machines” (scudi a contropressione di terra, EPBMS).



**Figura 29: Schema funzionale di una TBM a contropressione al fronte generata mediante il terreno scavato e condizionato.**



**Figura 30: Principio di funzionamento della contropressione al fronte.**

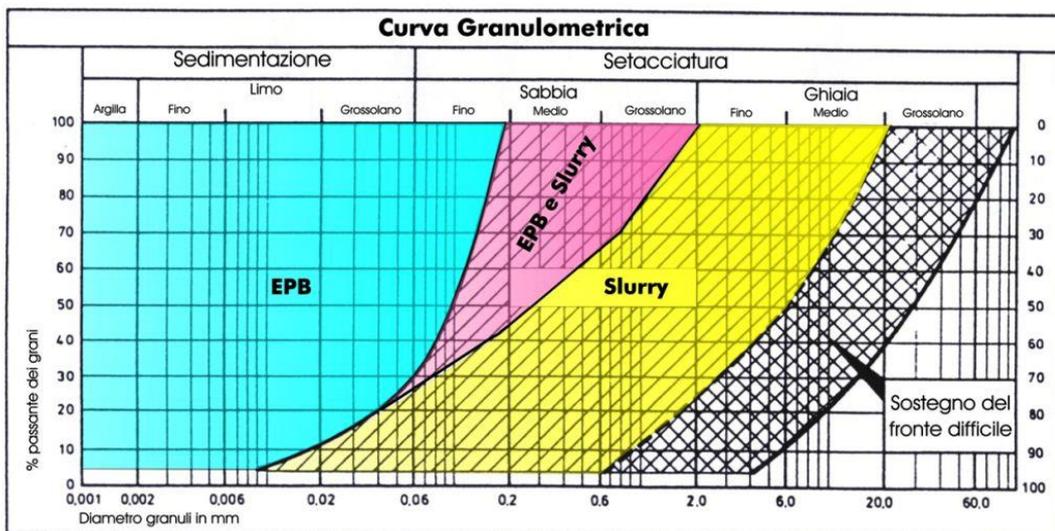
Dalla caratterizzazione geotecnica del sito risulta visibile come lo scavo della galleria di derivazione si svilupperà in gran parte nella formazione delle Argille

Varicolori ed in parte minore nella formazione di San Giorgio e nella formazione di Corleto Perticara. Ulteriore difficoltà per lo scavo sono dovute all'attraversamento di zone tettonizzate, fronti misti, con conseguenti rischi di presenza di materiali sciolti.

Per superare in sicurezza i tratti caratterizzati da problematiche di carattere geotecnico ed idrologico, è stato ritenuto opportuno utilizzare una TBM di tipo EPB che possa sostenere il fronte con la pressione del terreno scavato.

In sintesi, le condizioni geologiche richiedono l'applicazione di una macchina di scavo di tipo scudato con le seguenti caratteristiche:

- possibilità di lavorare efficacemente sia in modalità aperta (solo in caso di assenza di venute d'acqua) che chiusa (eventuale fronte in pressione);
- capacità di gestire e contrastare i fenomeni di convergenza;
- capacità di scavo in formazioni geologiche molto diverse tra loro anche dal punto di vista geo-meccanico;
- organizzazione del backup per gestire la complessa logistica di una TBM che affronta scavi di notevole lunghezza.



**Figura 31: Scelta della macchina in funzione della granulometria.**

### 5.2.2 Modalità operativa e specifiche tecniche generali TBM

Il principio operativo degli scudi a “pressione di terra bilanciata” (EPB) si basa sull'utilizzo dello stesso terreno scavato quale mezzo per il sostegno del fronte, mentre la testa rotante porta-utensili svolge unicamente una funzione di mezzo per lo scavo. Il terreno disgregato dalla testa fresante rifluisce all'interno di una camera (camera di scavo) posta dietro la testa. All'interno di tale camera questo viene mantenuto in pressione, attraverso un diaframma posteriore, dai martinetti di spinta dello scudo che trasferiscono quindi le pressioni di spinta, mediante il terreno nella camera di scavo, al fronte di scavo.

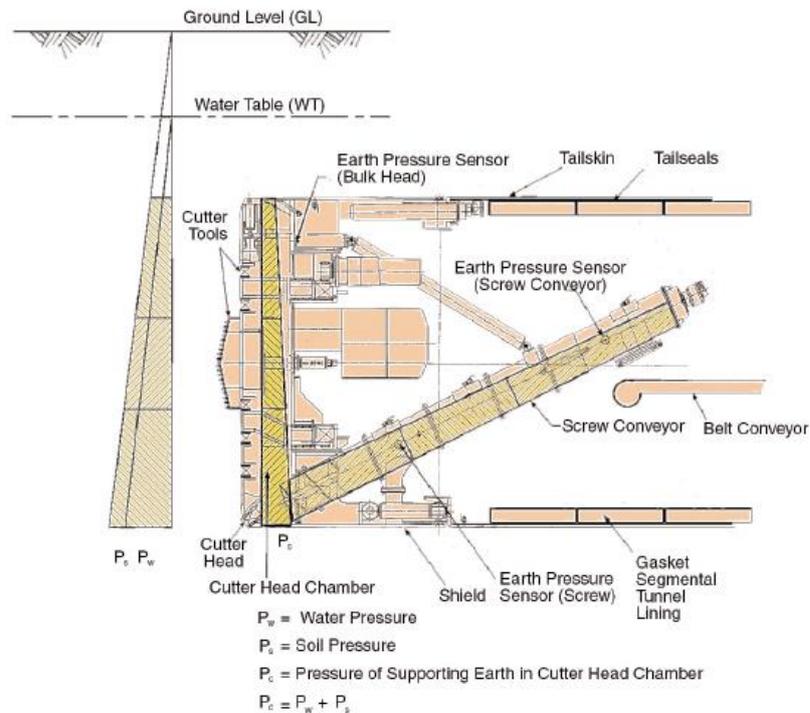


Figura 32: Principio di azione delle pressioni in camera di scavo.

I detriti vengono rimossi dalla camera di scavo attraverso una coclea per poi essere trasportati in una vasca di smarino. La coclea è regolata in modo che la quantità di materiale estratto dalla camera sia equivalente a quella che vi entra attraverso la testa così da mantenere costante la pressione nella camera di scavo. Al fine di fluidificare il terreno, gli scudi EPB iniettano un agente

fluidificante tramite ugelli che si trovano sulla testa, all'interno della camera di scavo e all'interno della coclea. La testa girando rimescola il fluido con il terreno formando uno strato di terreno fluidificato detto "cake".

Il "cake", attraverso apposite aperture poste sulla testa, passa in un vano chiuso da un diaframma posteriore, la camera di scavo, nella cui parte inferiore si inserisce la bocca della coclea. Sul materiale fluido all'interno della camera di scavo si scaricano, attraverso il diaframma posteriore, le spinte dei martinetti principali. Tale materiale, reagendo in modo idrostatico, trasferisce la pressione sul fronte di scavo. Un set di pressostati verifica che la pressione della camera rimanga entro limiti predeterminati e calcolati sulla base del carico del terreno al fronte che è quindi sempre sostenuto da una pressione tale da assicurarne la stabilità. Per quanto detto la macchina deve essere condotta in modo tale che, operando sui pistoni idraulici dello scudo e sulla velocità di scarico della coclea, la pressione esercitata riesca a controbilanciare, istante per istante, quella presente al fronte. Condizione fondamentale, affinché questa operazione avvenga in maniera regolare, è che il terreno asportato al fronte si muova uniformemente dalla camera di pressione al punto di scarico della coclea.

Da quanto sopra indicato si possono desumere i principi fondamentali del sistema di scarico a pressione bilanciata. Secondo questo metodo il terreno scavato deve essere spostato e scaricato continuamente attraverso la coclea, mantenendo in contemporanea una pressione sufficiente sul terreno al fronte di scavo. Operativamente, quando la macchina avanza, è necessario mantenere completamente piena la camera in pressione, supportare il fronte e, nel contempo, smarinare. Il metodo migliore per eseguire questa operazione è quello di controllare il volume del materiale teoricamente scavato e di quello realmente smarinato.

Lo scopo del metodo di scavo a pressione bilanciata è quello di stabilizzare il fronte di scavo con il terreno scavato, fornendo a quest'ultimo pressione sufficiente per controbilanciare la pressione in termini totali. La macchina è inoltre caratterizzata da una "unità di backup" dove trovano sede tutti gli impianti

ed i motori della camera unitamente alle attrezzature per la posa dei conci di rivestimento.

I conci prefabbricati vengono infatti posti in opera da un erettore in modo tale che, mentre la macchina avanza, la galleria sia già rivestita. Nello scavo meccanizzato di gallerie ove il rivestimento viene realizzato con conci prefabbricati, esiste il problema legato allo spazio, di alcuni centimetri, che si viene a creare tra il profilo di scavo e l'estradosso del rivestimento, a causa dello spessore dello scudo e delle tolleranze di montaggio del rivestimento (gap anulare). Quando lo scavo avviene in roccia o comunque in terreni coesivi con un tempo di autosostentamento dello scavo di almeno alcune ore, questo spazio anulare viene riempito con malte di iniezione o materiali adeguati (nel caso di gallerie drenanti), pompate attraverso appositi fori lasciati nei conci.

Tale modalità non è invece possibile in terreni sciolti o spingenti: in tal caso un qualunque extra scavo si tradurrebbe immediatamente in un assestamento del terreno con elevata perdita di volume e conseguenti cedimenti.

La macchina dovrà avere inoltre dispositivi necessari per permettere l'arretramento della testa dal fronte sia per la manutenzione degli utensili di taglio sia per sbloccare la testa dopo un blocco dello scavo.

## **6. CONSIDERAZIONI QUALITATIVE SULLA SCELTA DEL METODO DI SCAVO**

### **6.1 GENERALE**

Questa sezione presenta una valutazione preliminare qualitativa delle opzioni di metodi di costruzione per il progetto della galleria portatubi di Campolattaro, inclusa una disamina sui benefici e i rischi associati a ciascun metodo.

La scelta della metodologia di scavo più adatta è probabilmente l'aspetto più rilevante da definire in fase di progetto. Ogni metodologia ha infatti i suoi vantaggi e svantaggi, e la tecnica selezionata ha delle implicazioni significative sul progresso della costruzione, come ad esempio sui tassi di avanzamento dello scavo e quindi sul programma di costruzione, sui costi complessivi del progetto, sui rischi per la sicurezza e sui risultati della progettazione.

Di seguito vengono discussi questi due principali metodi di scavo, relativi alla loro applicazione per il progetto in esame.

### **6.2 CONFRONTO TRA SCAVO IN TRADIZIONALE E MECCANIZZATO**

Le Tunnelling Boring Machines (TBMs) combinano lo scavo e l'installazione del supporto in un unico processo di lavoro con un elevato grado di automazione, che aumenta significativamente la produttività e la velocità di costruzione. D'altro canto, l'investimento iniziale è molto elevato e per questo motivo lo scavo con TBM risulta vantaggioso quando la galleria ha una lunghezza significativa, indicativamente superiore a 3 chilometri.

La galleria portatubi di Campolattaro, caratterizzata da una lunghezza di circa 7.650 km, rientra quindi sicuramente nei casi in cui lo scavo con TBM costituisce la scelta migliore dal punto di vista dell'economicità del progetto.

La metodologia di scavo in tradizionale, pur essendo sotto certi aspetti più flessibile, ha l'evidente svantaggio nella minore produttività rispetto ad una TBM. Soprattutto in condizioni geologiche variabili ed estreme, richiede l'installazione di pre-consolidamenti del terreno e/o presupporti che ne limitano in maniera rilevante la velocità di esecuzione.

Nei seguenti paragrafi sono riportati l'elenco e la descrizione dei principali parametri coinvolti nella scelta del metodo di scavo, raggruppati in base agli argomenti principali.

Sulla base di questi parametri è stata effettuata una valutazione qualitativa al fine di confrontare i metodi (meccanizzato e convenzionale) e orientare verso la scelta migliore per il progetto in esame.

### **6.3 CONSIDERAZIONI SULLA PROGETTAZIONE E SUL TEMPO DI AVVIO**

Mentre con entrambi i metodi l'area della sezione trasversale possibile è simile, il meccanizzato è più competitivo per i tunnel con piccole sezioni trasversali.

La lunghezza del tunnel è un parametro chiave dal punto di vista tecnico ed economico. Il meccanizzato è più competitivo per i tunnel lunghi mentre il metodo tradizionale lo è per i tunnel brevi. È ampiamente riconosciuto in letteratura che 3 km rappresenta la lunghezza al di sotto della quale il convenzionale è più vantaggioso sotto ogni aspetto.

Pertanto, nel caso in esame la tecnica del meccanizzato è decisamente più vantaggiosa. In termini di considerazioni generali sul progetto in esame si può quindi concludere che la galleria di Campolattaro è una galleria di ~7.650 km a sezione circolare che non presenta particolari caratteristiche dal punto di vista plano-altimetrico (pendenza circa dello 0.1% e raggi di curvatura  $\geq 500\text{m}$ ) che ben si presta allo scavo mediante metodo meccanizzato.

