

**NOUVELLE LIGNE LYON TURIN – NUOVA LINEA TORINO LIONE  
PARTIE COMMUNE FRANCO-ITALIENNE – PARTE COMUNE ITALO-FRANCESE**

**PARTE IN TERRITORIO ITALIANO – PROGETTO IN VARIANTE  
(OTTEMPERANZA ALLA PRESCRIZIONE N. 235 DELLA DELIBERA CIPE 19/2015)**

**CUP C11J05000030001 – PROGETTO DEFINITIVO**

**GENIE CIVIL – OPERE CIVILI**

**METHODES DE CONSTRUCTION EN SOUTERRAIN – METODOLOGIA COSTRUTTIVA IN  
SOTTERRANEO**

**TUNNEL DE BASE - COTE ITALIE – TUNNEL DI BASE - LATO ITALIA**

**RAPPORT DESCRIPTIF SUR LES METHODES DE CREUSEMENT DES TUNNELS ET DES OUVRAGES  
CONNEXES – RELAZIONE ILLUSTRATIVA SUI METODI DI SCAVO DELLE GALLERIE E DELLE OPERE  
CONNESSE**

Indice	Date/ Data	Modifications / Modifiche	Etabli par / Concepito da	Vérfié par / Controllato da	Autorisé par / Autorizzato da
0	30/11/2012	Première diffusion / Prima emissione	M. JANUTOLO (BG) C. SALOT (BG)	M. RUSSO C. OGNIBENE	L. CHANTRON M. PANTALEO
A	08/02/2013	Révision suite aux commentaires LTF / Revisione a seguito commenti LTF	M. JANUTOLO (BG) C. SALOT (BG) E. GARIN (BG)	M. RUSSO C. OGNIBENE	L. CHANTRON M. PANTALEO
B	15/11/2016	Première émission PRV – révision générale / Prima emissione PRV – revisione generale	M. JANUTOLO (BG) C. SALOT (BG)	F. MAGNORFI C. OGNIBENE	L. CHANTRON A. MORDASINI
C	31/01/2017	Révision suite aux commentaires TELT et passage au statut AP / Revisione a seguito commenti TELT e passaggio allo stato AP	M. JANUTOLO (BG) C. SALOT (BG)	MAGNORFI C. OGNIBENE	L. CHANTRON A. MORDASINI
D	22/03/2017	Révision suite aux commentaires TELT / Revisione a seguito commenti TELT	M. JANUTOLO (BG) C. SALOT (BG)	F. MAGNORFI C. OGNIBENE	L. CHANTRON A. MORDASINI

CODE DOC	<b>P</b>	<b>R</b>	<b>V</b>	<b>C</b>	<b>3</b>	<b>A</b>	<b>T</b>	<b>S</b>	<b>3</b>	<b>0</b>	<b>8</b>	<b>8</b>	<b>0</b>	<b>D</b>
	Phase / Fase			Sigle étude / Sigla			Émetteur / Emittente			Numero			Indice	

<b>A</b>	<b>P</b>	<b>N</b>	<b>O</b>	<b>T</b>
Statut / Stato		Type / Tipo		

ADRESSE GED INDIRIZZO GED	<b>C3A</b>	<b>//</b>	<b>//</b>	<b>33</b>	<b>02</b>	<b>02</b>	<b>10</b>	<b>01</b>
------------------------------	------------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------

<b>ECHELLE / SCALA</b>
-



TELT sas – Savoie Technolac - Bâtiment "Homère"  
13 allée du Lac de Constance – 73370 LE BOURGET DU LAC (France)  
Tél. : +33 (0)4.79.68.56.50 – Fax : +33 (0)4.79.68.56.75  
RCS Chambéry 439 556 952 – TVA FR 03439556952  
Propriété TELT Tous droits réservés – Proprietà TELT Tutti i diritti riservati

Ce projet  
est cofinancé par  
l'Union européenne  
(DG-TREN)



Questo progetto  
è cofinanziato  
dall'Unione europea  
(TEN-T)

## SOMMAIRE / INDICE

1. INTRODUZIONE .....	7
1.1 Generalità.....	7
1.2 Modifiche rispetto al Progetto Definitivo Approvato.....	7
2. DOCUMENTI DI RIFERIMENTO .....	8
2.1 Quadro normativo di riferimento.....	8
2.2 Documenti di progetto .....	8
3. CRITERI DI SVILUPPO DELLA PROGETTAZIONE .....	9
4. SCAVO MECCANIZZATO .....	10
4.1 Classificazione delle macchine per tunnelling .....	10
4.2 Criteri di selezione e fattibilità dello scavo meccanizzato.....	13
4.2.1 Considerazioni sul Tunnel di Interconnessione .....	13
4.2.2 Considerazioni sulle gallerie della Maddalena .....	14
4.2.3 Considerazioni sul Tunnel di Base lato Italia .....	15
4.3 Le TBM potenzialmente utilizzabili per il Tunnel di Base lato Italia .....	23
4.4 Fasi realizzative delle gallerie scavate con TBM .....	23
4.4.1 Costruzione con TBM aperte .....	23
4.4.2 Costruzione con TBM scudate.....	25
4.5 Vibrazioni indotte dallo scavo con TBM.....	25
5. SCAVO CON METODI TRADIZIONALI .....	28
5.1 Avanzamenti in condizioni normali.....	28
5.2 Le problematiche dell'abbattimento .....	29
5.2.1 Abbattimento con esplosivi.....	29
5.2.2 Abbattimento con martello demolitore idraulico .....	33
5.2.3 Abbattimento mediante fresa puntuale .....	36
6. ROCCE VERDI, RADIOATTIVITÀ E GAS RADON.....	37
6.1 Avanzamenti in condizioni particolari: rocce verdi.....	37
6.2 Avanzamenti in condizioni particolari: Uranio .....	38
6.3 Avanzamenti in condizioni particolari: Gas radon .....	38
7. LE METODOLOGIE PREVISTE (SOLUZIONE DI PROGETTO) .....	39
7.1 Aspetti generali .....	39
7.2 Tunnel di Base lato Italia (gallerie di linea inclusi cameroni all'imbocco) .....	40
7.2.1 Metodi di scavo e tipologie di TBM più adatte lungo la tratta .....	40
7.2.2 Metodologie adottate .....	41
7.3 Rami e locali tecnici del Tunnel di Base .....	43
7.4 Tunnel di Interconnessione (gallerie di linea compresi cameroni e rami).....	44
7.5 Gallerie di connessione.....	44
7.6 Galleria Maddalena 2.....	45
7.7 Area di sicurezza di Clarea .....	45
ALLEGATO 1: TABELLA DI CORRELAZIONE TRA INDAGINI/PROVE, PARAMETRI OTTENIBILI E SCAVO MECCANIZZATO IN ROCCE/TERRENI.....	46

ALLEGATO 2: DESCRIZIONE DELLE PRINCIPALI CARATTERISTICHE DELLE TBM POTENZIALMENTE UTILIZZABILI PER LA REALIZZAZIONE DEL TUNNEL DI BASE.....	49
ALLEGATO 3: ATTREZZATURE, MATERIALI E MEZZI NECESSARI PER LA REALIZZAZIONE DELLE GALLERIE DI LINEA CON METODOLOGIE MECCANIZZATE (TBM).....	52

## LISTE DES FIGURES / INDICE DELLE FIGURE

Figura 1: Comportamento allo scavo con TBM di un ammasso roccioso e posizionamento dei supporti.....	22
Figura 2: Vibrazioni rilevate a distanza dallo scavo nel Tunnel di Murgental (Wittke, 2007)	26
Figura 3: Limiti ammissibili per danni ad edifici (USBM) (soglia d'allerta e di danno) .....	27
Figura 4: percettibilità della vibrazione secondo entità e durata di fenomeni vibratorii (Dowding, 1985) .....	28
Figura 5: Esempio applicato di legge di sito: curve velocità massima di vibrazione (P.P.V) – distanza al variare della quantità di carica per foro.....	32
Figura 6: Vibrazioni tipiche indotte da scavo con martello demolitore (A. Fabbri 2007).....	35
Figura 7: Vibrazioni misurate dallo scavo con martellone in funzione della distanza (Dantini 2002).....	35