L'uso della galleria inoltre non richiederà la presenza di nicchie o allarghi (necessari in fase di esercizio nelle gallerie ferroviarie/stradali). D'altra parte, la realizzazione delle zone di allargo (da prevedere circa ogni 300m) è invece necessaria per lo scavo mediante metodo tradizionale sia per la movimentazione macchine in fase di costruzione altrimenti non consentita dalla piccola dimensione prevista per lo scavo in convenzionale (diametro di scavo di circa 4.6m), sia per motivi di sicurezza connessi allo stazionamento dei mezzi di emergenza.

Lo scavo meccanizzato è quindi da preferire allo scavo in tradizionale in termini di considerazioni generali sul progetto.

#### **6.4 CONSIDERAZIONI SULLO SCOPO FINALE**

La galleria di Campolattaro sarà, in fase di esercizio, prevalentemente utilizzata allo scopo di ispezione per la tubazione in acciaio di diametro 2200 mm prevista all'interno della galleria stessa.

A tale proposito i due metodi di scavo si presentano entrambi idonei allo scopo.

#### **6.5 SALUTE, SICUREZZA E AMBIENTE DI LAVORO**

Dal punto di vista della sicurezza e salute sul lavoro, è ormai ampiamente riconosciuto che il ricorso a tecnologie di scavo con metodo meccanizzato è sensibilmente più sicuro della tecnologia tradizionale.

Nel merito recenti pubblicazioni degli organi di vigilanza regionali relativi all'andamento infortunistico dei maggiori cantieri infrastrutturali hanno confermato come l'indice di frequenza nonché quello di gravità risultino mediamente dimezzati adottando lo scavo con TBM.

Quanto sopra discende dal fatto che la metodologia dello scavo meccanizzato con TBM è principalmente una branca dell'ingegneria industriale che adotta in larga misura processi industriali che limitano (fino ad escludere nei sistemi più avanzati) l'esposizione del personale ai rischi tipici delle attività di scavo in galleria.

Le fasi di lavorazione di un processo tradizionale prevedono continuamente attività che espongono il personale operativo ai tipici rischi del lavoro al fronte, nonché l'interazione diretta con macchine, attrezzature e mezzi deputati al consolidamento, allo scavo, e al rivestimento.

Le varie fasi di lavoro vengono inoltre svolte contemporaneamente da imprese esecutrici differenti in stretta, e altrettanto pericolosa, soggezione dei rischi interferenziali apportati da ciascuna di esse all'ambiente di lavoro.

Tali fattori di rischio risultano inoltre particolarmente persistenti in caso di scavo tradizionale a ridotto diametro e ad elevata distanza tra fronte di scavo e imbocco.

Lo scavo con la TBM diversamente dal tradizionale prevede, pena l'assenza di

un'efficace produttività, una rigidissima organizzazione delle attività in galleria, che escludono quasi completamente lavorazioni a ridosso del fronte e laddove necessarie (vedasi manutenzione testa fresante) eseguite esclusivamente da tecnici altamente formati e sotto strettissime procedure di sicurezza; tale fattore se da un lato rappresenta tecnologicamente il tipico limite rispetto al tradizionale (scarsa flessibilità delle attività di scavo ) dall'altro ne costituisce il punto di forza in termini di sicurezza grazie anche alla corretta adozione già in sede di progettazione macchina, della scelta dei sistemi, attrezzature e procedure che minimizzeranno ancor più il rischio di infortunio.

Inoltre, e come già sottolineato sulla base dell'esperienza della galleria Pavoncelli Bis, la galleria in esame sarà realizzata in terreni in cui il rischio di attraversare zone in presenza di gas è certo.

L'attuale stato dell'arte, nel panorama normativo internazionale, individua nell'applicazione degli standard introdotti dalle "Note Interregionali" (in breve, NIR, che rappresentano linee guide alla sicurezza nei cantieri di scavo sotterranei in altri termini si tratta di "Best Practices") una metodologia di definizione del rischio e di redazione del documento previsto dal DI 81/08.

Per lo scavo tradizionale è possibile fare riferimento alla NIR28 ("Grisou 3<sup>a</sup> edizione" Protocollo N° ASS/PRC/05/1141 del 13/01/2005), che definisce tre classi di rischio (0, 1, 2) di cui la 1 suddivisa in tre sottoclassi (1a, 1b, 1c) a probabilità crescente di afflussi significativi di grisù a cui sono correlate misure di sicurezza crescenti.

Le valutazioni preliminari del rischio hanno definito lo scavo in tradizionale della galleria di derivazione di Campolattaro, in applicazione al citato standard, in Classe 2, ovvero al massimo livello di rischio previsto.

Gli apprestamenti previsti raggiungerebbero in questo caso il massimo livello di impatto sulle attività, sui mezzi e sull'impiantistica, generando condizionamenti anche significativi, in termini di costi e tempistiche di realizzazione, mirati ad assicurare i necessari livelli di sicurezza.

Il sistema di sicurezza in classe 2 prevedrebbe sinteticamente, oltre all'adozione delle tipiche misure di sicurezza previste per lo scavo:

- l'utilizzo di soli mezzi e impianti ATEX per l'intera galleria indipendentemente dall'area di lavorazione;
- la costante presenza di un Sistema/organizzazione dedicata al monitoraggio e allarme gas, combinato a rigide procedure di lavorazione ed evacuazione.

Tali condizioni assolutamente imprescindibili per la garanzia della sicurezza del personale operante in galleria comportano necessariamente un sensibile incremento dei costi di produzione ed un elevato incremento dei tempi di realizzazione dell'opera.

A solo titolo di esempio, il ricorso a macchine da miniera di tipo ATEX (o trasformate ATEX) comporta una maggiorazione del costo della singola attrezzatura non inferiore al 300% e, inoltre, l'adozione a bordo macchina degli usuali sistemi di controllo delle temperature rende generalmente inferiore del 50% la loro produttività.

Analogamente l'organizzazione del sistema di monitoraggio gas combinato ad un efficiente sistema di evacuazione comporta, oltre ai costi stessi del sistema e del personale addetto coinvolto, la frammentazione di ogni attività in galleria usualmente realizzate contemporaneamente essendo incompatibili le une con le altre per il rischio gas e per una corretta gestione dell'evacuazione (vedasi ad esempio l'impossibilità ad eseguire scavo di avanzamento contemporaneamente alla realizzazione del rivestimento definitivo).

Infine, per la necessità di garantire in ogni fase di lavoro la sicurezza delle maestranze, sarà necessario prevedere sempre la disponibilità di mezzi di emergenza nei pressi del fronte di scavo oltre ad un'arca di salvataggio in caso di impossibilità all'esodo; vista l'esigua sezione della galleria dovrebbero essere previste piazzole/nicchie per la sosta fissa dei mezzi di emergenza, adibiti ad evacuazione e salvataggio da realizzarsi ad interasse non inferiore a 300 metri.

Analogamente all'esperienza di Pavoncelli ed in piena rispondenza alle norme vigenti e alle specifiche NIR di settore, la scelta dello scavo meccanizzato consentirà di prevedere già in fase di progettazione tutte quelle implementazioni macchina e previsioni procedurali, grazie alle quali l'eventuale insorgenza di miscele gas-ossigeno potrà essere consentita solo in aree prestabilite e

monitorate (scarico coclea, nastro,...) dove opportuni sistemi di rilevazione unitamente ad un limitato intorno di apparecchiature ATEX , consentiranno se necessario il tempestivo fermo scavo, l'iperventilazione, l'eventuale disalimentazione della TBM, e contestuale ripristino dell'impermeabilità tra marino e galleria (costituita da ghigliottina scarico marino, conci e spazzole) per permettere il drenaggio in sicurezza delle sacche di gas direttamente dalla camera di scavo.

Il metodo di scavo meccanizzato con TBM è quindi di gran lunga più sicuro dei sistemi di scavo tradizionali per quanto riguarda l'avanzamento in presenza di gas/gallerie grisucose come quella in esame in quanto:

- le zone di formazione di atmosfere esplosive sono definite nello spazio e nel tempo per l'intero avanzamento e vengono costantemente monitorate in automatico, contrariamente allo scavo in tradizionale in cui la formazione di atmosfera esplosiva in un punto investe necessariamente e senza possibilità di intervento l'intera galleria;
- è escluso l'intervento umano in caso di rilevazione gas in quanto i sistemi di intervento e disalimentazione sono tutti automatizzati, contrariamente al tradizionale che utilizzando automezzi a combustione interna autonomi;
- Il sistema di ventilazione dispone, stante l'assenza di mezzi minerari, di maggiori sezioni utili garantendo portate d'aria più abbondanti;
- lo schema di ventilazione e le velocità dell'aria nelle varie sezioni di lavoro sono fisse in tutte le fasi del ciclo produttivo e anche il fronte di scavo è ventilato in aspirazione;
- i sistemi di rilevazione, monitoraggio gas, nonché i sistemi di evacuazione e ricovero, sono solidali alla TBM e non necessitano delle periodiche e delicate attività di montaggio/collaudo/smontaggio tipiche dello scavo in tradizionale;
- le maestranze coinvolte e il processo di tipo industrializzato ben si presta in fase di progettazione, ovvero in corso d'opera, all'implementazione di sistemi e procedure di minimizzazione rischio con ridotti impatti produttivi e limitati oneri.

I sistemi e macchinari deputati al controllo e alla gestione del rischio gas nello scavo meccanizzato, necessitano di spazio operativo di installazione e manutenzione che nel caso di Pavoncelli era fortemente limitato, costituendo un potenziale aggravio nella produttività di scavo e nell'economicità della TBM nonché nella scelta obbligati di rari e onerosi sistemi semi-miniaturizzati.

La scelta di un diametro maggiore rispetto a quello della Pavoncelli consentirà il ricorso a sistemi a maggior efficienza, garanzia di durata, e sicuramente di più facile reperibilità sul mercato.

In conclusione, dal punto di vista della salute, sicurezza e ambiente sul lavoro risulta di gran lunga più vantaggioso lo scavo mediante metodo meccanizzato, mediante il quale possono essere minimizzati i principali rischi di incidenti presenti durante lo scavo di gallerie.

## **6.6 VELOCITÀ DI AVANZAMENTO**

La velocità di avanzamento ha un impatto notevole sui tempi e sui costi complessivi di costruzione.

Secondo casi di studio in tutto il mondo più autori hanno mostrato come in ogni caso lo scavo mediante metodologia meccanizzata garantisca la realizzazione di gallerie in tempi fino a 4-6 volte inferiori rispetto allo scavo in tradizionale il che comporterebbe una riduzione dei costi di costruzione complessivi.

Nel caso della galleria eseguita in tradizionale, la presenza del gas, così come descritto in precedenza, comporta la necessità di adottare rigorose procedure e continui monitoraggi con conseguenze sui tempi di realizzazione dell'opera.

Ipotizzando una produzione giornaliera media di 2,00 m/giorno per ciascun imbocco, nel caso di scavo in tradizionale si avrebbe:

- $7.600 \text{ ml} / (1,5 \cdot 2,00 \text{ ml/giorno}) = 2.533$  giorni di esecuzione dell'opera;
- $2.533 \text{ giorni} / 30 \text{ giorni/mese} = 84$  mesi circa per esecuzione dell'opera, a cui vanno aggiunti 6 mesi per le attività di preparazione opere di imbocco.

La produzione di  $1,5 \cdot 2,00 \text{ ml/giorno}$  per ciascun fronte (i fronti di accesso sono l'imbocco a valle e la discenderia ausiliaria, se opportunamente adeguate) trova

la seguente giustificazione:

- nel progetto posto a base di gara della Galleria Pavoncelli Bis l'Amministrazione, per la realizzazione in tradizionale di un tratto di galleria ancorchè non grisutuosa di circa 4000 metri, ha considerato una produzione media giornaliera di 1.14 ml/g per imbocco. Un dato di produzione media giornaliera così basso è stato altresì confermato nel documento "Valutazione dei costi per la costruzione di gallerie in ambienti potenzialmente esplosivi" nell'ambito dei lavori della PEDEMONTANA DELLE MARCHE - Secondo stralcio. In tale relazione del 2017, quindi più recente rispetto al periodo di esecuzione della Galleria Pavoncelli Bis, sono riportate le produzioni di scavo in galleria di classe 0, quindi "senza gas", pari a circa 1,7 ml/g che invece in classe 2, quindi "grisutuosa" scendono a circa 1.3 ml/g con una diminuzione di produzione di circa il 26%. In base ai dati precedenti ed a numerosi altri che si possono trovare nella letteratura specifica si può quindi concludere come avere considerato per la galleria di Campolattaro una produzione media di 1,5 ml/g per imbocco in condizioni "grisutuose" sia in linea con le esperienze richiamate.

Con galleria eseguita in meccanizzato, ipotizzando una produzione giornaliera media di 10 ml/giorno, si avrebbe:

- $7.600 \text{ ml} / 10 \text{ ml/giorno} = 760 \text{ giorni}$ ;
- $760 \text{ giorni} / 30 \text{ giorni/mese} = 25 \text{ mesi}$  a cui vanno aggiunti circa un anno per le attività di preparazione opere di imbocco, attrezzaggio piazzale esterno e montaggio e smontaggio macchina.

**Si evince che la stima dei tempi porta a valori assolutamente non comparabili, anche se si volesse tener conto di minori produzioni con TBM per le manutenzioni da eseguire.**

Questo elemento consente altresì di elaborare un programma lavori ad hoc ed evitare la concentrazione di lavori/realizzazione di opere nello stesso periodo.

In conclusione, anche in termini di velocità di avanzamento il metodo meccanizzato è più vantaggioso del metodo convenzionale, tenendo altresì

conto delle miglorie che verrebbero apportate alla TBM.

## **6.7 FLESSIBILITÀ**

La flessibilità in un metodo di scavo è legata alla capacità di adattamento alle variazioni del profilo e delle condizioni del materiale attraversato.

Come già sottolineato nei paragrafi precedenti, sia lo sviluppo planimetrico della galleria di Campolattaro che la sezione trasversale prevista non presentano particolari variazioni il che rende analoghi i due metodi di scavo (tradizionale e meccanizzato) dal punto di vista della flessibilità.

## **6.8 RISCHI GEOLOGICI**

La flessibilità in un metodo di scavo è legata alla capacità di adattamento alle variazioni del profilo e delle condizioni del materiale attraversato. Lo scavo di gallerie, sia in tradizionale che meccanizzato, è in genere esposto ad una serie di rischi legati soprattutto alla limitata conoscenza del terreno da scavare e all'incertezza nei riguardi del comportamento allo scavo.

Di seguito si descrivono le principali criticità già anticipate, legate al contesto geologico, idrogeologico e geotecnico, che potrebbero avere ripercussioni sulla fase realizzativa delle gallerie descrivendo i vantaggi e svantaggi dei due metodi di scavo.

Valutazioni più approfondite riguardo alcuni dei rischi principali (quali stabilità del fronte, rischio squeezing, ecc.) sono state illustrate nei paragrafi successivi.

### **6.8.1 Zone di faglia e venute d'acqua**

Il potenziale rischio di venute d'acqua in galleria in fase di scavo è connesso alle caratteristiche idrogeologiche delle formazioni di interesse. Tale rischio dipende dalla conducibilità idraulica dei materiali attraversati, dal carico idraulico e dall'eventuale presenza di zone con discontinuità. In particolare, sulla base degli approfondimenti geologici eseguiti ci si aspetta che tale rischio sia presente nelle zone di materiale cataclasato (zone di faglia) in quantità e intensità proporzionale all'estensione delle stesse zone ma soprattutto nelle transizioni tra le varie formazioni geologiche attraversate. Nel caso di

attraversamento di zone di faglia e venute d'acqua (come si evince dal profilo geologico) lo scavo mediante metodo tradizionale risulta particolarmente complesso in quanto sarebbero necessari pesanti interventi di consolidamento (iniezioni, sistemi di drenaggio, ecc.) con conseguenti fermi e aumento dei costi di scavo. Con lo scavo meccanizzato, avendo una TBM adeguatamente attrezzata e dimensionata, le difficoltà sarebbero molto ridotte.

### **6.8.2 Instabilità del fronte ed elevate convergenze**

In caso di realizzazione della galleria con scavo meccanizzato in queste condizioni, le contromisure da adottare al fine di mitigare il rischio di intrappolamento dello scudo nelle zone ad elevate convergenze sono:

- l'adozione di un sufficiente sovra-scavo (gap tra scudo e superficie di scavo);
- l'adozione di una forma conica dello scudo della TBM;
- avanzamento rapido in queste zone;
- iniezione di lubrificanti a base di bentonite per ridurre l'attrito scudo/terreno;
- avanzamento con elevata forza di spinta.

In caso di realizzazione della galleria con scavo tradizionale in presenza di comportamento spingente si può intervenire utilizzando tecniche di sostegno particolari quali centine scorrevoli o consolidamenti del fronte e del contorno di scavo.

In conclusione, si può concludere che dal punto di vista di rischio di elevate convergenze caratteristico delle formazioni attraversate dalla galleria di Campolattaro, i due metodi di scavo (tradizionale e meccanizzato) sono equivalenti ed entrambi applicabili.

### **6.8.3 Presenza di gas**

Oltre a quanto espresso in precedenza, in ogni caso, ulteriori accorgimenti da adottare nell'ipotesi di scavo meccanizzato mediante una macchina TBM-EPB che forniscono un'adeguata confidenza di poter lavorare in sicurezza ed una sufficiente continuità di lavoro, sono:

- applicazione continua di rivestimenti prefabbricati in calcestruzzo all'interno

dello scudo della TBM e stuccatura degli stessi mentre lo scudo avanza, sigillando così il perimetro dello scavo ed evitando quindi l'ingresso di gas o acqua;

- garantire l'avanzamento della TBM-EPB in modalità chiusa, specialmente nelle zone dove ci si aspetta la presenza di gas;
- prevedere adeguati sistemi di monitoraggio all'interno del corpo fresa;
- compartimentazione dei volumi del corpo fresa;
- adozione di specifiche misure di sicurezza.

Inoltre, il fatto di avere un cavo più grande rispetto a Pavoncelli aiuta molto in relazione sia all'installazione di sistemi di ventilazione più grandi, sia alla maggiore velocità di diluizione del gas per riportare i valori sotto le soglie.

Come detto, in analogia alla galleria Pavoncelli Bis, lo scavo della galleria di Campolattaro è prevista essere di Classe II per quanto riguarda la presenza di gas. Per questo, nel caso di scavo in tradizionale, gli apprestamenti previsti dovranno raggiungere il massimo livello di impatto sulle attività, sui mezzi e sull'impiantistica, generando condizionamenti anche significativi, in termini di costi e tempistiche, mirati ad assicurare i necessari livelli di sicurezza.

Ne consegue che, nel caso di esecuzione con sistema tradizionale, si dovrebbero approntare impianti e macchine operatrici in versione antideflagrante, con modalità di scavo, sistemi di monitoraggio e procedure di sicurezza tali da aumentare in modo considerevole sia i tempi che i costi di realizzazione dell'opera rispetto ad una galleria in ambiente non grisuto. Le ingenti venute di gas, nonché le procedure da adottare secondo la NIR n° 28 (mezzi e impianti ATEX, sistemi di emergenza e ventilazione, sistema di monitoraggio, procedure di sicurezza, ecc.), hanno una notevole influenza sulle specifiche lavorazioni da eseguire con lo scavo in tradizionale.

Si può quindi concludere che lo scavo meccanizzato risulta essere la metodologia di scavo migliore dal punto di vista dei rischi geologici sia sotto l'aspetto della sicurezza che sotto gli aspetti di velocità di avanzamento e di economicità del progetto.

## **6.9 STABILITÀ DEL CAVO**

Lo scavo circolare è la forma più favorevole dal punto di vista della stabilità; pertanto, il metodo meccanizzato permette una maggiore stabilità dell'ammasso in condizioni normali.

Inoltre, a parità di condizioni geologiche, lo scavo mediante metodo meccanizzato provoca un disturbo minore all'ammasso roccioso intorno allo scavo. Il supporto richiesto, rispetto al metodo tradizionale, è inoltre significativamente ridotto.

L'utilizzo del metodo meccanizzato, oltre a garantire una forma circolare e quindi un carico a lungo termine uniforme che andrà a sollecitare il rivestimento della galleria, permette l'installazione del supporto definitivo contemporaneamente alle operazioni di scavo il che consente di ridurre in modo notevole spessori e quantità di supporto rispetto ad uno scavo in tradizionale in cui oltre al rivestimento definitivo dovranno essere previsti supporti temporanei durante la fase di scavo.

In conclusione, dal punto di vista della stabilità e del comportamento allo scavo delle formazioni geologiche attraversate, per la galleria in esame lo scavo meccanizzato risulta più vantaggioso di quello in tradizionale.

## **6.10 PERSONALE OPERATIVO E DI COSTRUZIONE**

Per il funzionamento e il personale, il metodo meccanizzato è più vantaggioso del tradizionale.

Lo scavo mediante metodo meccanizzato è un'operazione continua (non ciclica), quindi è un processo ripetitivo; il personale svolge attività ripetitive con competenze e abilità richieste limitate e le cui fasi di addestramento e apprendimento sono continuamente eseguite, il che significa meno fattore umano.

Lo scavo mediante TBM è, ai giorni d'oggi, ormai un metodo di scavo consolidato da punto di vista degli equipaggiamenti e delle operazioni da eseguire. Le squadre di lavoro vengono addestrate periodicamente a differenza dello scavo in tradizionale dove per la flessibilità e la variazione delle condizioni

di scavo, tale processo non può essere standardizzato e dove, quindi, il fattore umano gioca un ruolo preponderante.

Per i motivi sopra descritti, il metodo meccanizzato è più vantaggioso di quello in tradizionale in termini di equipaggiamento.

#### **6.11 QUALITÀ DEL PROFILO DI SCAVO**

Lo scavo in meccanizzato con TBM garantisce una maggiore precisione del profilo di scavo rispetto al tradizionale in quanto è possibile avere una maggiore omogeneità del diametro di scavo direttamente vincolato dalle dimensioni stesse della macchina. Diversamente il tradizionale essendo realizzato con mezzi meccanici fornisce di per sé un profilo molto più irregolare.

#### **6.12 IMPATTO AMBIENTALE**

In generale, l'utilizzo del metodo meccanizzato, nelle aree circostanti, causa meno disturbi ambientali, rumori e vibrazioni. Inoltre, il processo con TBM, tipico di un processo industrializzato, permette una programmazione puntuale delle forniture, da centri di produzione esterni all'area diversamente al metodo tradizionale che comporta un coinvolgimento maggiore dell'area logistica esterna.

La produzione di smarino, stante le sezioni, è indipendente dalla metodologia di scavo.

Nel caso di scavo con TBM l'utilizzo di additivi ecocompatibili di ultima generazione, come comprovato durante lo scavo della Pavoncelli, consente di mantenere la qualifica di sottoprodotto, e non di rifiuto, delle terre prodotte dallo scavo di galleria.

Pertanto, lo smarino potrà essere conferito, analogamente al tradizionale, presso cave o impianti di recupero, senza costituire un maggior impatto ambientale.

È opportuno evidenziare che anche il tempo di realizzazione è un fattore determinante per la ponderazione degli impatti sul territorio; ne segue, quindi, che la scelta del metodo meccanizzato costituisce una miglioria per la gestione e mitigazione del rischio rispetto al tradizionale.

In conclusione, il metodo meccanizzato consente notevolmente di ridurre l'impatto ambientale causato dalla realizzazione della galleria in esame favorendolo nei confronti del metodo tradizionale.

## **7. PREDIMENSIONAMENTO DEI RIVESTIMENTI**

### **7.1 SCAVO IN TRADIZIONALE DELLA DISCENDERIA DI ACCESSO LATERALE**

Lo scavo in tradizionale è stato valutato adatto alla realizzazione della discenderia di accesso laterale.

Sulla base delle informazioni geotecniche disponibili, si è proceduto ad una valutazione preliminare della risposta tensio-deformativa dell'ammasso allo scavo, in assenza di interventi di stabilizzazione.

La valutazione della risposta deformativa dell'ammasso allo scavo è condotta con riferimento alle tre categorie di comportamento fondamentali individuate nel metodo ADECO-RS, di seguito brevemente richiamate, sulla base delle quali il tracciato sotterraneo è suddiviso in tratte a comportamento deformativo omogeneo.

Tale valutazione consente di individuare gli interventi di precontenimento e/o di contenimento più idonei a garantire condizioni di stabilità della galleria in fase di scavo e a lungo termine.

#### **7.1.1 Classi di comportamento del fronte di scavo**

Secondo l'approccio *ADECO-RS* la previsione dell'evoluzione dello stato tensionale a seguito dell'apertura di una galleria è possibile attraverso una stima dei fenomeni deformativi, che forniscono indicazioni sul comportamento della cavità nei riguardi della stabilità a breve e a lungo termine. Dati sperimentali e analisi teoriche hanno dimostrato che il comportamento della cavità è significativamente condizionato, oltre che dalle caratteristiche geometriche della galleria stessa e dai carichi litostatici, anche dalle caratteristiche di resistenza e di rigidità del nucleo d'avanzamento, inteso come il volume di terreno a monte del fronte di scavo. Se il nucleo non è costituito da materiale sufficientemente rigido e resistente da mantenere in campo elastico il proprio comportamento tensio-deformativo, si sviluppano fenomeni deformativi e plasticizzazioni rilevanti in avanzamento, a cui consegue l'evoluzione verso condizioni di instabilità del fronte e del cavo. Se, invece, il comportamento del

nucleo d'avanzamento si mantiene in campo elastico, il nucleo stesso svolge un'azione di precontenimento del cavo, che si mantiene a sua volta in condizioni elastiche, conservando le caratteristiche di massima resistenza del materiale attraversato e quindi configurazioni di stabilità.

Sulla base di tali considerazioni, il comportamento del nucleo-fronte di scavo, al quale è legato quello della cavità, può essere sostanzialmente ricondotto alle seguenti tre categorie:

- **Categoria A: nucleo-fronte stabile.**

Tale categoria corrisponde alla condizione in cui lo stato tensionale nel terreno al fronte e al contorno della cavità non supera le caratteristiche di resistenza dell'ammasso; in tal caso, le deformazioni sono prevalentemente elastiche, di piccola entità e tendono ad esaurirsi rapidamente con la distanza dal fronte. Il fronte di scavo e il cavo sono stabili e quindi non si rendono necessari interventi preventivi di stabilizzazione, se non localizzati e in misura ridotta. Il rivestimento definitivo costituisce il margine di sicurezza per la stabilità a lungo termine.