## LISTE DES TABLEAUX / INDICE DELLE TABELLE

<b>Tabella 1: Schema classificativo delle “Tunnelling Machines” adottato dall’AFTES.....</b>	<b>12</b>
<b>Tabella 2: Schema classificativo delle “Tunnelling Machines” adottato dalla SIG.....</b>	<b>13</b>
<b>Tabella 3: Influenza delle caratteristiche generali del Tunnel di Base per la tratta lato Italia sulla scelta del metodo di scavo.....</b>	<b>17</b>
<b>Tabella 4: Forme e dimensioni delle sezioni di scavo realizzate dalle TBMs .....</b>	<b>18</b>
<b>Tabella 5: Principali fattori geologici e loro influenza sullo scavo meccanizzato .....</b>	<b>20</b>
<b>Tabella 6: Campi di applicazione delle TBM in funzione delle caratteristiche litologiche degli ammassi da scavare.....</b>	<b>20</b>
<b>Tabella 7: Coefficiente Ca in funzione delle diverse condizioni di efficienza in galleria.</b>	<b>37</b>
<b>Tabella 8: Coefficiente Cb in funzione delle diverse condizioni di disponibilità in galleria .....</b>	<b>37</b>
<b>Tabella 9: Sintesi delle metodologie di scavo per la tratta da Modane a Susa .....</b>	<b>43</b>
<b>Tabella 10: Sintesi delle metodologie di scavo per la galleria Maddalena 2.....</b>	<b>45</b>
<b>Tabella 11: Correlazione tra indagini/prove, parametri ottenibili e scavo meccanizzato in roccia .....</b>	<b>47</b>
<b>Tabella 12: Correlazione tra indagini/prove, parametri ottenibili e scavo meccanizzato in terreni coesivi e/o granulari .....</b>	<b>48</b>
<b>Tabella 13: Elenco dei mezzi di cantiere necessari per ciascuna lavorazione - Avanzamento con Tunnel Boring Machine (TBM) - TBM aperta - TS1-TS2-TS3 .....</b>	<b>52</b>
<b>Tabella 14: Elenco dei mezzi di cantiere necessari per ciascuna lavorazione - Avanzamento con Tunnel Boring Machine (TBM) - TBM aperta – TS4-TS5 .....</b>	<b>53</b>
<b>Tabella 15: Elenco dei mezzi di cantiere necessari per ciascuna lavorazione - Avanzamento con Tunnel Boring Machine (TBM) – TBM scudata .....</b>	<b>54</b>



## RESUME / RIASSUNTO

Le présent rapport décrit les méthodes de construction prévues pour la réalisation du Tunnel de Base et des autres ouvrages (Maddalena 2, connexion 1, connexion 2, rameaux, Tunnel d'Interconnexion -TdI) sur le tronçon en territoire italien, compris entre le portail Est (à Susa) et la frontière entre états.

Les critères de référence qui ont été utilisés dans la définition des possibles méthodes de réalisation des ouvrages en souterrain sont :

- sécurité pour la main d'œuvre préposée aux travaux et pour les ouvrages à réaliser;
- minimisation des impacts environnementaux découlant de la construction;
- minimisation des temps et des coûts de construction;
- adéquation des coûts des installations par rapport aux dimensions des ouvrages à réaliser.

Ces critères conduisent essentiellement à prévoir l'adoption de méthodes d'excavation mécanisées pour une grande partie du Tunnel de Base et de la galerie de Maddalena 2, alors que des méthodologies "traditionnelles" sont prévues pour le Tunnel d'Interconnexion, pour les galeries de connexion 1 et 2, pour le site de sécurité de Clarea, pour les rameaux et pour de courts tronçons de Maddalena 2 et du Tunnel de Base. Les raisons principales de l'adoption de la méthode de creusement traditionnelle sont dues à leur longueur limitée et/ou aux fréquents changements de section.

Les critères généraux de sélection et de conception des différents types de machines sont exposés en fonction des éléments suivants :

- caractéristiques d'ensemble des ouvrages en souterrain;
- caractéristiques géologiques des

Nella presente relazione si illustrano i metodi di costruzione previsti per la realizzazione del Tunnel di Base (TdB) e delle altre opere (Maddalena 2, connessione 1, connessione 2, rami, Tunnel di Interconnessione -TdI) nella tratta in territorio italiano compresa tra l'imbocco Est (a Susa) al confine di stato.

I criteri di riferimento che sono stati utilizzati nella definizione dei potenziali metodi di realizzazione delle opere in sotterraneo sono:

- sicurezza per le maestranze addette ai lavori e per le opere da realizzare;
- minimizzazione degli impatti ambientali derivanti dalla costruzione;
- minimizzazione dei tempi e dei costi di costruzione;
- adeguatezza dei costi delle attrezzature alle dimensioni delle opere da realizzare.

Sostanzialmente questi criteri portano a prevedere l'adozione di metodologie di scavo meccanizzate per estese tratte del Tunnel di Base e della galleria Maddalena 2, mentre saranno previste metodologie tradizionali per il Tunnel di Interconnessione, per le gallerie di connessione 1 e 2, per l'area di sicurezza di Clarea, per i rami e per porzioni limitate di Maddalena 2 e del Tunnel di Base. Le ragioni principali dell'adozione del metodo di scavo tradizionale sono dovute alla lunghezza limitata e/o ai frequenti cambi di sezione.

Vengono esposti i criteri generali di selezione e progettazione delle differenti tipologie di macchine in funzione delle:

- caratteristiche complessive delle opere in sotterraneo;
- caratteristiche geologiche degli ammassi;
- caratterizzazione geotecnica e,
- previsione del comportamento allo scavo.

L'estensione delle opere in sotterraneo

massifs rocheux;

- caractérisation géotechnique,
- prévision du comportement à l'excavation.

L'extension des ouvrages en souterrain comporte une grande variété de terrains et de comportements à l'excavation tout au long du tracé. Par conséquent, les types de tunneliers potentiellement adoptables sont multiples :

- Tunneliers à appui radial (Gripper TBMs);
- Boucliers mécanisés à appui longitudinal (Single shield TBMs);
- Boucliers mécanisés à appui mixte (Double shield TBMs);
- Boucliers fermés mixtes: confinement de boue ou de terre – absence de confinement (Combined shield: slurry or EPB – single shield TBM).

Du point de vue de la réalisation, les parties de tunnel creusées à l'aide de tunneliers se différencient essentiellement en fonction de l'utilisation de tunneliers n'assurant pas de soutènement immédiat (à appui radial) ou assurant un soutènement (boucliers mécanisés).

En ce qui concerne les tunnels principaux, aussi bien dans le cas d'un avancement avec tunnelier à appui radial qu'avec avancement par la méthode traditionnelle, différents profils types d'excavation et de revêtements ont été considérés, en fonction du comportement lors de l'excavation et des déformations attendues.

comporta una grande variabilità litologica e di comportamento allo scavo lungo il tracciato, conseguentemente anche le tipologie di TBM che si ritengono potenzialmente adottabili sono molteplici:

- TBM aperte (Gripper TBMs);
- TBM monoscudo (Single shield TBMs);
- TBM a doppio scudo (Double shield TBMs);
- Scudi chiusi combinati: contropressione di fango o di terra – assenza di contropressione (Combined shield: slurry or EPB – single shield TBM).

Dal punto di vista realizzativo le tratte di tunnel scavate con TBM sostanzialmente si differenziano in funzione dell'utilizzo di TBM non scudate (aperte) o scudate.

Per quanto riguarda le gallerie di linea, sia nel caso di avanzamento con TBM aperte che nel caso di avanzamenti in tradizionale sono state considerate diverse sezioni tipo di scavo e rivestimento, progettualmente determinate in funzione del comportamento allo scavo e delle fenomenologie deformative attese.

## 1. Introduzione

### 1.1 Generalità

Scopo della presente relazione è quello di illustrare le differenti metodologie costruttive applicabili alle opere in sotterraneo che dovranno essere realizzate nell'ambito della sezione transfrontaliera del nuovo collegamento ferroviario ad Alta Capacità Torino – Lione per la parte lato Italia, in particolare:

- Area di sicurezza di Clarea;
- TdB tratta lato Italia: tunnel a due canne con rami di collegamento ogni 333 m massimo tra la pk 48+677 e la pk 61+076.5 (esclusa l'area di sicurezza di Clarea, compresi i cameroni all'imbocco);
- Tunnel di Interconnessione: tunnel a due canne di lunghezza 1740 m per il BD e 1950 m per il BP e relativi rami di collegamento tra le canne e cameroni;
- Galleria di Maddalena 2;
- Galleria di connessione 1;
- Galleria di connessione 2.

In particolare nella presente si riportano gli aspetti generali relativi alla costruzione, si rimanda pertanto il lettore ai documenti relativi a ciascuna opera per gli aspetti specifici.

### 1.2 Modifiche rispetto al Progetto Definitivo Approvato

Le variazioni del PRV rispetto al PD sono molteplici e sono sintetizzate nel seguito:

- Variazione dei fronti di attacco: la variante progettuale a seguito della prescrizione n. 235 in fase di approvazione del Progetto Definitivo da parte del CIPE porta a concentrare i cantieri alla Maddalena di Chiomonte anziché a Susa. Quindi tutti gli attacchi per lo scavo sul lato Italia avverranno dalla Maddalena o da Modane invece che da Susa. Questo porta a rivedere le tratte di applicazione dei vari metodi di scavo lungo il TdB.
- Nuove gallerie: si aggiungono le gallerie di connessione 1 e 2 e la galleria Maddalena 2, mentre si elimina la galleria di ventilazione di Val Clarea. Questo porta a definire ex novo i metodi di scavo per queste tre gallerie. La galleria Maddalena 2 viene posta in continuità con il TdB in modo da essere scavata con la stessa fresa mista scudata prevista in PD, mentre le gallerie di connessione 1 e 2, di lunghezza pari a circa 1 km, vengono scavate in tradizionale.
- Gestione rocce verdi: il tema della gestione delle rocce verdi, che in PD veniva trattato in questa relazione, viene ora trattato nella relazione specifica PRV\_C3A\_7610\_33-02-02\_-10-07 Gestione delle rocce verdi, in modo da avere più respiro per la trattazione. Peraltro la metodologia del loro stoccaggio è diversa.
- Ritorno di esperienza geologico/idrogeologico/geomeccanico del cunicolo della Maddalena: si è considerata l'esperienza dello scavo del cunicolo esplorativo della Maddalena.
- Scavo delle rocce verdi con TBM: si prevede di estendere l'uso della fresa mista scudata per la sezione corrente nelle rocce verdi, in modo da arrivare fino all'imbocco Est. I cameroni verranno poi alesati mediante Martello Demolitore Idraulico.