- **Categoria B: nucleo-fronte stabile a breve termine.**

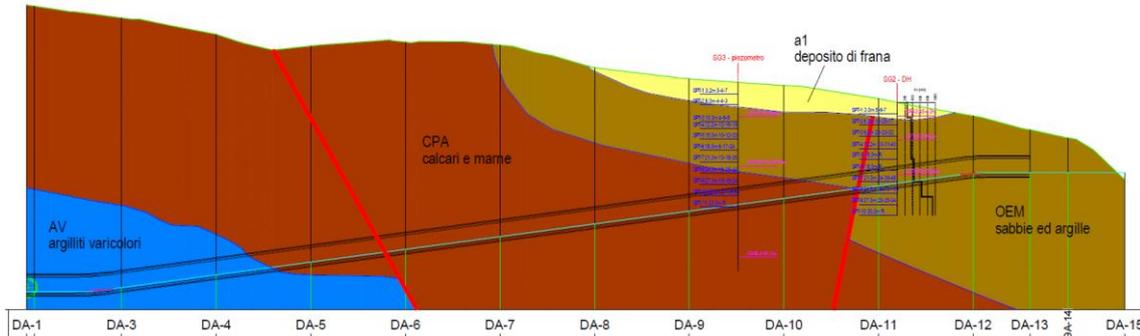
Tale categoria corrisponde alla condizione in cui lo stato tensionale nel terreno al fronte e al contorno della cavità, a seguito delle operazioni di scavo, raggiunge la resistenza dell'ammasso. I fenomeni tensio-deformativi sono di tipo elasto-plastico, di maggiore entità rispetto al caso precedente. Nell'ammasso può prodursi una eventuale riduzione delle caratteristiche di resistenza con decadimento verso i parametri residui. La risposta tensio-deformativa può essere opportunamente controllata con adeguati interventi di preconsolidamento del fronte e/o di consolidamento al contorno del cavo. In tal modo si fornisce l'opportuno contenimento all'ammasso perché mantenga un comportamento stabile. Nel caso non si prevedano interventi, lo stato tensio-deformativo può evolvere verso situazioni di instabilità del cavo in fase di realizzazione. Il rivestimento definitivo costituisce il margine di sicurezza per la stabilità a lungo termine.

- **Categoria C: nucleo-fronte instabile**

Tale categoria corrisponde alla condizione in cui, superata la resistenza del terreno, i fenomeni deformativi evolvono molto rapidamente in campo plastico, producendo la progressiva instabilità del fronte di scavo e un incremento dell'estensione della zona dell'ammasso decompressa e plasticizzata al contorno della cavità, con rapido decadimento delle caratteristiche meccaniche del materiale. L'espansione della fascia di materiale decompresso al contorno del cavo deve essere contenuta prima dell'arrivo del fronte di scavo, mediante interventi di preconsolidamento in avanzamento, che consentono di creare artificialmente l'effetto arco per far evolvere la risposta tensio-deformativa verso configurazioni di stabilità.

### **7.1.2 Valutazione delle categorie di comportamento**

Le valutazioni preliminari del comportamento deformativo del fronte sono state condotte con riferimento alle coperture ed al modello geotecnico della tratta oggetto di studio.



**Figura 33: Profilo geologico della discenderia laterale**

Alla luce di tali valutazioni è possibile concludere che:

- Il comportamento di tipo **A** risulta prevalentemente applicata nella formazione di Corleto Perticara (**CPA**), nelle zone a coperture inferiori ( $H < 30$  m);
- Il comportamento di tipo **B** è quello prevalente sia nella formazione **CPA** sia all'interno della Argille Varicolori (**AV**); esso è riscontrato anche nei depositi sabbiosi del sistema di Colle Marino (**OEM**) per coperture maggiori;

- Il comportamento di tipo **C** è riscontrato prevalentemente nelle zone di **faglia** e all'**imbocco** della galleria.

### **7.1.3 Definizione delle sezioni tipo**

Ipotizzando quindi la tecnica dello scavo in tradizionale mediante avanzamenti a piena sezione per sfondi aventi lunghezza variabile in funzione del contesto geomeccanico seguiti dalla immediata posa del prerivestimento, sono state definite in prima approssimazione 3 diverse sezioni tipo di avanzamento (intese come complesso inscindibile di modalità operative, fasi di lavoro, interventi di stabilizzazione, confinamento, consolidamento, drenaggio e delle relative tecnologie esecutive) denominate rispettivamente A, B, C.

Per ciascuna sezione tipo sono previsti opportuni interventi di preconsolidamento al fronte ed al contorno, l'installazione a ridosso del fronte di scavo di un rivestimento provvisorio costituito da spritz-beton fibrorinforzato e centine metalliche ed infine il getto dei rivestimenti definitivi di arco rovescio e calotta. Di seguito sono riportate le percentuali di applicazione delle diverse classi di comportamento lungo il tracciato e la descrizione delle sezioni tipo.

Classe di comportamento	% lungo lo sviluppo della galleria
A	6%
B	51%
C	43%

**Tabella 5: Distribuzione applicazione delle classi di scavo.**

### **Sezione tipo A**

La sezione A è una sezione cilindrica che non prevede interventi di preconsolidamento del fronte e presostegno al contorno. Sono di seguito elencati i principali elementi caratterizzanti la sezione A, ordinati secondo le fasi esecutive previste:

- scavo a piena sezione per singoli sfondi di 2.00 m;
- prerivestimento (ad ogni sfondo) composto da 20 cm di spritz beton fibrorinforzato e doppie centine IPN140 con passo 1.50 m  $\pm$  20%;

- chiodatura radiale mediante 3/4 chiodi ad ancoraggio continuo tipo f24 disposti in raggiere alternate, lunghezza 4.0 m, interasse longitudinale 1.50 m;
- murette in calcestruzzo armato (spessore 40 cm) gettato ad una distanza massima dal fronte pari a 3 diametri;
- calotta armata (spessore 40 cm) gettata ad una distanza non vincolata dal fronte.

### **Sezione tipo B**

La B è una sezione cilindrica che prevede interventi di preconsolidamento del fronte, con campi di avanzamento da 12.0 m. Sono di seguito elencati i principali elementi caratterizzanti la sezione B, ordinati secondo le fasi esecutive previste:

- preconsolidamento del fronte realizzato mediante 10±10% elementi strutturali in VTR, L=12.0 m (sovrapposizione minima 6.0 m) cementati in foro con miscele cementizie;
- scavo a piena sezione per singoli sfondi di 1.20 m secondo campi di avanzamento di lunghezza pari a 8.0 m;
- prerivestimento (ad ogni sfondo) composto da 20 cm di spritzbeton fibrorinforzato e doppie centine IPN180 con passo 1.20 m ± 20%;
- arco rovescio (spessore 50 cm) e murette in calcestruzzo armato gettati ad una distanza massima dal fronte pari a 1,5 diametri;
- calotta armata (spessore 40 cm) gettata ad una distanza massima dal fronte pari a 4 diametri.

### **Sezione tipo C**

La C è una sezione cilindrica che prevede interventi di preconsolidamento del fronte e del contorno, con campi di avanzamento da 12.0 m. Sono di seguito elencati i principali elementi caratterizzanti la sezione C, ordinati secondo le fasi esecutive previste:

- preconsolidamento del fronte realizzato mediante 20±10% elementi strutturali in VTR, L=15.0 m (sovrapposizione minima 6.0 m) cementati in foro con miscele cementizie;

- preconsolidamento al contorno realizzato mediante  $20\pm 10\%$  elementi strutturali in VTR,  $L=15.0$  m (sovrapposizione minima 6.0 m) cementati in foro con miscele espansive;
- scavo a piena sezione per singoli sfondi di 1.00 m secondo campi di avanzamento di lunghezza pari a 9.00 m;
- prerivestimento (ad ogni sfondo) composto da 30 cm di spritz-beton fibrorinforzato e doppie centine HEB180 con passo 1.00 m  $\pm 20\%$ ;
- arco rovescio (spessore 50 cm) e murette in calcestruzzo armato gettati ad una distanza massima dal fronte pari a 1 diametro;
- calotta in calcestruzzo armato (spessore 50 cm) gettata ad una distanza massima dal fronte pari a 3 diametri.

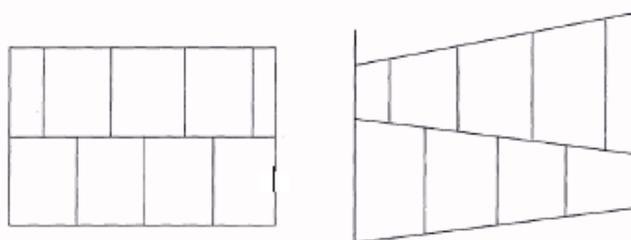
## 7.2 SCAVO IN MECCANIZZATO DELLA GALLERIA DI DERIVAZIONE

Il rivestimento delle gallerie realizzati mediante TBM è costituito da un insieme di conci curvilinei (prefabbricati in calcestruzzo armato), che affiancati realizzano un anello circolare. Tale rivestimento viene messo in opera all'interno dello scudo della macchina di scavo.

Dal punto di vista geometrico i conci di rivestimento possono essere distinti in base alla disposizione delle facce anteriore e posteriore, ed in base alla forma.

Per quanto riguarda la disposizione delle facce esistono:

- conci a facce parallele, che compongono i cosiddetti “anelli retti” (rettangoli avvolti su cilindro);
- conci a facce non parallele formanti dai cosiddetti “anelli conici”.



**Figura 34: Tipologia conci – Anelli retti (sinistra), anelli conici (destra).**

I cosiddetti anelli retti possono essere utilizzati solo per rivestire i tratti di galleria in rettilineo, mentre gli anelli conici possono essere utilizzati per rivestire sia tratti in rettilineo, sia tratti in curva.

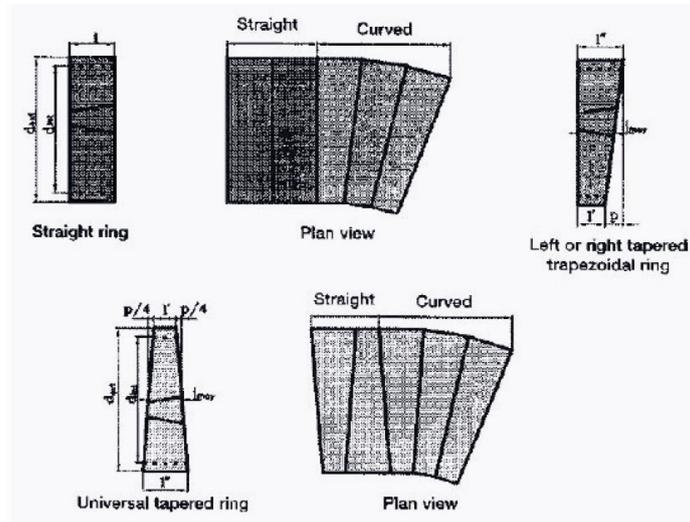


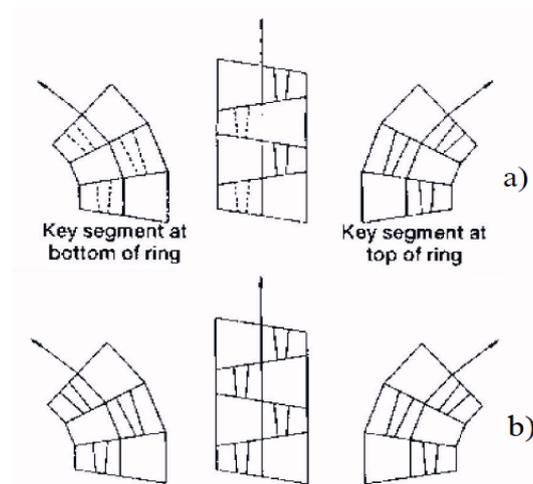
Figura 35: Disposizione di anelli retti e rastremati per tratti in rettilineo ed in curva.

La profondità dei conci viene decisa in base al diametro della galleria, ai raggi di curvatura del percorso della galleria e in funzione delle condizioni di installazione dei conci, in modo da ottimizzare il processo di messa in opera.

In genere gli anelli di rivestimento sono costituiti da assemblaggi di conci a parallelogramma e trapezoidali. La chiusura dell'anello è sempre assicurata da un concio di chiave di forma trapezoidale: per questo motivo i conci adiacenti al concio di chiave hanno un lato sagomato appositamente pensato per la messa in opera del concio di chiave.

Si possono formare due tipi di anelli:

- anelli universali;
- anelli destri e sinistri.

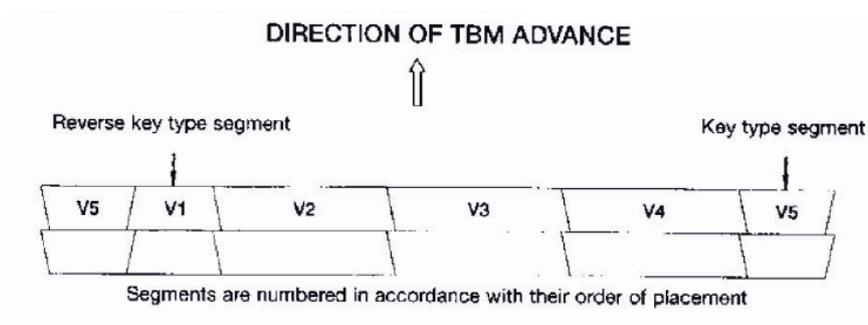


**Figura 36: Utilizzo di anelli destri e sinistri (a) e di anelli universali (b) per tratti in rettilineo ed in curva.**

Nel primo caso si deve progettare un unico set di conci, comprendente:

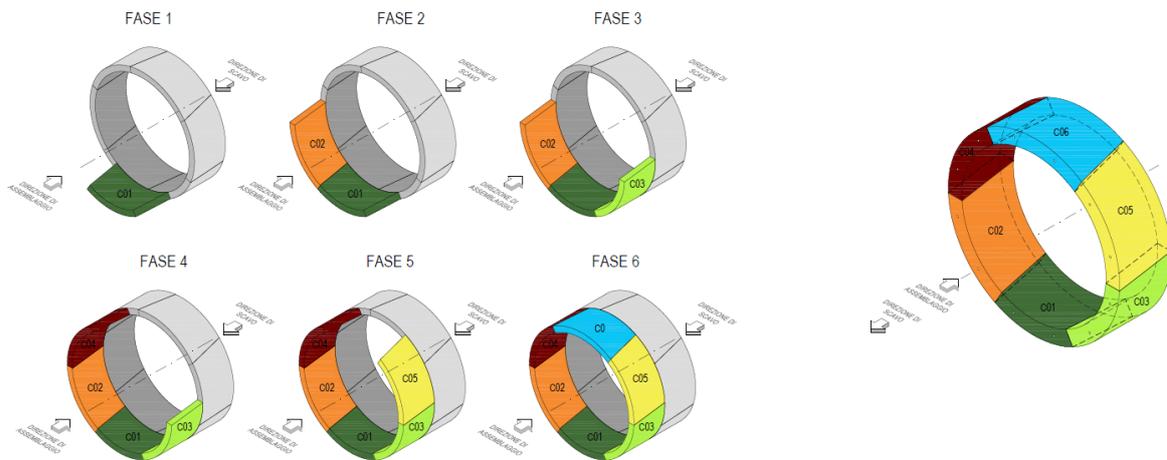
- il concio di chiave (di forma trapezoidale);
- il concio di controchiave (di forma trapezoidale);
- i conci generici (a parallelogramma o rettangolari).

Nel secondo caso bisogna progettare due set diversi di conci. Non varia però la forma dei conci di chiave, controchiave e generici.



**Figura 37: Distribuzione tipica di conci a parallelogramma e trapezoidali per anelli di rivestimento.**

Per la galleria in esame, il diametro interno dell'anello è pari a 4.20 m mentre il diametro esterno è funzione dello spessore dello stesso. In base alle dimensioni attese l'anello sarà costituito da 6+0 elementi, ovvero con sei conci di dimensioni pressappoco simili tra di loro, come mostrato nella figura seguente.



**Figura 38: Rappresentazione assometrica dell'anello in conci.**

I principali carichi che agiscono sul rivestimento sono i seguenti:

- pressione radiale esercitata dal terreno;
- pressione radiale esercitata dall'acqua di falda;
- pressione radiale dovuta alla presenza di materiali rigonfianti (swelling);
- pressione esercitata dalla macchina di scavo sull'anello in fase di avanzamento.

Dai calcoli effettuati sulla base delle informazioni disponibili relative ai parametri geotecnici, si è stabilito che lo spessore dell'anello necessario è pari a 0.40 m. Soprattutto in corrispondenza dell'attraversamento delle tratte caratterizzate dalla presenza di rigonfiamento si attendono infatti delle pressioni sull'anello più elevate. In queste zone, inoltre, saranno necessarie delle spinte rilevanti per permettere l'avanzamento della macchina che devono essere scaricate sul rivestimento. Lo spessore di 0.40 m è, quindi, necessario anche per fornire il contrasto adeguato in fase di avanzamento. Questo valore è in linea con quanto previsto per la galleria Pavoncelli Bis, caratterizzata da caratteristiche geotecniche simili.

## **8. MONITORAGGIO E APPROCCIO OSSERVAZIONALE**

### **8.1 PIANO DI MONITORAGGIO**

Il monitoraggio ha lo scopo di valutare l'efficacia degli interventi e di verificare la corrispondenza dei risultati ottenuti con le ipotesi progettuali. Ha inoltre lo scopo di controllare il comportamento nel tempo del complesso opera-terreno trattato. In altra maniera si può dire che il monitoraggio è alla base di un approccio progettuale flessibile, in cui le ipotesi progettuali sono verificate sistematicamente attraverso controlli in sito e le cui contromisure sono predefinite per reagire quando le condizioni incontrate sono diverse dagli scenari attesi.

La strumentazione e il monitoraggio sono una parte essenziale nella costruzione di una galleria e tra tutte le opere di genio civile, i tunnel sono forse quelle che dove il monitoraggio riveste un ruolo fondamentale: essi hanno, in effetti, la particolarità di essere costruiti a partire da un materiale naturale quasi sempre imperfetto, di cui non si conoscono precisamente né le qualità né i difetti. In questo contesto la verifica del progetto attraverso il monitoraggio è dunque essenziale.

Per una realizzazione quanto più sicura ed economica di un tunnel è necessario un adattamento continuo del progetto e delle sezioni di scavo in modo che i parametri di input possano essere rivisti quando le previsioni si discostano dai valori misurati (vedere figura seguente).

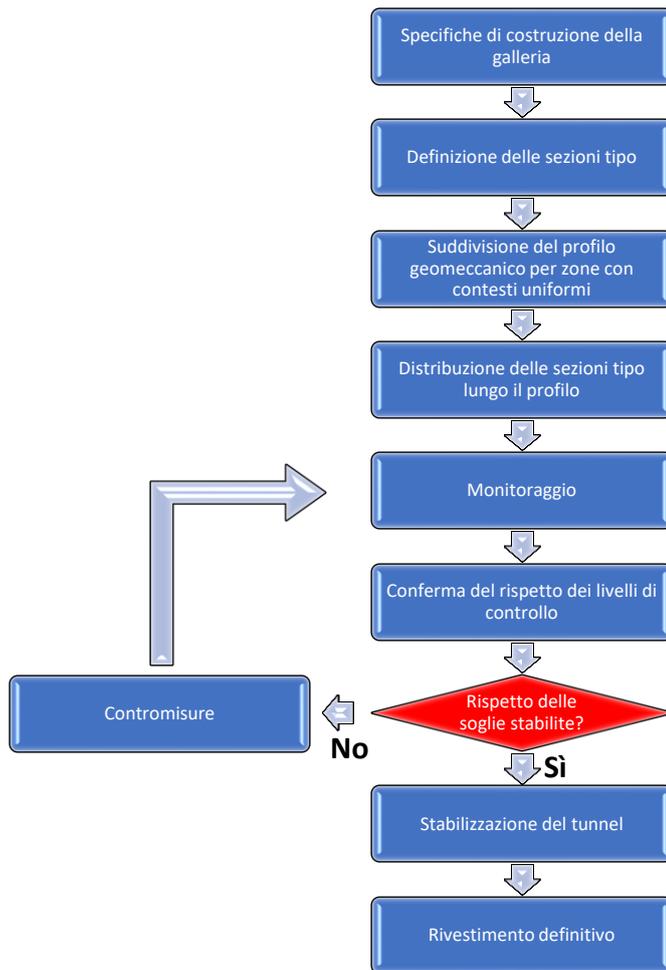


Figura 39: Processo ingegneristico di controllo durante la costruzione

Peck precisava che *il grado di accuratezza con cui doveva essere condotta ciascuna fase è dipendente dalla natura e dalla complessità dell'opera*. Attualmente le misure in corso d'opera entrano ormai integralmente nelle fasi progettuali della maggior parte dei lavori in sotterraneo e si è in grado di registrare anche a distanza le misure di svariate tipologie di grandezze geotecniche e strutturali.

### 8.1.1 Parametri di controllo

Con particolare riferimento al progetto attuale, la funzione basilare è quella di misurare i movimenti nel terreno e le tensioni che si producono nel rivestimento della galleria, concentrandosi sul controllo dei seguenti parametri:

- **Deformazione sul contorno della galleria:** misura della deformazione relativa tra i punti interni alla sezione scavata, ovvero delle convergenze. Verranno controllati sia il valore di deformazione che la velocità, installando una serie di sezioni di convergenza lungo la galleria. Nelle zone particolarmente complicate, la densità e la frequenza di misura delle sezioni di convergenza saranno intensificate, ricorrendo a stazioni topografiche automatiche.
- **Movimenti all'interno dell'ammasso roccioso/terreno:** controllo della deformazione nell'intorno della zona di scavo come risposta al rilascio tensionale del terreno o decompressione. In questo caso verranno installati degli estensimetri.
- **Determinazione delle tensioni nel rivestimento in calcestruzzo:** Misura delle pressioni radiali e tangenziali esercitate dal terreno sul supporto. Verranno utilizzate celle di pressione annegate nel calcestruzzo.
- **Determinazione delle tensioni geostatiche e del rilascio tensionale:** Le tensioni geostatiche, quantificate attraverso il rapporto tensionale  $k_0 = (\sigma_H / \sigma_V)$  possono essere misurate in sito, appunto, da convergenze, martinetti, ecc. Un'altra variabile da determinare è il rilascio tensionale del terreno, generato dallo scavo.

Nel caso di scavo meccanizzato i parametri di scavo della macchina (contropressione al fronte, volume iniettato, pressione di iniezione, peso dello smarino, ...) sono altresì monitorati.

Il piano di monitoraggio è definito sulla base dei calcoli e delle ipotesi progettuali con le seguenti finalità:

- identificare fenomeni imprevisti al fine di evitare situazioni critiche in termini di sicurezza per strutture, infrastrutture, strade ed edifici;
- verificare le ipotesi progettuali e, se possibile, migliorare le soluzioni costruttive attraverso retro-analisi (back-analyses) e ulteriori interpretazioni del comportamento del terreno durante lo scavo.

Le letture devono consentire di attivare immediatamente le contromisure

previste in caso di superamento dei valori di soglia.

## **8.2 APPROCCIO OSSERVAZIONALE**

Il metodo osservazionale consiste in una procedura rivolta alla verifica della conformità della progettazione e all'eventuale adeguamento della stessa in corso d'opera. Si basa sull'interpretazione del comportamento interattivo terreno-struttura, a partire dai dati di monitoraggio dei parametri geotecnici rappresentativi, in particolar modo nelle fasi costruttive iniziali. Tale metodo è, quindi, particolarmente utile in caso di opere geotecniche per le quali le fasi costruttive possono spesso presentare delle criticità inaspettate.

A tal riguardo, le NTC 2018 ammettono l'impiego del metodo osservazionale "nei casi in cui a causa della particolare complessità della situazione geologica e geotecnica e dell'importanza e impegno dell'opera, dopo estese ed approfondite indagini permangano documentate ragioni di incertezza risolvibili solo in fase di esecuzione dell'opera".

Nel caso in cui le condizioni in situ siano significativamente più favorevoli rispetto alle ipotesi progettuali, è opportuno ricorrere all'ottimizzazione dei supporti e dei rivestimenti, per ridurre i tempi ed i costi di realizzazione dell'opera. Nel caso avverso in cui le condizioni in situ si dimostrino più gravose delle ipotesi progettuali, occorre predisporre un piano che permetta di realizzare delle eventuali indagini integrative e rinforzare ed aumentare la frequenza del monitoraggio in corso d'opera con lo scopo di, se necessario, proporre una soluzione progettuale alternativa a quella di base.

Gli obiettivi del metodo sono pertanto:

- adeguare il livello di sicurezza dell'opera al contesto reale, garantendone la funzionalità e l'adeguatezza; ridurre i rischi connessi alle attività di cantiere;
- ridurre i tempi ed i costi di costruzione, ove possibile.