## 2. Documenti di riferimento

### 2.1 Quadro normativo di riferimento

Il quadro normativo di riferimento è trattato nell'allegato 4.1 del Dossier Preliminare della Sicurezza (documento PRF\_C1\_0003\_00-00-00\_10-03).

### 2.2 Documenti di progetto

I documenti di riferimento per questa relazione sono:

- PRV\_C3A\_0435\_26-19-00 Relazione generale illustrativa
- PRV\_C3A\_3949\_26-19-00 Relazione tecnica e di calcolo
- PRV\_C3A\_3950\_26-19-00 Relazione di calcolo del rivestimento con conci prefabbricati
- PRV\_C3A\_3951\_26-19-00 Profilo longitudinale geologico-geomeccanico con applicazione delle sezioni tipo - 1/2
- PRV\_C3A\_3948\_26-19-00 Profilo longitudinale geologico-geomeccanico con applicazione delle sezioni tipo - 2/2
- PRV\_C3A\_1200\_26-90-10 Relazione illustrativa
- PRV\_C3A\_0896\_32-02-02 Scavo meccanizzato con fresa
- PD2\_C3A\_0895\_32-02-05 Metodologia costruttiva in sotterraneo – TdI- relazione tecnica
- PD2\_C3A\_6557\_33-02-00 Tunnel di Base – Avanzamento con metodo D&B (sezioni tipo S1, S2, S3a) – Schema delle fasi esecutive (tavola 1 di 4)
- PD2\_C3A\_6558\_33-02-00 Tunnel di Base – Avanzamento con metodo D&B (sezioni tipo S3b, S4) – Schema delle fasi esecutive (tavola 2 di 4)
- PD2\_C3A\_6559\_33-02-00 Tunnel di Base – Avanzamento con metodo D&B (sezioni tipo S5a, S5b, S6, S7, S8) – Schema delle fasi esecutive (tavola 3 di 4)
- PD2\_C3A\_6560\_33-02-00 Tunnel di Base – Avanzamento con metodo D&B (scavi a mezza sezione) – Schema delle fasi esecutive (tavola 4 di 4)
- PD2\_C3A\_6561\_33-02-00 Sezioni tipo descrittiva con impianti in rettilineo – scavo tradizionale
- PD2\_C3A\_6570\_33-02-00 Tunnel di base - Avanzamento D&B – schema sinottico esecutivo
- PRV\_C3A\_6010\_33-01-02 Relazione generale illustrativa lato Italia
- PRV\_C3A\_3820\_26-48-20 Relazione tecnica descrittiva
- PRV\_C3A\_7540\_26-48-21 Relazione tecnica descrittiva
- PRV\_CSP\_SIG\_0012 Piano di sicurezza e coordinamento – parte generale
- PRV\_CSP\_SIG\_0050 PSC – indicazioni specifiche gallerie interconnessione – lotto 01
- PRV\_CSP\_SIG\_0051 PSC indicazioni specifiche smontaggio TBM in arrivo da Modane



- PRV\_CSP\_SIG\_0053 PSC – indicazioni specifiche galleria Maddalena – Susa (imbocco Est) e area di sicurezza Clarea – lotto 03 e 04
- PRV\_CSP\_SIG\_0060 Cronoprogramma – interferenze di fase gallerie interconnessione
- PRV\_CSP\_SIG\_0061 Cronoprogramma lavori – interferenze di fase – smontaggio TBM
- PRV\_CSP\_SIG\_0063 Cronoprogramma – interferenze di fase – gallerie Maddalena-Susa (imbocco Est) – area di sicurezza Clarea
- PRV\_CSP\_SIG\_0064 Cronoprogramma – interferenze di fase – area sicurezza Clarea
- PRV\_CSP\_SIG\_0016 Fascicolo tecnico dell'opera
- PRV\_CSP\_SIG\_0249 Planimetria cantiere in sotterraneo: area sicurezza Clarea
- PRV\_CSP\_SIG\_0248 Schema sicurezza cantiere in sotterraneo gallerie Maddalena e Tunnel di Base
- PRV\_CSP\_SIG\_0249 Schema organizzazione gestione delle emergenze - gallerie di interconnessione
- PRV\_CSP\_SIG\_0252 Schema organizzazione gestione delle emergenze - area di sicurezza Clarea
- PRV\_CSP\_SIG\_0253 Schema organizzazione gestione delle emergenze in sotterraneo – Gallerie Maddalena e Tunnel di Base.

Si vedano poi gli elaborati specifici connessi ad ogni relazione citata.

Inoltre, per quanto riguarda la sicurezza e salute dei lavoratori, si fa riferimento al documento seguente: “Indirizzi operativi comuni per la costruzione in sicurezza del megatunnel sulla linea ferroviaria – Torino-Lione – tratta internazionale”.

### 3. Criteri di sviluppo della progettazione

I criteri di riferimento che sono stati utilizzati nella definizione dei potenziali metodi di realizzazione delle opere in sotterraneo oggetto della presente relazione sono:

- sicurezza per le maestranze addette ai lavori e per le opere da realizzare;
- minimizzazione degli impatti ambientali derivanti dalla costruzione;
- minimizzazione dei tempi e dei costi di costruzione;
- adeguatezza dei costi delle attrezzature alle dimensioni delle opere da realizzare.

In generale lo sviluppo delle costruzioni di gallerie a foro cieco è caratterizzato dalla accentuata tendenza verso lo scavo meccanizzato sia in roccia sia in terreno coesivo o incoerente, ed in particolare nel caso di gallerie con sviluppo notevole. Anche nel caso in esame, adottando i criteri sopra esposti, risulta più che evidente la possibilità/necessità di massimizzare le parti di opere da realizzarsi con metodologie meccanizzate.

Il continuo miglioramento delle tecnologie ha portato ad un notevole sviluppo del campo di applicazione delle macchine per il tunnelling, e ad un incremento della loro produttività.

Oggi sono ormai disponibili macchine capaci di affrontare formazioni anche molto eterogenee con alternanze di roccia e terreno coesivo e/o incoerente. La suddivisione netta in due categorie di macchine, macchine per roccia e per terreno, fondata sulla storia del loro sviluppo

e sulle specifiche tecniche di abbattimento, sta perdendo il suo originario significato; entrambe stanno infatti evolvendo l'una nel campo di applicazione dell'altra e viceversa.

I vantaggi dei metodi di scavo meccanizzato rispetto a quelli tradizionali sono molteplici: maggiori condizioni di sicurezza per i lavoratori, industrializzazione del processo con conseguenti riduzioni di costi e tempi di realizzazione, maggiori garanzie sulla qualità del lavoro svolto.

Per contro la scelta di uno specifico metodo meccanizzato è spesso irreversibile con significative conseguenze in termini di maggiori tempi e costi qualora ci si trovasse nella necessità di cambiare metodologia.

Pertanto la scelta del metodo di scavo meccanizzato più adatto richiede la conoscenza di un elevato numero di parametri che comprendono le caratteristiche generali del progetto, le caratteristiche geologico-geotecniche e le caratteristiche delle macchine.

## **4. Scavo meccanizzato**

### **4.1 Classificazione delle macchine per tunnelling**

Nell'ambito della comunità tecnico-scientifica internazionale non si è ancora raggiunta una unitarietà di definizioni e di classificazione per le Tunneling Machines (TMs, macchine per la realizzazione di gallerie con testa di scavo a sezione piena oppure parziale).

L'Association Française des Travaux en Souterrain (AFTES) ha adottato una classificazione basata sulla tipologia di supporto allo scavo che la macchina è in grado di fornire; si distinguono: le TMs che non contrastano né il fronte né la cavità di scavo (macchine aperte); le TMs che contrastano la cavità di scavo (macchine scudate); e le TMs che contrastano sia la cavità che il fronte di scavo (macchine scudate a contropressione) (si veda la Tabella 1).

La Società Italiana Gallerie (SIG) ha previsto una classificazione che prevede la suddivisione delle TMs sia sulla base della tipologia di supporto allo scavo che sono in grado di fornire, sia sulla base del terreno entro cui possono operare. Come nelle classificazioni AFTES e ITA, in questo schema il termine TBM è riservato a tutte le macchine che hanno la testa di scavo rotante a piena sezione (si veda la Tabella 2).