Il metodo osservazionale si articola nelle seguenti fasi operative:

### **A. PROGETTAZIONE:**

#### **1. Caratterizzazione geotecnica:**

- Esplorazione preliminare sufficiente a stabilire, alla scala del progetto, la litologia, la stratigrafia e le proprietà fisiche e meccaniche dei materiali, pur individuando il grado di incertezza residua ed i rischi correlati;
  - Individuazione delle condizioni di progetto più probabili e di quelle più sfavorevoli, con un ruolo importante giocato dalla geologia;
2. Progettazione e dimensionamento delle opere sulla base delle ipotesi di comportamento del terreno basate sulla caratterizzazione geotecnica;

**B. ESECUZIONE LAVORI E MONITORAGGIO:**

1. Lettura dei dati: scelta delle grandezze da monitorare durante la costruzione attraverso una lettura periodica con frequenze definite;
2. Analisi e restituzione dei dati:
- trasformazione della grandezza misurata (ad esempio tensione elettrica) in una grandezza fisica pertinente,
  - validazione dei dati, dopo eliminazione dei valori considerati aberranti,
  - tracciamento delle evoluzioni rispetto alla misura di “zero”,
  - Interpretazione del comportamento del sistema terreno-struttura;

**C. ADEGUAMENTO/OTTIMIZZAZIONE DEL PROGETTO**

1. Analisi critica del progetto: adattamento delle soluzioni costruttive al contesto nei margini previsti dal progetto originario. In caso di deviazione significativa delle risultanze sperimentali dai valori attesi da calcolo, individuazione preventiva degli interventi e delle modifiche del progetto originario;
2. Eventuale approfondimento geotecnico: verifica delle condizioni geotecniche in sito attraverso la realizzazione di indagini complementari; misura delle grandezze scelte ed

interpretazione tempestiva delle condizioni reali in situ;

3. Eventuale riprogettazione: modifica del progetto per adattarlo alle reali condizioni.

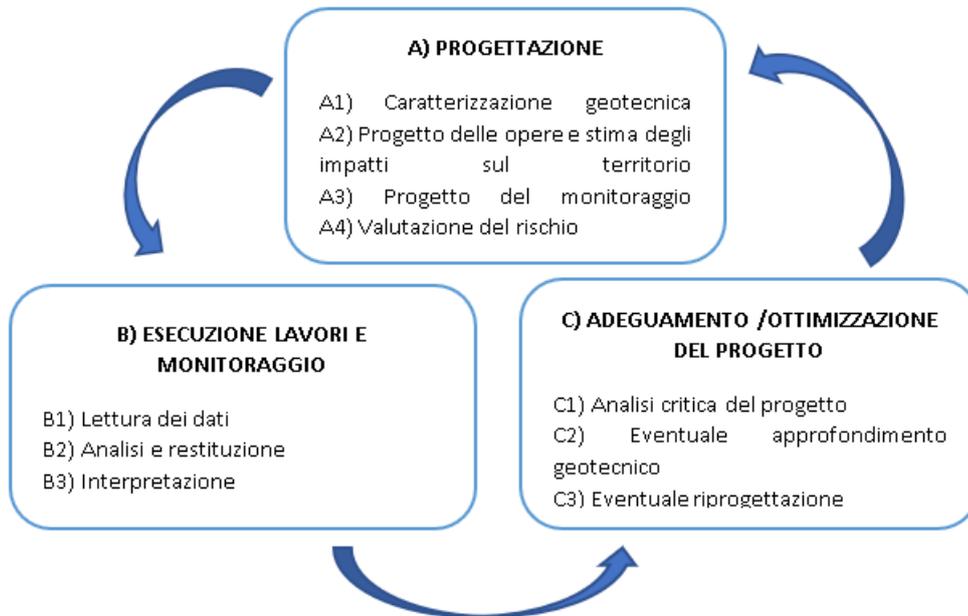


Figura 40: Metodo osservazionale – Fasi operative

### 8.2.1 A) Progettazione orientata al metodo osservazionale

L'approccio adottato nella progettazione dello scavo delle due gallerie principali è declinato in maniera differente in funzione dei metodi di scavo scelti.

- Galleria di derivazione – metodo meccanizzato:
  - Si identificano i rischi geologici/idrogeologici/geotecnici intrinseci e l'affidabilità dei dati,
  - Si analizzano i rischi iniziali legati allo scavo meccanizzato e alla durabilità dell'opera,
  - Sulla base di questa analisi di rischio si definiscono le misure correttive da prevedere (progetto della fresa e del rivestimento in conci prefabbricati) e si determina il rischio residuo, che deve essere accettabile o tollerabile.
  - Per gli eventi il cui rischio residuo è classificato come tollerabile, si definiscono le procedure da adottare in situazioni di emergenza.
- Discenderia – metodo tradizionale:

- Si dimensionano le sezioni tipo di scavo sulla base delle classi di comportamento dell'ammasso identificate a partire dalla caratterizzazione geotecnica,
- Si indicano le distribuzioni percentuali di applicazione delle sezioni tipo lungo il profilo geomeccanico,
- Si definiscono le soglie dei parametri di controllo e la procedura di assegnazione della sezione tipo da applicare per il campo di avanzamento successivo.

Nel caso del progetto in esame, un'analisi dei rischi principali è stata realizzata seguendo l'approccio della raccomandazione AFTES che propone una valutazione sottoforma di matrice dei rischi, stabilendo il criterio di **Livello di Rischio (LR)**. Esso qualifica il la significatività del rischio ed è espresso in funzione della sua Probabilità (P) di occorrenza e del suo **Impatto (I)**:  $R = P \times I$ . La probabilità è valutata con un punteggio da 1 (evento improbabile) a 4 (evento probabile). Analogamente l'impatto è valutato con un punteggio da 1 (debole) a 4 (molto forte).

La figura seguente presenta la matrice dei rischi in cui i livelli di rischio sono riportati con un codice di colori.

La probabilità è valutata con un punteggio da 1 (evento improbabile) a 4 (evento probabile). Analogamente l'impatto è valutato con un punteggio da 1 (debole) a 4 (molto forte).

La figura seguente presenta la matrice dei rischi in cui i livelli di rischio sono riportati con un codice di colori.

<b>Matrice dei rischi</b>					
Probabilità	Possibile	4	8	12	16
	Poco Probabile	3	6	9	12
	Molto Poco probabile	2	4	6	8
	Improbabile	1	2	3	4
		Debole	Medio	Forte	Molte forte
		<b>Impatto</b>			
<b>R &lt; 2</b>	Rischio trascurabile / Minore	Nessuna azione è richiesta, i fattori di rischio devono essere oggetto di un monitoraggio specifico attraverso procedure appropriate.			
<b>2 ≤ R ≤ 5</b>	Rischio significativo (ma accettabile a priori)	La costruzione può iniziare, i fattori di rischio devono essere oggetto di monitoraggio specifico attraverso procedure adeguate e il progetto deve essere eventualmente integrato da una serie di misure predefinite che possono essere adattate in fase di esecuzione.			
<b>5 &lt; R ≤ 10</b>	Rischio importante (da monitorare)	La costruzione non può iniziare finché il rischio non viene ridotto o eliminato. Le soluzioni sono possibili senza cambiamenti significativi nel progetto.			
<b>R &gt; 10</b>	Rischio inaccettabile	La costruzione non può iniziare finché il rischio non viene ridotto o eliminato. Se il rischio non può essere controllato, il progetto può essere abbandonato o modificato.			

**Figura 41: Matrice dei rischi e definizione dei livelli di rischio**

### **8.2.2 B) Dati di ingresso del metodo osservazionale**

In questo paragrafo si riporta una lista non esaustiva dei principali parametri di ingresso da considerare per l'analisi con il metodo osservazionale.

- Galleria di derivazione – metodo meccanizzato:
  - monitoraggio dei dati real-time relativi ai parametri di avanzamento della macchina (pressioni di confinamento, densità apparente nella camera di scavo, spinta, coppia, pressioni di iniezioni di intasamento del vuoto anulare, ecc.),
  - osservazione dello smarino e prelievo puntuale di campioni all'uscita della coclea,
  - monitoraggio della concentrazione di gas,
  - applicazione in continuo di sistemi di indagine all'avanzamento di tipo indiretto (geofisico),
  - realizzazione di sondaggi sub-orizzontali all'avanzamento, ove valutato necessario;
- Discenderia – metodo tradizionale:
  - rilievo geologico del fronte di scavo e prelievo di campioni al fronte,
  - monitoraggio della concentrazione di gas,
  - monitoraggio delle convergenze e delle estrusioni del cavo,

- acquisizione dei parametri di perforazione al fronte, se presenti, per mappatura strutturale del mezzo nucleo,
- realizzazioni di sondaggi sub-orizzontali o divergenti all'avanzamento, ove valutato necessario.

**8.2.3 C) Contromisure previste per lo scavo meccanizzato**

In un approccio di gestione del rischio, la scelta di una tecnologia di scavo meccanizzato per opere sotterranee è già di per sé una misura di mitigazione, in quanto le Tunnel Boring Machines (TBM) possono affrontare efficacemente condizioni idrogeologico-geotecniche imprevedute.

Una TBM può essere efficace come metodo di scavo solo se il terreno può essere preventivamente valutato con un livello di affidabilità sufficiente e se il tipo di macchina è scelto, progettato e messo in funzione per affrontare i pericoli specifici del progetto. Un'interpretazione non corretta del comportamento allo scavo del terreno/roccia può comportare decisioni fuorvianti durante la costruzione, con conseguenti perdite in termini di sicurezza e produttività. Al fine di ottenere un'adeguata efficienza nello scavo con TBM, è necessario identificare i pericoli e quantificare i rischi corrispondenti al momento della progettazione della TBM<sup>1</sup>.

i principali rischi identificati per tale progetto sono analizzati e stimati per ogni tratto della galleria di derivazione.

La valutazione dell'impatto ha preso in conto il metodo di scavo scelto (meccanizzato).

Tratto	Sezioni	Terreni rigonfianti			Ammasso roccioso poco competente / Terreni con caratteristiche scadenti			Abrasività			Fronte misto			Gas esplosivi e/o pericolosi			Falda sotterranea confinata			Attraversamento di faglie principali		
		P	I	R = P x I	P	I	R = P x I	P	I	R = P x I	P	I	R = P x I	P	I	R = P x I	P	I	R = P x I	P	I	R = P x I
A	GD1-GD22	3	3	9	4	2	8	4	1	4	3	1	3	2	4	8	3	1	3	3	2	6
B	GD22 – GD69	1	3	3	3	1	3	4	1	4	3	1	3	1	4	4	3	1	3	3	2	6
C	GD69 – GD116	3	3	9	3	1	3	3	1	3	3	1	3	4	4	16	2	1	2	4	2	8
D	GD116 – GD132	2	3	6	3	1	3	2	1	2	2	1	2	2	4	8	1	1	1	4	2	8
E	GD132 – GD160	3	3	9	4	1	4	3	1	3	3	1	3	4	4	16	2	1	2	4	2	8
F	GD160 – GD206	4	3	12	4	1	4	2	1	2	2	1	2	4	4	16	2	1	2	3	2	6
G	GD206 – GD237	3	3	9	2	1	2	4	1	4	2	1	2	2	4	8	3	1	3	3	2	6
H	GD237 – GD293	3	3	9	2	1	2	3	1	3	2	1	2	2	4	8	3	1	3	3	2	6
I	GD293 – GD310	1	3	3	1	1	1	3	1	3	2	1	2	1	4	4	3	1	3	2	2	4

**Figura 42: Analisi dei rischi applicata al progetto attuale**

<sup>1</sup> Giuseppe M. Gaspari, "Investigation methods effectiveness for mechanized tunneling (TBMs)", VII IAGIG

Con riferimento alla figura precedente, risulta evidente che:

- i rischi più critici per il progetto attuale sono principalmente legati alla presenza di terreni rigonfianti e di gas esplosivi e/o pericolosi;
- i rischi meno significativi sono legati allo scavo in situazioni di fronte misto, al caso di attraversamento di falde sotterranee confinate e all'abrasività dei materiali attraversati;
- il rischio legato all'attraversamento di faglie principali, seppur stimato globalmente come importante, deve la sua valutazione ad un'alta probabilità di occorrenza piuttosto che all'impatto vero e proprio sulla struttura e sulla sua realizzazione;
- lo scavo in situazioni di ammasso roccioso poco competente e/o di terreni con caratteristiche scadenti è generalmente valutato accettabile ad eccezione del primo tratto ove, a causa di un impatto valutato medio, esso viene stimato importante. Questa differenza ha voluto prendere in conto il fatto che nel tratto A una parte della galleria di derivazione sarà realizzata con metodo tradizionale.

Per ciascuno dei rischi sopra menzionati alcune contromisure potranno essere applicate semplicemente adattando l'avanzamento della macchina di scavo con lo scopo di ottenere dei rischi residui trascurabili o al massimo accettabili:

1. **Presenza di terreni rigonfianti con rischio di bloccaggio della macchina:** può essere affrontato aumentando la spinta e la coppia e regolando la velocità di rotazione della macchina. Per maggiori dettagli circa le ulteriori misure correttive proposte fare riferimento al §8.2.5;
2. **Presenza di terreni scadenti o rocce molto alterate senza capacità di autosostegno:** richiederà alla macchina di regolare i parametri di avanzamento al fine di ridurre le perdite di volume e le instabilità al fronte;
3. **Presenza di roccia con minerali abrasivi:** essi possono essere scavati pianificando adeguatamente i tassi di consumo per gli strumenti di scavo e l'utilizzo/sostituzione delle frese a disco;
4. **Presenza di condizioni di fronte misto:** richiederà una corretta taratura dei martinetti di spinta per mantenere la precisione di allineamento e l'efficienza della testa di scavo;
5. **Presenza di gas esplosivi e/o pericolosi contenuti nell'ammasso roccioso e/o localizzati in sacche (come metano):** richiederà attrezzature speciali per TBM e lavoratori. Per maggiori dettagli circa le ulteriori misure correttive proposte fare riferimento al §8.2.5;
6. **Scavi sottofalda freatica o comunque in un sistema multifalda,** con conseguente rischio di individuazione di sacche d'acqua localizzate in fratture rocciose o rischio di effetti di disidratazione e consolidamento dei terreni, inducendo cedimenti e dissesti: da contrastare con modalità di scavo chiusa.

**7. Attraversamento di faglie principali:** richiederà un adattamento dei parametri di scavo, la scelta corretta del rivestimento da applicare e, in alcuni casi, dei trattamenti del terreno tramite iniezioni. Per maggiori dettagli circa le ulteriori misure correttive proposte fare riferimento al §8.2.5.

### 8.2.4 Scelta dei metodi di investigazione

Con lo scopo di migliorare il grado di affidabilità della caratterizzazione geotecnica alcuni metodi diretti e indiretti possono essere previsti in fase di scavo. Le figure seguenti mostrano una panoramica dei metodi a disposizione durante la realizzazione dell'opera.

**Tabella 6: Metodi d'investigazione diretti**

Metodi d'investigazione diretti			
Perforazioni	Sondaggi carotati	Sondaggi a distruzione	Mappatura geostrutturale del fronte e/o dei piedritti
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Le perforazioni orizzontali sono eseguite attraverso la testa di taglio della TBM in caso di TBM aperte o attraverso lo scudo negli altri casi. Perforazioni radiali sono possibili in tutti i tipi di TBM.</li> <li>• Gli obiettivi principali sono:               <ul style="list-style-type: none"> <li>• la determinazione della natura litologica del materiale da scavare,</li> <li>• la rilevazione di eventuale presenza d'acqua,</li> <li>• la rilevazione di eventuali vuoti (karst) e/o di zone decomprese.</li> </ul> </li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• I sondaggi orizzontali e/o inclinati con recupero della carota richiedono un tempo di realizzazione non compatibili con l'avanzamento della TBM: <b>in considerazione del contesto geotecnico progettuale sono da prevedere soltanto localmente e con finalità ben precise (calibrazione del sistema e test del sistema).</b></li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Questo metodo è comunemente utilizzato nelle TBM.</li> <li>• La registrazione dei seguenti parametri tramite data-logger deve essere eseguita:               <ul style="list-style-type: none"> <li>• velocità di perforazione,</li> <li>• pressione alla punta di perforazione,</li> <li>• coppia.</li> </ul> </li> <li>• È possibile utilizzare un martello perforatore o una punta triconica. Il diametro della perforazione dovrebbe essere limitato a 75 mm. Le aste di perforazione possono essere in alluminio per non interferire con la testa della TBM nel caso venissero lasciate a perdere nel foro.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• La mappatura deve essere realizzata utilizzando le stesse metodologie adottate nel caso di scavo con metodo tradizionale.</li> <li>• Questo tipo di investigazione può essere realizzato solo quando la TBM arresta lo scavo. Questo fa sì che essa sia realizzata ad intervalli più o meno regolari in funzione dei bisogni costruttivi.</li> </ul>

**Tabella 7: Metodi d'investigazione indiretti**

Metodi d'investigazione indiretti			
Georadar (in foro)	Altri log in foro	Metodi sismici	Metodi geoelettrici
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Georadar</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Gamma Ray (GR) Log: si tratta di un log geofisico di foro che misura la radiazione naturale della roccia emessa sotto forma di raggi gamma.</li> <li>• Neutron log: log geofisico che consiste nel bombardare un ammasso roccioso con neutroni ad alta energia che, una volta dispersi, producono raggi gamma ad alta energia.</li> <li>• Log Geoelettrici</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Tunnel Seismic Prediction (TSP)</li> <li>• Tunnel Seismic Tomography (TST)</li> <li>• Sistema Soft Ground Sonic Probing (SSP)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Bore-Tunnelling Electrical Ahead Monitoring (BEAM)</li> </ul>

Si ricorda che, grazie all'esperienza maturata sulla galleria Pavoncelli bis, realizzata in un contesto simile, si è raggiunto un certo grado di conoscenza dei terreni rigonfianti e dei rischi di bloccaggio associati a situazioni di fermo-macchina.

Per tale ragione, la scelta di realizzare sondaggi diretti non può prescindere da un'analisi multicriteri da realizzarsi in fase di progettazione e da aggiornare durante lo scavo in funzione dei parametri di monitoraggio. Tra i criteri da prendere in considerazione bisognerà, senza dubbio, annoverare almeno:

- il grado di incertezza della zona da investigare,
- i rischi legati ad un fermo-macchina e conseguente scelta della zona più adeguata all'arresto della TBM.

Questo metodo rientra così, a tutti gli effetti, in un approccio di tipo osservazionale.

Dato il contesto generale di cui sopra, lo scavo meccanizzato dovrà prendere sempre più in considerazione l'implementazione di metodologie di esplorazione indiretta al fine di analizzare il comportamento del terreno previsto dietro al fronte di scavo. Queste tecniche di indagine costituiscono un input per gli aggiornamenti progettuali e seguono passo passo l'avanzamento della costruzione, determinando uno scavo della galleria molto più efficiente.

Facendo riferimento al contesto geologico attraversato, ammassi rocciosi fratturati e non particolarmente competenti, un metodo di tipo geoelettrico (BEAM) sarebbe da preferire tra le tecniche d'investigazione indiretta riassunte precedentemente, con lo scopo di reperire informazioni su cavità, venute d'acqua, tipologie di formazioni geologiche attese, contatti tra le formazioni.

Il BEAM è una tecnica di previsione delle formazioni presenti, elettrica non intrusiva, che opera in continuo durante lo scavo del tunnel con TBM. È basato sull'emissione di una debole corrente elettrica alternata, che permette il monitoraggio di un prisma di roccia fino a una profondità massima di circa 3 diametri a monte del fronte. Le componenti principali del sistema di indagine sono:

- l'unità di misura, collocata nella cabina dell'operatore della TBM,

- alcuni utensili di scavo, che sono specialmente adattati per essere utilizzati come elettrodi.

Il sistema BEAM, tramite emissioni di impulsi elettrici, fornisce dati relativamente a due parametri: il valore di resistività dei terreni, misurata in  $\Omega\text{m}$ , ed il valore di polarizzazione indotta (PFE), espressa in percentuale.

Sulla base di questi parametri, un software di valutazione avanzato esegue l'interpretazione e la classificazione geoelettrica-geologica / idrogeologica, permettendo di evidenziare la presenza di zone fortemente fratturate, di cavità e di dare un'indicazione sulla porosità del mezzo.

Dal punto di vista logistico e della produzione, questo sistema risulta vantaggioso rispetto ad altri sistemi geofisici, in quanto non necessita di fermi macchina, utilizza componenti costruttivi estremamente sicuri come gli utensili di scavo e la stessa testa della TBM, necessita di un basso voltaggio non pericoloso per le persone e la macchina, non prevede l'utilizzo di microcariche che sono da evitare in ambienti grisutosi.

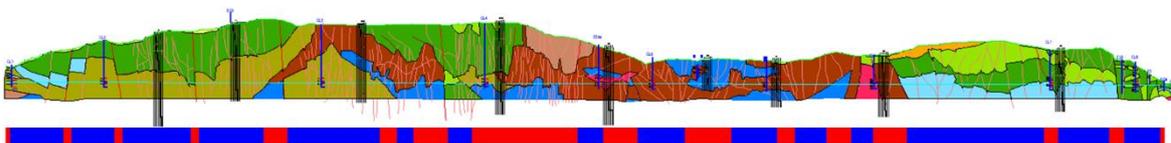
### **8.2.5 Contromisure specifiche adottate**

In virtù del contesto e dell'esperienza acquisita su tale progetto, alcune esigenze specifiche sono individuate ed in particolare:

- un equipaggiamento della TBM con sistemi di indagine all'avanzamento di tipo diretto (aste di perforazione e carotiere) ed indiretto (sistemi di indagine geofisica di tipo BEAM);
- monitoraggio dei parametri di scavo;
- monitoraggio del fronte di scavo tramite tecniche indirette (tipo BEAM);
- la realizzazione di alcuni sondaggi sub-orizzontali a carotaggio continuo:
  - nella parte iniziale dello scavo della galleria di derivazione con lo scopo di:
    - testare il sistema che, visto il diametro ridotto, richiede una riconfigurazione parziale degli equipaggiamenti all'interno dello scudo,
    - calibrare il sistema di indagini indirette (geofisiche) grazie ad

un confronto con prove dirette;

- in corrispondenza dell'intersezione tra la galleria di derivazione e la discenderia laterale;
- la realizzazione di sondaggi sub-orizzontali a distruzione in corrispondenza di singolarità geologiche e qualora le indagini indirette mostrino delle anomalie rilevanti ai fini dello scavo;
- il dimensionamento di due tipologie di rivestimento in conci (anelli normali con armatura corrente ed altri "rinforzati" maggiormente armati); i conci rinforzati, la cui ubicazione sarà opportunamente indicata in profilo, saranno installati in corrispondenza di zone:
  - ove ci si attenda un incremento dei carichi agenti o una dissimmetria di comportamento:
    - attraversamento di faglie principali (indicate in rosso sul profilo geologico),
    - zone di taglio particolarmente estese quale, ad esempio, il tratto F,
    - nelle formazioni in cui si prevede un comportamento rigonfiante differito nel tempo (AV, AV-CPA),



Anello corrente       Anello rinforzato

**Figura 43: Applicazione delle sezioni tipo di rivestimento lungo la galleria di derivazione**

- di intersezione tra le strutture (galleria di derivazione/pozzo piezometrico, galleria di derivazione/discenderia laterale, punto di arrivo della EPB) ove è probabile sopporre un incremento puntuale di carico agente,
- prima e dopo le zone sopra menzionate, per una distanza minima di  $2,5 \cdot D$ . Si suggerisce l'installazione di 10 anelli immediatamente prima e dopo l'inizio delle zone identificate (totale di 20 anelli = 30 m);
- la mappatura geostrutturale del fronte in occasione dei fermi macchina necessari per la manutenzione della testa di scavo e la sostituzione degli

utensili (da effettuarsi preferibilmente nelle formazioni CPA e UFM per evitare problemi legati al rigonfiamento ed a fughe di gas);

Inoltre, nell'attraversamento di zone caratterizzate da terreni particolarmente spingenti, il sistema di profilatura con cui è equipaggiata la testa fresante dovrà consentire un sovrascavo controllato che permetta maggiori convergenze e consenta di ridurre l'attrito sullo scudo. In situazioni particolarmente critiche, per l'avanzamento e/o per un elevato carico sul rivestimento in conci, potrà studiarsi l'impiego di particolari mix design delle malte di riempimento che prevedano la sostituzione dell'inerte ordinario con aggregati leggeri di argilla espansa. Le peculiari caratteristiche di resistenza e deformabilità di questa malta consente di controllare le elevate convergenze che derivano dal comportamento rigonfiante e spingente del terreno nell'intorno dello scavo.

Infine, con riferimento ad eventuali problemi legati a fughe grisutose, come già nel caso della galleria Pavoncelli, anch'essa scavata con TBM di piccolo diametro e in condizioni di attraversamento di formazioni grisutose, la valutazione del rischio gas e le conseguenti misure di sicurezza definite dovranno essere redatte mutuando i principi ed approcci adottati dalle NIR28 e NIR44.

Nello specifico non essendo possibile realizzare una TBM integralmente antideflagrante ne consegue che devono essere adottati tutti quegli accorgimenti contemplati dalla normativa di settore per garantire l'assenza di formazione di miscele esplosive ovvero che l'eventuale insorgenza di miscele gas-ossigeno sia consentita solo in aree prestabilite e monitorate (scarico coclea, tramoggia nastro,...) dove opportuni sistemi di rilevazione unitamente ad un limitato intorno di apparecchiature ATEX (debitamente dimensionato a seguito di verifiche aurealiche), consentano se necessario il tempestivo fermo scavo, l'iperventilazione e la diluizione della miscela, l'eventuale disalimentazione degli impianti di TBM con contestuale ripristino dell'impermeabilità tra marino e galleria così da permettere il drenaggio in sicurezza delle sacche di gas direttamente dalla camera di scavo.

Per i brevi tratti realizzati con metodo tradizionale è possibile fare riferimento alla NIR28 ("Grisou 3<sup>a</sup> edizione" Protocollo N° ASS/PRC/05/1141 del

13/01/2005), che definisce tre classi di rischio (0, 1,2) di cui la 1 suddivisa in tre sottoclassi (1a, 1b, 1c) a probabilità crescente di afflussi significativi di grisù a cui sono correlate misure di sicurezza crescenti.

In considerazione della potenziale presenza di metano riscontrata negli studi specialistici geologici all'ammasso della galleria di derivazione di Campolattaro dovrà essere associata una classe di rischio gas 2.

**Regione Campania – Acqua Campania S.p.a.**  
*UTILIZZO IDROPOTABILE DELLE ACQUE DELL'INVASO DI CAMPOLATTARO  
E POTENZIAMENTO DELL'ALIMENTAZIONE POTABILE PER L'AREA BENEVENTANA  
PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICA ED ECONOMICA*

## **9. CONCLUSIONI**

Nel seguito, per le differenti opere in oggetto, vengono esposte le considerazioni conclusive in relazione a quanto sopra esposto.