Il gruppo di lavoro internazionale (WG14) dell' International Tunneling Association (ITA – AITES) ha predisposto un rapporto (Guideline for TBM selection) che comprende i vari schemi classificativi derivanti da quanto adottato da differenti Associazioni Nazionali Gallerie che pertanto sono da considerarsi validati dall'ITA medesima.



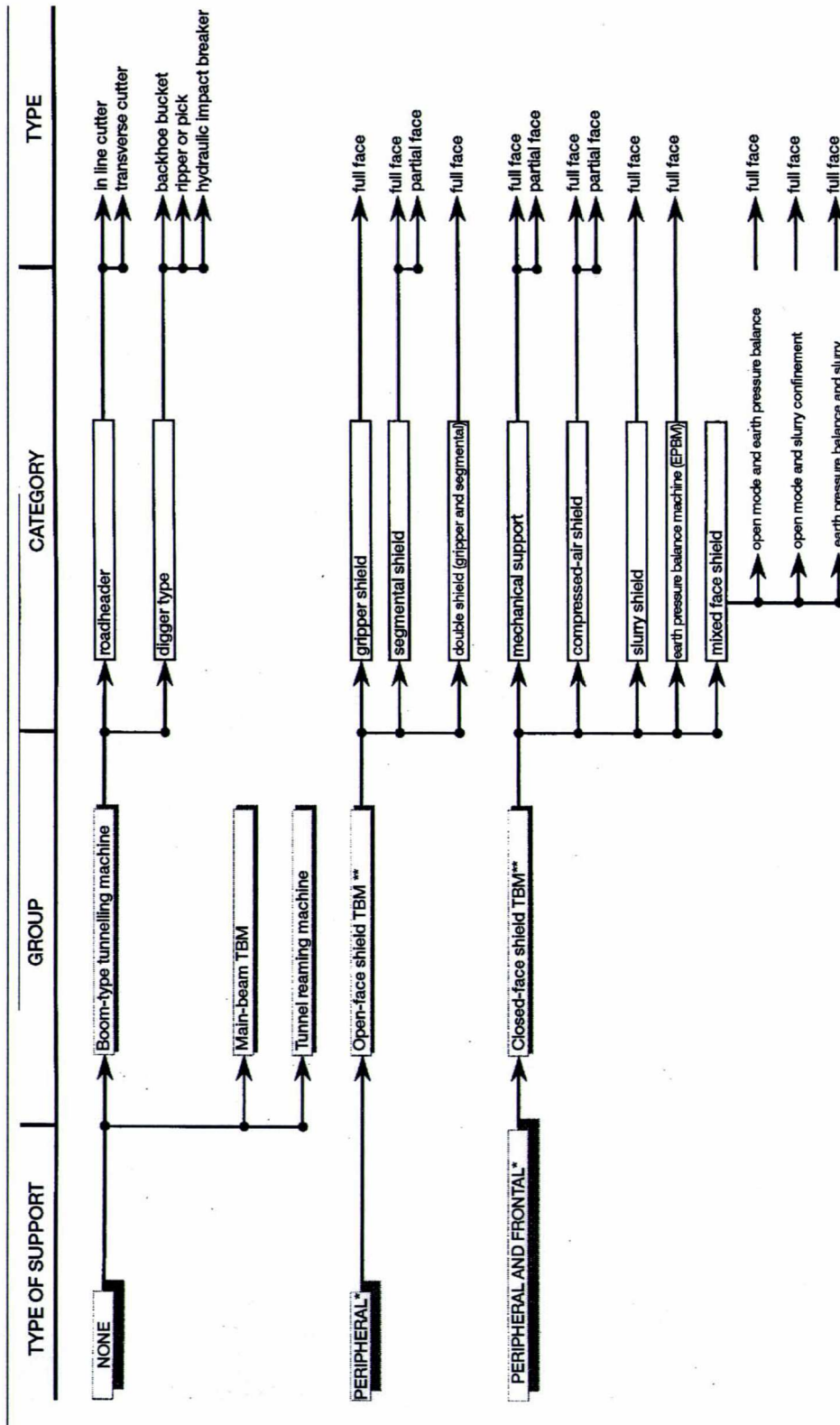


Tabella 1: Schema classificativo delle “Tunnelling Machines” adottato dall’AFTES

Location	Support		Excavation		Reaction Force	Machine	
	Cavity	Face	Method	Tool		Category	Type
Cavity	None		Partial Face Excavating Machines (PFM)	Various	None or Grippers	Rock Machines	Special Rock Tunnelling Machines - Mobile Miner - Continuous Miner - Other
	None	None	Full Face Rotating Cutting Head (TBM)	Cutting disk	Grippers		Unshielded TBM
				Cutting disk/ Cutting bits/ Cutting knives & teeth	Thrust Jacks		Special Unshielded TBM
Face and cavity	Shield	Mechanical	PFM	Rod header/ Back hoe/ Manual excavation	Thrust Jacks	Soft Ground Machines	Open Shield
			TBM	Cutting bits/ Cutting knives & teeth	Thrust Jacks		Mechanical Supported Closed Shield
		PFM	Road header/Back hoe	Mechanical Supported Open Shield			
		Compressed Air	TBM	Cutting bits/Cutting knives & teeth			Compressed Air Closed Shield
			PFM	Road header/ Back hoe/ Manual excavation			Compressed Air Open Shield
		Slurry	TBM	Cutting disk/ Cutting bits/ Cutting knives & teeth			Close Slurry Shield – Slurry Shield – SS-Hydroshield
			PFM	Road header/Back hoe			Open Slurry Shield – Special Open - Slurry Shields
		Earth Pressure Balance	TBM	Cutting disk/ Cutting bits/ Cutting knives & teeth			Earth Pressure Balance Shield - EPBS Special EPBS
		None or fluid	None or slurry or Earth Press. Balance	TBM			Cutting disk/ Cutting bits/ Cutting knives & teeth

Tabella 2: Schema classificativo delle “Tunnelling Machines” adottato dalla SIG

#### 4.2 Criteri di selezione e fattibilità dello scavo meccanizzato

I criteri di fattibilità dello scavo meccanizzato e di selezione delle TBM utilizzabili si basano sull'analisi del tracciato che caratterizza la galleria in relazione ai seguenti aspetti:

- caratteristiche compressive delle opere in sotterraneo e rapporti con il progetto generale (requisiti funzionali, vincoli progettuali ed ambientali);
- caratteristiche geologiche (indagini, livello conoscitivo ed affidabilità del modello geologico, aspetti geomorfologici, idrologici, aspetti geotermici);
- caratteristiche geotecniche (caratterizzazione degli ammassi, stato tensionale in situ);
- previsioni del comportamento meccanico degli ammassi (stabilità del cavo per ogni zona omogenea in cui è suddivisibile, interferenze con vincoli in superficie ed in sotterraneo).

##### 4.2.1 Considerazioni sul Tunnel di Interconnessione

Per il Tunnel di Interconnessione, non è possibile utilizzare il metodo meccanizzato per i seguenti aspetti:

- lunghezza limitata delle canne (solo 1620 m per il BD e 1625 m per il BP per la sezione corrente) che comporta che l'eventuale acquisto di una macchina non è ammortizzabile;

- i frequenti cambi di sezione tipo dovuti alla realizzazione dei cameroni necessari per alloggiare i binari nella tratta da Susa all'imbocco in sotterraneo del futuro tunnel dell'Orsiera e ad un allargamento della sezione del binario dispari sull'ultima tratta verso Bussoleno per questioni di visibilità dei segnali;
- cambiamenti di pendenza lungo il tracciato;
- area agli imbocchi limitata per il montaggio della macchina (specie all'Imbocco Est lato Bussoleno dove lo spazio è davvero minimo per via dei binari della linea storica);

Per maggiori dettagli sulla scelta del metodo di scavo per questo tunnel, si veda la relazione PD2\_C3A\_0895\_33-02-02 ed il § 7.3.

#### **4.2.2 Considerazioni sulle gallerie della Maddalena**

Il progetto di Variante sviluppato a seguito della prescrizione n. 235 del CIPE porta ad una diversa configurazione dei fronti di attacco ed alla realizzazione delle opere seguenti:

- Galleria di connessione 1 (scavata da Maddalena 1);
- Galleria di connessione 2;
- Galleria di Maddalena 2.

Le scelte che hanno portato alla configurazione di progetto (legate anche ai metodi di scavo per queste opere) sono descritte nella relazione PRV\_C30\_7190\_20-00-50.

In definitiva, per le gallerie di connessione 1 e 2 si prevede lo scavo con metodo tradizionale per le ragioni seguenti:

- Lunghezza limitata (circa 1 km per entrambe)
- Tracciato curvilineo di raggio limitato (350 m), pendenza importante (8.45%) e sezioni variabili (tratta a senso unico e tratta a doppio senso) per la galleria di connessione 1;
- Tracciato curvilineo di raggio limitato (200 m) per la galleria Maddalena 2.
- Per la galleria di connessione 1, cunicolo di accesso piuttosto limitato per il transito dei componenti della macchina.