Come precedentemente specificato, la presente relazione ha lo scopo di illustrare i caratteri tecnico-descrittivi fornendo una panoramica sulla scelta dei principi generali delle opere oggetto di studio.

Nelle successive fasi del progetto verranno specificati nel dettaglio i criteri progettuali adottati.

### **9.1 GALLERIA DI DERIVAZIONE**

Per le considerazioni sviluppate in precedenza, tenendo conto dei significativi minori tempi di esecuzione, risulta che la realizzazione della galleria di derivazione di Campolattaro con sistema meccanizzato sia la soluzione più vantaggiosa che garantisce, rispetto allo scavo in tradizionale, un risparmio in termini economici per l'Amministrazione e il completamento dell'opera in meno di un terzo del tempo.

Per il raccordo finale con la parte di galleria di derivazione esistente (pk. 0+000.00 – 0+500.00), il collegamento prevede la realizzazione di un pozzo e di un tronchino di galleria in tradizionale che permette il raccordo tra il pozzo esistente e il nuovo pozzo.

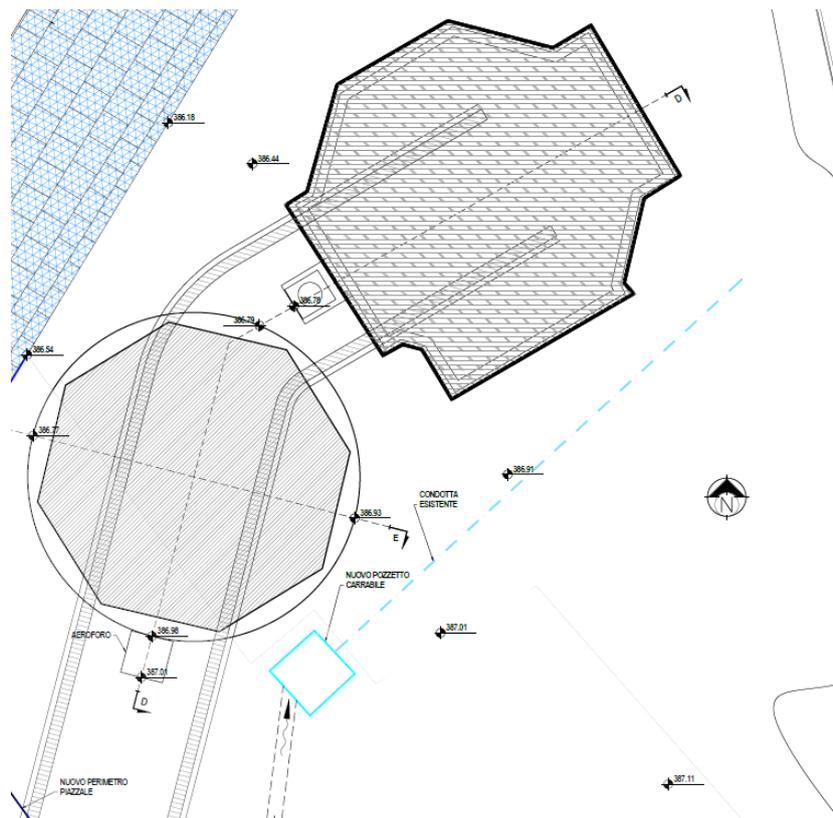


Figura 44: Connessione all'opera di presa.

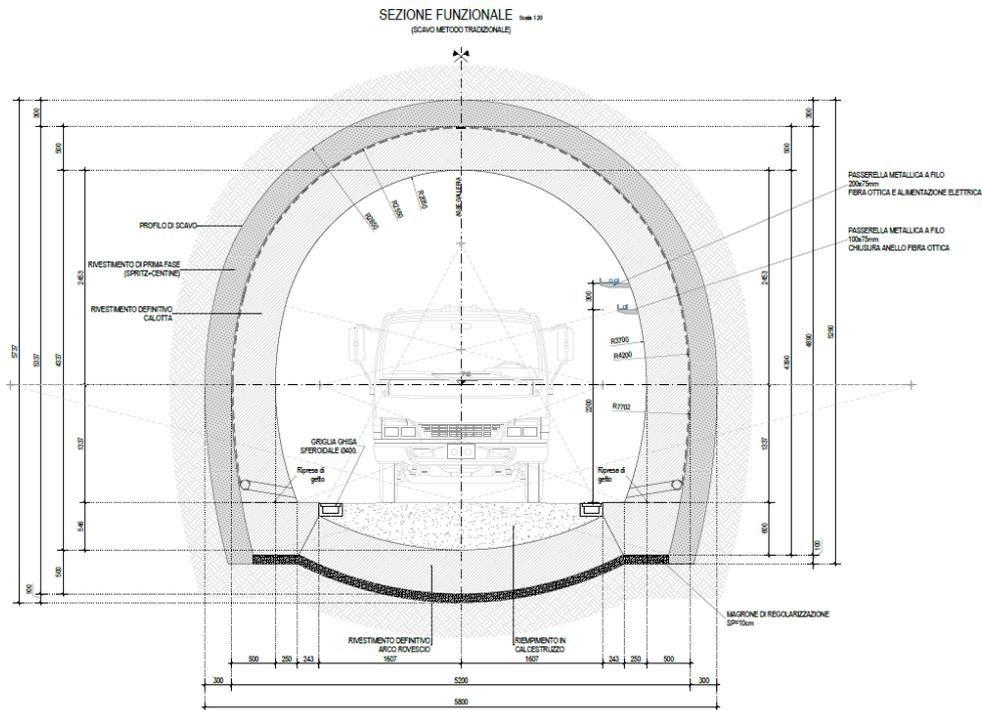
## 9.2 GALLERIA DI ACCESSO LATERALE

Le considerazioni sviluppate per la galleria di derivazione possono essere estese anche alla realizzazione della galleria di accesso laterale. Per tale opera, visto il suo modesto sviluppo (inferiore ai 500 m), l'esecuzione dello scavo mediante sistema in meccanizzato risulterebbe la scelta più svantaggiosa. A tale motivazione si aggiungono problematiche, di natura operativa, relative alla realizzazione della connessione tra due scavi realizzati in meccanizzato.

In questo caso è quindi da preferire la realizzazione di uno scavo mediante metodo in tradizionale.

Per le sezioni tipo di tale opera si fa riferimento alla sezione funzionale seguente:

**Regione Campania – Acqua Campania S.p.a.**  
**UTILIZZO IDROPOTABILE DELLE ACQUE DELL'INVASO DI CAMPOLATTARO**  
**E POTENZIAMENTO DELL'ALIMENTAZIONE POTABILE PER L'AREA BENEVENTANA**  
**PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICA ED ECONOMICA**



**Figura 45: Sezione funzionale della galleria di accesso laterale**

Nella zona di connessione tra la galleria di accesso laterale e la galleria di derivazione è prevista la realizzazione di una camera di collegamento che permetta accesso dei mezzi di manutenzione per la fase di esercizio e che serva da via di fuga in situazioni di emergenza. Per questa zona si dovrà prevedere l'esecuzione di un consolidamento massivo data la criticità dovuta all'interazione tra gli scavi.

## **BIBLIOGRAFIA**

- [1] Barton, N. 2002. TBM tunnelling in jointed and faulted rock. A.A. Balkema, Rotterdam. ISBN 90 5809 341 7
- [2] Barton, N. 2012. Reducing risk in long deep tunnels by using TBM and Drill and Blast methods in the same project-the hybrid solution. *Journal of Rock mechanics and Geotechnical Engineering*. 2012, 4 (2): 115–126.
- [3] Barton, N. 2013. Hybrid TBM and Drill-and-Blast from the start. *Tunnelling Journal*, December 2012/January 2013.
- [4] Bauer, F.; Hödl, K.J.; Lemmerer, J.; Obermeier, O. & Zwitnig, G. 2011. Widening of the Westbahn line to four tracks: Experience in the selection of the tunnelling method. *Geomechanics and Tunnelling*, August 2011, No 4, 285–294.
- [5] Blindheim, O. T.; Johansen, E. D. & Hegrenæs, A. 1998. Bored Road Tunnels in hard rock. Publication NO.11, Norwegian Tunnelling Society.
- [6] Bruland, A. 1998. Hard Rock Tunnel Boring. PhD Thesis. The Norwegian University of Science and Technology (NTNU). Trondheim, Norway.
- [7] Bruland, A. 2010. Pre-investigations and prediction for TBM tunnels-the NTNU model. Seminar: TBM Applications, 2010. Norwegian Tunnelling Society, Bergen, Norway.
- [8] Hansen, A.M. 2008. TBM vs D&B – Pros and Cons, AMH Consult AS. Personal communication.
- [9] Kaiser, P.K. & McCreath, D.R. 1994. Rock Mechanics Considerations for Drilled or Bored Excavations in Hard Rock. *Tunnelling and Underground Space technology*, 1994, Vol.9 No.4, pp 425–437.
- [10] Ehrbar, H. 2008. Gothard Base Tunnel, Switzerland. Experiences with different tunnelling methods. 2 Congresso Brasileiro de Tuneis e Estruturas Subterraneas.
- [11] Ehrbar, H.; Beeler, P.; Neuenschwander, M. & Bianchi, M. 2008. Tough decisions for mega-projects. A methodology for decision making on time-relevant measures at the Gothard Base Tunnel. WTC (ITA/AITES) Vancouver, Canada (2010).

- [12] Ehrbar, H.; Sala, A. & Wick, R. 2012. Drives in the Gothard BaseTunnel –A review. Findings and lessons learned from the client's viewpoint. Swiss Tunnel Congress (2012).
- [13] Eskesen, S. D.; Tenborg, P.; Kampmann, J. & Veicherts, T.H. 2004. Guidelines for tunnelling risk management: International Tunnelling Association, Working Group No. 2 (ITA/AITES). Tunnelling and Underground Space technology, 2004, Vol.19 pp 217–237.
- [14] Gütter, W.; Jäger, M.; Rudigier, G. & Weber, W. 2011. TBM versus NATM from the contractor's point of view. Geomechanics and Tunnelling, August 2011, vol. 4, 327–336.
- [15] Holen, H. 1998. TBM vs Drill & Blast Tunnelling. Publication NO.11, Norwegian Tunnelling Society.
- [16] Jodl, H.G. & Resch, D. 2011. NATM and TBM – comparison with regard to construction operation. Geomechanics and Tunnelling, vol. 4, August 2011, No 4, 337–345.
- [17] Lieb, R.H. & Ehrbar, H. 2011. Gothard Base Tunnel. Risk Management of the World's Longest Railway Tunnel: Lessons learnt. W T C (ITA/AITES) Helsinki, Finland (2011).
- [18] Lislrud, A. 1988. Hard Rock Tunnel Boring: Prognosis and Costs. Tunnelling and Underground Space technology, 1988, Vol.3 No.1, pp 9–17.
- [19] Maidl, B.; Schmid, L.; Ritz, W. & Herrenknecht, M. 2008. Hard Rock Tunnel Boring machines. Ernst & Sohn.
- [20] Moritz, B.; Wagner, H.; Mussger, K.; Handke, D. & Harer G 2011. Criteria for the selection of tunnelling method through the example of the KoralmTunnel. Geomechanics and Tunnelling, vol. 4, August 2011, No 4, 305–316.
- [21] Myrvang, A.; Blindheim, O.T. & Johansen, E. D. 1998. Rock stress problems in bored tunnels. Publication NO.11, Norwegian Tunnelling Society.

- [22] Nicholas, P. 2006. Micro tunnelling – Methods and Development. International Conference and Exhibition on Tunnelling and Trenchless Technology, Malaysia (2006).
- [23] Nord, G. & Stille, H. 1988. Bore and Blast Techniques in Different Types of rock: Sweden's Experience. Tunnelling and Underground Space technology, 1988, Vol.3, pp 45–50
- [24] Nord, G. 2006. TBM versus Drill and Blast, the choice of tunnelling method. International Conference and Exhibition on Tunnelling and Trenchless Technology, Subang, Selangor, Malaysia.
- [25] Spiegl, M.; Sander, P.; Pellar, A.; Maidl, U.; Herdina, J. & Feistmantl, K. 2011. The conclusions of risk analysis as a basis for deciding between variants through the example of Contract H8. Geomechanics and Tunnelling, vol. 4, August 2011, No 4, 295–304.
- [26] Stewart, P.; Ramezanzadeh, A. & Knights, P. 2006. Benchmark Drill and Blast and Mechanical Excavation Advance Rates for Underground Hard-Rock Mine Development. Australian Mining Technology Conference: 41–63.
- [27] Tarkoy, P.J. 1995. Comparing TBMs with drill+blast excavation. Tunnels & tunnelling. October 1995.
- [28] Tarkoy, P. & Byram, J.E. 1991. The advantages of tunnel boring: a qualitative/quantitative comparison of D&B and TBM excavation. Hong Kong Engineering, 1991.
- [29] Thuro, K. & Plinninger, R.J. 2003. Hard Rock tunnel boring, cutting, drilling and blasting rock parameters for excavability. ISRM2003-Technology roadmap for rock mechanics, South African Institute of Mining and Metallurgy.
- [30] Thomas A.H. et al. 2007. Risk Management of the construction of tunnels using Tunnel Boring Machines (TBMs). Underground Space – the 4th Dimension of Metropolises.