Per la galleria Maddalena 2, una volta superata la zona di depositi glaciali e fluvioglaciali e l'orizzonte di scollamento (primi 160 m), si prevede l'uso della stessa fresa mista scudata del TdB in modo da ammortizzare completamente la macchina.

Esclusi i primi 55 m, la TBM incontra le stesse litologie del tunnel di Base a simili coperture, per cui valgono le ragioni che hanno portato alla scelta della fresa mista scudata per la sezione corrente del TdB esposte nei seguenti paragrafi.

La presenza di trovanti e clasti nei primi 130 m circa rende sconsigliabile lo scavo meccanizzato, così come le carniole dell'orizzonte di scollamento, il cui comportamento allo scavo, sulla base di esperienze in progetti simili, potrebbe essere problematico.

Nelle litologie successive, prima del complesso d'Ambin, si incontrano invece ammassi rocciosi di qualità media (marmi dolomitici, micascisti e scisti carbonatici), come osservato durante lo scavo del cunicolo esplorativo, con RMR nel range 41-50, che sono propizi allo scavo con fresa.

Il tracciato presenta caratteristiche tali da garantire lo scavo con fresa, in particolare scudata. Il raggio di curvatura minimo è pari a 450 m, che è superiore al raggio minimo per macchine scudate di pari diametro, come indicato ad es. da Chen (2007).

### ***4.2.3 Considerazioni sul Tunnel di Base lato Italia***

#### ***4.2.3.1 Caratteristiche complessive***

La definizione dei requisiti funzionali, dei vincoli progettuali ed ambientali permette una prima, ancorché grossolana, verifica dell'applicabilità delle metodologie di scavo meccanizzato per il Tunnel di Base per la tratta lato Italia.

Rapport sur les méthodes de creusement coté Italie / Relazione sui metodi di scavo delle gallerie lato Italia

Argomento	Vincolo potenziale	Influenza sulla scelta di scavo meccanizzato	Tunnel di Base
LOCALIZZAZIONE	Ambiente urbano	Da valutare caso per caso, in genere le metodologie di scavo meccanizzato sono più adatte di quelle convenzionali	Nessuna tratta ricade in ambienti urbani (la presenza di vincoli in superficie è trascurabile, salvo nel caso di alcuni edifici dell'abitato di Venaus situati a circa 55 m di copertura rispetto al Tunnel di Base
	Accessibilità agli imbocchi	Le TBM richiedono trasporti eccezionali e adeguati spazi per il montaggio	Area di sicurezza di Modane: la TBM deve essere montata in sotterraneo: l'area di sicurezza è progettata anche in funzione di questa esigenza. Imbocco Maddalena: possibilità di montaggio della TBM all'esterno;
	Costi delle materie prime e dell'energia	Da valutare caso per caso	Il progetto si sviluppa in un contesto economico relativamente favorevole all'utilizzo di TBM
	Disponibilità e costo di mano d'opera	Le TBM richiedono mano d'opera specializzata	Le dimensioni del progetto ed il contesto internazionale garantiscono la possibilità di disporre della necessaria mano d'opera specializzata
TRACCIATO	Lunghezza della galleria	L'investimento finanziario per una TBM si ammortizza meglio su gallerie lunghe. Lunghezze notevoli possono influenzare i tassi di avanzamento delle macchine.	La distanza tra l'area di sicurezza di Clarea e Susa e tra Modane e Clarea garantisce sicuramente l'ammortamento delle TBM. Date le lunghezze notevoli e le variazioni litologiche nonché condizioni difficili previste lungo il tracciato, nel cronoprogramma e per la progettazione delle macchine bisogna tener conto del fattore invecchiamento ed usura delle macchine (necessità di revisioni complete a certi intervalli o prima/dopo l'attraversamento di condizioni difficili). Inoltre il tracciato e la configurazione dei fronti di attacco a seguito della delibera CIPE 19/2015 comporta che tutti gli scavi si effettueranno in contropendenza: elemento che incrementa le difficoltà operative soprattutto in presenza di forti venute d'acqua.
	Andamento plano-altimetrico	Curve e pendenze sono un vincolo restrittivo per l'uso di TBM	Curve minime e pendenze massime compatibili con l'utilizzo di qualunque TBM
INTERFERENZE	Vari	Da valutare caso per caso	Interferenze rappresentate dalla Galleria Mompantero della A32 e dall'impianto idroelettrico di Pont Ventoux, situate comunque a distanze notevoli (sono sufficientemente lontane per l'aspetto geomeccanico, l'unica interferenza è data dalla falda nel caso di Pont Ventoux). Interferenza con il cunicolo della Maddalena nel tratto parallelo al tunnel di Base
GEOMETRIA DELL'OPERA	Forma della sezione	Le forme e dimensioni realizzabili con TBM sono relativamente "rigide"	Il gabarit della galleria di linea è compatibile con le TBM a meno di limitate tratte (imbocco Est, sezioni allargate in corrispondenza dell'area di sicurezza di Clarea)
SEZIONE TIPO	Dimensioni della sezione		Il diametro della sezione tipo è compatibile con tutte le tipologie di TBM esistenti
<b>Argomento</b>	<b>Vincolo potenziale</b>	<b>Influenza sulla scelta di scavo meccanizzato</b>	<b>Tunnel di Base</b>



Rapport sur les méthodes de creusement coté Italie / Relazione sui metodi di scavo delle gallerie lato Italia

VINCOLI PROGETTUALI	Rapporti con altre opere in realizzazione	Da valutare caso per caso	Interferenza con la realizzazione dell'area di sicurezza di Clarea.
	Tempi di esecuzione	Le TBM richiedono tempi lunghi per: approvvigionamento, montaggio e smontaggio ma diventano vantaggiose quando (come nel caso in esame) si hanno grandi lunghezze da realizzare. Questo parametro deve comunque essere valutato sulla base degli altri aspetti (geologia, geomeccanica, ecc.)	Si è tenuto conto di questi aspetti sia nella scelta dei metodi di scavo che nel planning di realizzazione
AMBIENTE	Vibrazioni - Rumore	Le TBM per scavo in roccia producono vibrazioni inferiori a quelle prodotte dai mezzi di scavo convenzionali (esplosivo, martellone)	Questo aspetto rende privilegiabile lo scavo con TBM in prossimità dell'imbocco Est.
	Gas - Polveri	Da valutare caso per caso	
	Sicurezza del personale	Da valutare caso per caso	Le TBM devono rispettare le specifiche norme in materia di sicurezza: UNI EN 16191. Inoltre devono rispettare le prescrizioni degli "Indirizzi operativi comuni per la costruzione in sicurezza del megatunnel sulla linea ferroviaria"
	Ecologico	Le TBM a contropressione di fango o terra (con additivi) producono un detrito che richiede particolari trattamenti prima di essere reimpresso nell'ambiente.	Il trasporto ed il riutilizzo del marino prodotto dallo scavo delle gallerie è (parzialmente) facilitato dallo scavo con TBM: la granulometria dei detriti di scavo permette un facile trasporto con sistemi a nastro (nel caso di metodo D&B è necessaria la presenza di un frantumatore prima del caricamento su nastri) e minimizza la necessità di frantoi (secondari e terziari) agli impianti di frantumazione e lavaggio per predisposizione inerti. Per contro la percentuale di marino riutilizzabile è maggiore nel caso di scavo con metodo D&B.
	Spazi disponibili	Da valutare caso per caso	Spazio apposito per montaggio della TBM nell'area esterna di cantiere della Maddalena. La TBM viene poi tralata lungo l'intera tratta in convenzionale prima di scavare la galleria Maddalena 2 e successivamente il BP del TdB. Per il BD del TdB, la TBM viene montata in un'apposita caverna di montaggio. Montaggio in sotterraneo nell'area di sicurezza di Modane. Non vi sarà dunque impatto ambientale dovuto al montaggio della TBM nelle aree esterne.

**Tabella 3: Influenza delle caratteristiche generali del Tunnel di Base per la tratta lato Italia sulla scelta del metodo di scavo**

Rapport sur les méthodes de creusement coté Italie / Relazione sui metodi di scavo delle gallerie lato Italia

Tipo	Forma	Sezione di Scavo														
		Diametro (m)														
		2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15 e oltre	
<i>Special Unshielded TBM: Tunnel Boring Enlargement Machines</i>	Circolare															
<i>Raise Borer</i>	Circolare															
<i>Unshielded TBM</i>	Circolare															
<i>Single Shield TBM - (SS-TBM)</i>	Circolare															
<i>Double Shield TBM - (DS-TBM)</i>	Circolare															
<i>Open Shield</i>	Varia															
<i>Mechanical Supported Closed Shield</i>	Circolare															
<i>Mechanical Supported Open Shield</i>	Varia															
<i>Compressed Air Closed Shield</i>	Circolare															
<i>Compressed Air Open Shield</i>	Varia															
<i>Closed Slurry Shield (Slurry Shield-SS, Hydroshield)</i>	Circolare															
<i>Open Slurry Shield</i>	Varia															
<i>Earth Pressure Balance Shield - EPBS</i>	Circolare															
<i>Special EPBS</i>	Varia															
<i>Combined Shield - Mix Shield, Polishield</i>	Circolare															

Tabella 4: Forme e dimensioni delle sezioni di scavo realizzate dalle TBMs

Come è possibile vedere, pressochè tutte le TBM attualmente disponibili sul mercato sono in grado di realizzare scavi di dimensioni compatibili con le esigenze della sezione corrente del TdB e dei rami; peraltro, a parte la sezione corrente, sulla base dei vari argomenti e vincoli esposti in Tabella 4 risulta evidente la limitata convenienza nell'applicazione di metodi meccanizzati per la realizzazione delle altre opere in sotterraneo; in particolare, i rami e le gallerie in linea con marciapiede nell'area di sicurezza di Clarea hanno lunghezze troppo modeste. Inoltre per i rami vi sono problemi di logistica per montare e far funzionare una macchina che lavori trasversalmente al Tunnel di Base.

#### 4.2.3.2 Caratteristiche geologiche degli ammassi

I principali fattori geologici che influenzano lo scavo meccanizzato sono elencati nella tabella seguente.

Rapport sur les méthodes de creusement coté Italie / Relazione sui metodi di scavo delle gallerie lato Italia

Fattore geologico	Influenza sullo scavo meccanizzato
Caratteristiche geo-strutturali complessive.	Le condizioni omogenee sono ideali per l'utilizzo di TBM
<b>Caratteristiche meso-strutturali</b>	
Giacitura degli strati	Si evidenzia che l'attraversamento di ammassi stratificati in giaciture verticali favorisce i sovrascavi nella zona di calotta.  La scistosità suborizzontale può portare a splaccaggi e fenomeni di rilascio in calotta come osservati durante lo scavo del cunicolo della Maddalena che sono penalizzanti per scavo con TBM aperta.
Ammassi rocciosi di qualità mediocre/scadente	La presenza di estese zone con caratteristiche geomeccaniche da mediocri a scadenti porta all'uso di TBM scudate (contrasto con martinetti longitudinali).
<b>Caratteristiche litostratigrafiche</b>	
Litologie e loro distribuzione lungo il tracciato	Le condizioni particolarmente eterogenee (litologie molto diverse lungo il tracciato) indirizzano verso TBM versatili (es. a doppio scudo o combinate).
Carsismo	In funzione della dimensione dei vuoti carsici è necessario prevedere trattamenti preventivi allo scavo.
Caratteristiche mineralogiche e petrografiche	La presenza di minerali fortemente abrasivi induce elevati consumi degli utensili. Per la presenza di minerali amiantiferi si veda la relazione PRV_C3A_7610_33-02-02.
<b>Condizioni idrologiche e idrogeologiche</b>	
Interferenza acquiferi - opera	Per una galleria da realizzarsi sotto falda è necessario prevedere: <ul style="list-style-type: none"> <li>• in terreni coesivi e/o incoerenti (es. sottoattraversamento della Val Cenischia) – sempre l'utilizzo di una TBM con fronte di scavo chiuso e pressurizzato;</li> <li>• in ammassi rocciosi – oltre all'utilizzo di una TBM con fronte pressurizzato, in funzione del grado di fratturazione, possono risultare efficaci il drenaggio o l'impermeabilizzazione dell'ammasso preventiva allo scavo.</li> </ul> La presenza di venute d'acqua non comporta particolari aggravii nelle operazioni di scavo con TBM: si evidenzia peraltro che, indipendentemente dal metodo di scavo adottato, la posa dei sostegni e – soprattutto – dei rivestimenti (con particolare riferimento all'arco rovescio) risultano particolarmente difficoltose e rallentate in presenza di forti venute d'acqua.  Una condizione di rischio particolare può essere rappresentata da improvvise ed abbondanti venute d'acqua in galleria durante l'avanzamento in contropendenza. In questo caso è imperativo garantire che il sistema di pompaggio delle acque sia adeguato alle venute in galleria: in caso contrario si potrebbero verificare parziali allagamenti della galleria con conseguenti guasti delle attrezzature (con particolare riferimento a macchinari elettrici).
Temperatura delle acque (e dell'ammasso)	Quando le temperature della roccia e dell'eventuale acqua di falda superano 27-30°, il calore prodotto dalla TBM e da tutte le attrezzature elettroidrauliche installate provoca condizioni di temperatura nella zona di lavoro di 30-35°. Se per la presenza di acqua l'umidità relativa è anche elevata allora non è più possibile lavorare senza predisporre un adeguato impianto di condizionamento dell'aria di ventilazione oltre a condizionare tutte le cabine di comando e di controllo. Data la profondità notevole del tunnel lungo la tratta Modane-Susa (fino a 2200 m), le macchine, il sistema ausiliario e di ventilazione dovranno essere progettate per far fronte a queste condizioni di lavoro difficili.  Condizioni particolari si possono determinare nella fase di cambio degli utensili: infatti la testa di scavo, anche se già un po' raffreddata, è ancora calda, in generale a più di 70°. Bisogna in generale aspettare un po' di tempo prima di penetrarci; in questo caso, data la temperatura dell'ammasso, bisognerà aspettare più a lungo.

Rapport sur les méthodes de creusement coté Italie / Relazione sui metodi di scavo delle gallerie lato Italia

Fattore geologico	Influenza sullo scavo meccanizzato
Chimismo delle acque	Eventuale aggressività nei confronti degli additivi per il sostegno del fronte (EPBS)
Gas	Necessità di equipaggiare le macchine con sistemi antideflagranti. Non si prevedono condizioni di grisù nella tratta lato Italia.

**Tabella 5: Principali fattori geologici e loro influenza sullo scavo meccanizzato**

Tipo di macchina	Terreno coesivo e/o incoerente				Ammasso roccioso		
	Omogeneo		Eterogeneo		Complesso		Omogeno
	Soft	Hard	Privo di blocchi	Con blocchi	Soft	Hard	
<i>Special Unshielded TBM</i>							
<i>Unshielded TBM</i>							
<i>Single Shielded TBM</i>							
<i>Double Shielded TBM</i>							
<i>Open Shield</i>							
<i>Mech. Supp. Closed Shield</i>							
<i>Mech. Supp. Open Shield</i>							
<i>Comp. Air Closed Shield</i>							
<i>Comp. Air Open Shield</i>							
<i>Closed Slurry Shield</i>							
<i>Closed Slurry Shield</i>							
<i>Open Slurry Shield</i>							
<i>EPBS<sup>1</sup></i>							
<i>Special EPBS</i>							
<i>Combined Shield</i>							
<i>Combined Shield</i>							

Note:

- In presenza di falda
- Campo di applicazione proprio
- Applicabile con accorgimenti



**Tabella 6: Campi di applicazione delle TBM in funzione delle caratteristiche litologiche degli ammassi da scavare**

#### 4.2.3.3 Caratterizzazione geotecnica

Il procedimento di caratterizzazione degli ammassi si sviluppa analizzando gli ammassi sia secondo le diverse parti che li compongono (materiale geologico costituente e discontinuità) sia nel loro insieme. In particolare la definizione dell'affinità di pertinenza (terreno coesivo o incoerente, roccia) permette un orientamento nella scelta dell'eventuale TBM utilizzabile.

Particolarmente importante è il riconoscimento delle possibili tipologie di complessità geotecnica elementare nell'ambito delle formazioni geotecnicamente complesse per le particolari problematiche legate all'uso di TBM in questo contesto (es. pronunciata ed

<sup>1</sup> Si evidenzia che tutte le macchine a contropressione, opportunamente modificate (in particolare in relazione agli utensili di scavo), possono comunque lavorare come *Single Shielded TBM*.

Rapport sur les méthodes de creusement coté Italie / Relazione sui metodi di scavo delle gallerie lato Italia

---

imprevedibile variabilità strutturale, improvvisi cambi litologici con passaggi da rocce competenti a rocce tenere, fronti di scavo misti). Questo vale per esempio lungo la tratta nella cosiddetta “zona a scaglie”.

In caso di terreni con inclusi lapidei (blocchi di dimensioni significative, che possono essere trovati sotto la Val Cenischia) particolare attenzione dovrà essere risposta anche nella caratterizzazione geomeccanica degli inclusi, con particolare riferimento alla determinazione di:

- natura litologica degli inclusi lapidei;
- forma e dimensioni;
- contenuto minerale;
- parametri di resistenza meccanica.

La caratterizzazione del materiale geologico costituente l'ammasso, tesa alla definizione delle proprietà indice e delle caratteristiche di resistenza e deformabilità (nelle condizioni di saturazione e tensionali ipotizzabili in progetto), oltre al valor medio di ciascun parametro dovrà fornire gli estremi e, quando possibile, la curva di distribuzione dei valori.

Si rimanda alle tabelle riportate in Allegato 1 per una sintesi dell'influenza sullo scavo meccanizzato dei principali parametri geotecnici e/o geomeccanici e relativo tipo di indagini/prove.

#### ***4.2.3.4 Previsione del comportamento meccanico***

Una volta suddiviso il tracciato in zone “omogenee” sulla base di:

- caratteristiche litologiche;
- caratteristiche geotecniche-geomeccaniche;
- condizioni idrogeologiche;
- profondità di scavo;
- stato tensionale in situ;
- presenza di vincoli e condizionamenti,

attraverso il calcolo del comportamento del fronte e della cavità è possibile attribuire le diverse zone ad un determinato tipo di comportamento, a cui può corrispondere una determinata tipologia di TBM.

Con particolare riferimento allo scavo con TBM in ammassi spingenti, in Figura 1 si riporta un diagramma schematico che mostra la correlazione tra comportamento allo scavo e TBM per rocce (in diagramma doppio scudo e aperte: DS TBM e Open TBM).

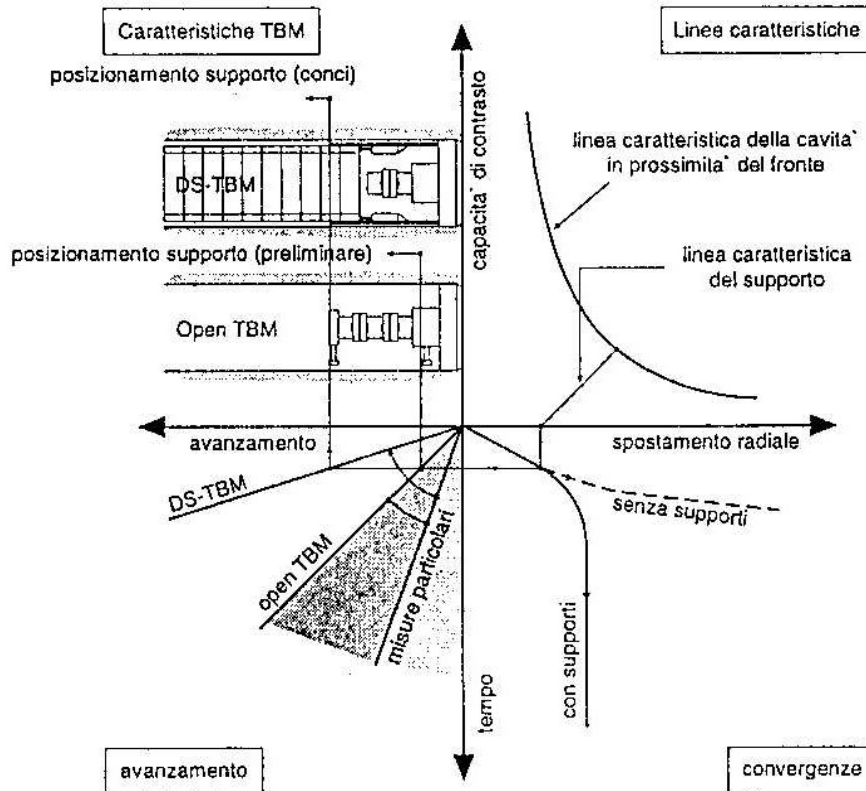


Figura 1: Comportamento allo scavo con TBM di un ammasso roccioso e posizionamento dei supporti

E' evidente l'importanza del posizionamento del supporto in funzione del manifestarsi delle convergenze; la distanza minima di posizionamento del supporto rispetto al fronte di scavo ( $D_{\text{supporto min}}$ ) è funzione della tipologia di TBM adottata. Se  $D_{\text{scavo}}$  = diametro di scavo, in generale è valida la seguente regola:

Open TBM	$D_{\text{supporto min}} = 0,5 D_{\text{scavo}} = 5 \text{ m}$
Single Shielded TBM	$D_{\text{supporto min}} = 1,0 D_{\text{scavo}} = 10 \text{ m}$
Double Shielded TBM	$D_{\text{supporto min}} = 1,5 D_{\text{scavo}} = 15 \text{ m}$

Si nota però che nel caso di TBM a Doppio Scudo Universali (DSU-TBM) e per TBM di grande diametro (9-10 m, ovvero corrispondente alla sezione corrente del Tunnel di Base), si ha  $D_{\text{supporto min}} = 1,0 D_{\text{scavo}} = 10 \text{ m}$ , come nel caso delle TBM monoscudo.

E' evidente che il posizionamento del supporto ad una determinata progressiva, rispetto allo scavo alla medesima progressiva, avverrà con un ritardo che è funzione della velocità di avanzamento:

$$T_{\text{supporto a Pk xx}} = T_{\text{scavo a Pk xx}} + V_{\text{TBM}} \times D_{\text{supporto min}}$$

Alla velocità massima possibile ( $V_{\text{TBM max}} = 1,5 \text{ m/h}$ ) le differenze nel ritardo di posizionamento del supporto tra una Open TBM ed una Shielded TBM (single o double) restano nell'ordine di grandezza delle ore. Il discorso è molto diverso quando la  $V_{\text{TBM}}$  risulta ridotta per i motivi più diversi: in queste condizioni il rischio di intrappolamento di una macchina scudata diventa decisamente più elevato rispetto a quello di una macchina aperta.

Si deve inoltre considerare che con una macchina scudata, sostanzialmente l'unico supporto posizionabile è rappresentato da conci prefabbricati in c.a.; questi elementi sono rigidi e non possono assorbire le convergenze che è necessario far scontare all'ammasso per limitare i carichi a valori compatibili con le caratteristiche di resistenza del supporto medesimo. Alcuni sistemi per assorbire le convergenze nel caso di conci prefabbricati sono stati concepiti negli ultimi anni ma hanno avuto per ora poche applicazioni.

#### 4.3 Le TBM potenzialmente utilizzabili per il Tunnel di Base lato Italia

Tenuto conto dei criteri e delle tipologie già esposti e con riferimento alle varie tipologie di macchine oggi disponibili sul mercato ed alla nomenclatura più corrente in letteratura è possibile sommariamente indicare che le TBM potenzialmente utilizzabili per la realizzazione del Tunnel di Base sono:

- TBM aperte (Gripper TBMs);
- TBM monoscudo (Single shield TBMs);
- TBM a doppio scudo (Double shield TBMs);
- Scudi chiusi combinati: contropressione di fango o di terra – assenza di contropressione (Combined shield: slurry or EPB – single shield TBM).

Inoltre si aggiunge la seguente tipologia, sebbene usata meno diffusamente e non disponibile da tutti i produttori:

- la TBM a Doppio Scudo Universale a contropressione di terra (dual mode DSU EPB).

In Allegato 2 si riporta una sintetica descrizione delle principali caratteristiche relative alle TBM potenzialmente utilizzabili.

#### 4.4 Fasi realizzative delle gallerie scavate con TBM

##### 4.4.1 Costruzione con TBM aperte

Con questa tipologia di TBM, il ciclo di lavoro è discontinuo, e prevede:

- 1) scavo di avanzamento per una lunghezza pari alla corsa utile (stroke);
- 2) riposizionamento della macchina (regripping);
- 3) nuovo scavo di avanzamento.

Contemporaneamente a queste operazioni (che si svolgono al fronte), avviene la posa in opera del rivestimento.

In linea di principio, il rivestimento di una galleria realizzata con TBM aperta può essere realizzato sia in conci prefabbricati (messi in opera attraverso un opportuno erettore posizionato dietro la testa di scavo), che “tradizionale” ovvero attraverso sostegni (centine o liner plates, calcestruzzo proiettato, bulloni: rivestimento di 1° fase) + rivestimento definitivo gettato in opera.

Peraltro, l'utilizzo di TBM aperta + rivestimento in conci è assai rara sia per motivi logistici che geomeccanici: nel caso in esame una delle motivazioni per prevedere l'utilizzo di una TBM di tipo aperto è legata all'entità delle convergenze attese nelle condizioni critiche,

convergenze che possono essere contenute solo attraverso un rivestimento deformabile quale può essere il rivestimento di 1° fase.

Al fine di studiare le differenti fasi di costruzione e quindi derivarne le stime sui tempi elementari e sui flussi dei materiali per l'analisi delle esigenze logistiche, per le gallerie in linea del TdB sono state ipotizzate diverse tipologie di sezioni tipo di scavo (TS1a, TS1b, TS2, TS3, TS4a, TS4b, TS5), in funzione del comportamento allo scavo e delle fenomenologie deformative attese. Si veda a questo proposito la relazione PRV\_C3A\_3949\_26-19-00 e gli elaborati grafici ad essa connessi.

Tutte le sezioni avranno evidentemente una forma circolare e saranno quindi dotate di una struttura di sostegno chiusa.

Nelle Tabelle 13 e 14 in Allegato 3, per ciascuna sezione tipologica si riportano le attrezzature, materiali e mezzi necessari per la realizzazione delle gallerie. In particolare sono indicate le condizioni che caratterizzano le diverse “zone” operative, ovvero:

A - Avanzamento al fronte di scavo – qui si concentrano le due principali operazioni costruttive: scavo e smarino, inoltre, in posizione parzialmente arretrata, in questa zona deve essere posto in opera anche l'arco rovescio comprensivo del calcestruzzo primario di 2° fase<sup>2</sup>.

B - Sostegni – immediatamente dietro alla testa di scavo di una TBM aperta (o dietro al breve scudo di protezione nel caso fosse previsto)<sup>3</sup> è possibile posizionare bulloni, centine (o liner plates) ed eventualmente calcestruzzo proiettato; quando possibile, al fine di ottimizzare le operazioni costruttive, in quest'area si posiziona una prima parte dei sostegni (settore di lavoro L1 secondo norma SIA 198:2004) e si provvede al completamento (specie per il cls proiettato) in corrispondenza del back-up (settore di lavoro L2).

C - Avanzamento dei servizi – effettuato dal back-up della TBM comprende tutti i principali servizi necessari alla realizzazione della galleria: illuminazione; ventilazione; nastro trasportatore; tubazioni per acqua, aria compressa; cavi elettrici, ecc.

E - Impermeabilizzazione e rivestimento definitivo – il posizionamento dell'impermeabilizzazione e del rivestimento definitivo della galleria avverrà ad una distanza dal fronte compatibile sia con gli aspetti logistico – costruttivi (la lunghezza complessiva della TBM potrà anche superare i 150m) che con il comportamento deformativo del rivestimento di 1° fase (necessario attendere il completo esaurimento delle convergenze), inoltre, nel caso in cui l'approvvigionamento di materiali e mezzi alla TBM avvenga tramite automezzi, si dovrà anche tenere conto della necessità di realizzazione (ancorchè parziale) dei rami di comunicazione tra le due canne della galleria (previsti ogni 333 m) al fine di garantire l'inversione dei mezzi di trasporto. Queste considerazioni portano ad ipotizzare l'impermeabilizzazione ed il rivestimento definitivo svincolati dall'avanzamento della TBM e realizzate a partire da una struttura in grado garantire il transito dei mezzi da e per il fronte nonché il posizionamento temporaneo di tutte le tubazioni relative ai servizi durante la costruzione (ventilazione, acqua, aria compressa, ecc.) e del nastro per il trasporto del marino.

F - Finiture – le finiture comprendono sostanzialmente il getto del calcestruzzo secondario di 2° fase. Si noti che una volta completata questa operazione, lo spazio a disposizione dei mezzi di cantiere si riduce drasticamente rendendo impossibile l'incrocio dei medesimi se non

<sup>2</sup>Si evidenzia che questa parte d'opera potrà essere realizzata sia attraverso l'utilizzo di un concio prefabbricato (concio di base), comprensivo di tutti i cavedi necessari per l'esercizio (si veda in merito la sezione tipo della galleria finita) che attraverso un getto in opera. In entrambi i casi l'alimentazione dei materiali necessari alla lavorazione avverrà attraverso il back-up della TBM.

<sup>3</sup> Ovvero ad una distanza dal fronte tanto minore quanto è più contenuta la lunghezza della testa di scavo (o del breve scudo dietro la testa).



attraverso la locale interruzione del calcestruzzo secondario di 2° fase (in funzione del traffico atteso per i mezzi di cantiere, tali interruzioni sono da prevedersi ogni 333 m di galleria, in corrispondenza dei rami).

#### **4.4.2 Costruzione con TBM scudate**

La costruzione con TBM scudate prevede che lo scavo avvenga secondo le medesime modalità descritte per le TBM aperte: 1) scavo per una lunghezza pari alla corsa utile (stroke); 2) riposizionamento; 3) nuovo scavo. Il rivestimento in questo caso è costituito da conci prefabbricati posti in opera alla fine di ciascuna fase di scavo (TBM monoscudo) o contemporaneamente allo scavo (TBM a doppio scudo).

Con riferimento alla Tabella 15 dell'Allegato 3, le condizioni che caratterizzano le diverse "zone" operative di una TBM scudata sono:

A - Avanzamento al fronte di scavo – vale quanto già esposto per le TBM aperte.

B (+E) - Sostegni e rivestimento – tramite l'erettore si posiziona il rivestimento in conci mentre contemporaneamente si riempie il vuoto anulare tra estradosso rivestimento e profilo di scavo<sup>4</sup>.

C - Avanzamento dei servizi - vale quanto già esposto per le TBM aperte.

F - Finiture- vale quanto già esposto per le TBM aperte.

#### **4.5 Vibrazioni indotte dallo scavo con TBM**

Si è considerata la problematica legata alle vibrazioni indotte dalle attività di scavo con TBM con particolare riferimento all'abitato di Urbiano (comune di Mompantero), dove la copertura del tunnel è pari ad almeno 80 m.

Le TBM eseguono lo scavo mediante utensili (cutters) di leghe d'acciaio o metallo duro che rompono frammenti di roccia relativamente piccoli (dell'ordine di 10-100 cm<sup>3</sup>) grazie ad un'azione di compressione e taglio esercitata frontalmente e lateralmente rispetto alla loro traiettoria. L'applicazione di tali forze che portano eventualmente alla rottura della roccia è in teoria continua ma di fatto pulsante, in quanto ad ogni rottura e distacco di materiale si annullano per poi aumentare fino al distacco successivo. Tale andamento "a dente di sega" della forza trasmessa alla roccia dai singoli utensili dà luogo ad un disturbo vibratorio simile al caso del martello demolitore.

L'entità delle vibrazioni indotte è dipendente da una serie di variabili, e si ritrova un numero inferiore di studi esaustivi in materia rispetto a quelli di metodi di scavo tradizionale. Nella seguente figura, si propone una curva ricavata dalle analisi relative al tunnel di Murgental (CH) di dimensioni simili a quelle in oggetto (diametro di 10.6 m) in alternanza di molasse, marne e arenarie. Sebbene la roccia in quel caso sia meno rigida, queste curve possono ugualmente approssimare bene il fenomeno di cui trattasi.

---

<sup>4</sup>Le modalità e caratteristiche del riempimento variano in funzione delle necessità di operare in contropressione al fronte o meno: malte iniettate longitudinalmente dallo scudo TBM lungo il perimetro, malte iniettate radialmente, pea-gravel "soffiato" longitudinalmente o radialmente

Rapport sur les méthodes de creusement coté Italie / Relazione sui metodi di scavo delle gallerie lato Italia

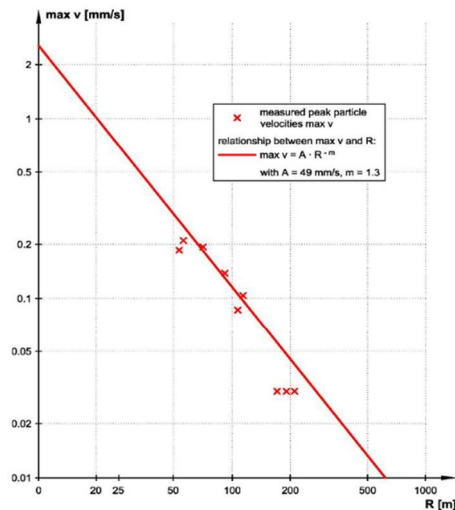


Figura 2: Vibrazioni rilevate a distanza dallo scavo nel Tunnel di Murgental (Wittke, 2007)

Le vibrazioni percepite a 80 m sono dell'ordine di 0.02 cm/s.

Per poter valutare se tale valore risulta inferiore ai valori soglia fissati dalle normative per gli effetti sugli edifici e sulle persone, si fa riferimento alle seguenti normative nazionali ed internazionali:

- Norma ISO 4866 (2010) – “Vibrazioni meccaniche ed impulsi - Vibrazioni degli edifici - Guida per la misura delle vibrazioni e valutazione dei loro effetti sugli edifici”;
- Norma UNI 9916 (2004) - “Criteri di misura e valutazione degli effetti delle vibrazioni sugli edifici”;
- Normativa DIN 4150 (1999) – “Le vibrazioni nelle costruzioni Parte 3: Effetti sui manufatti”;
- Norma UNI 9614 – “Misura delle vibrazioni negli edifici e criteri di valutazione del disturbo”;
- Norma ISO 2631-1/2631-2 – “Mechanical vibration and shock. Evaluation of human exposure to whole-body vibration” Part 1, Part 2;
- Normativa United States Bureau of Mines.

Dette normative individuano valori limite di soglia di danno in termini di velocità e/o accelerazione di picco del fenomeno vibratorio dell'ordine di 1-1.5 cm/s.

In particolare per quanto riguarda i danni ad edifici la norma americana USBM (United States Bureau of Mines) propone la curva in figura per la valutazione della probabilità di ottenere un danno su edifici di varia tipologia edilizia. Al di sotto di 1 cm/s la probabilità di danno è considerata nulla.

Rapport sur les méthodes de creusement coté Italie / Relazione sui metodi di scavo delle gallerie lato Italia

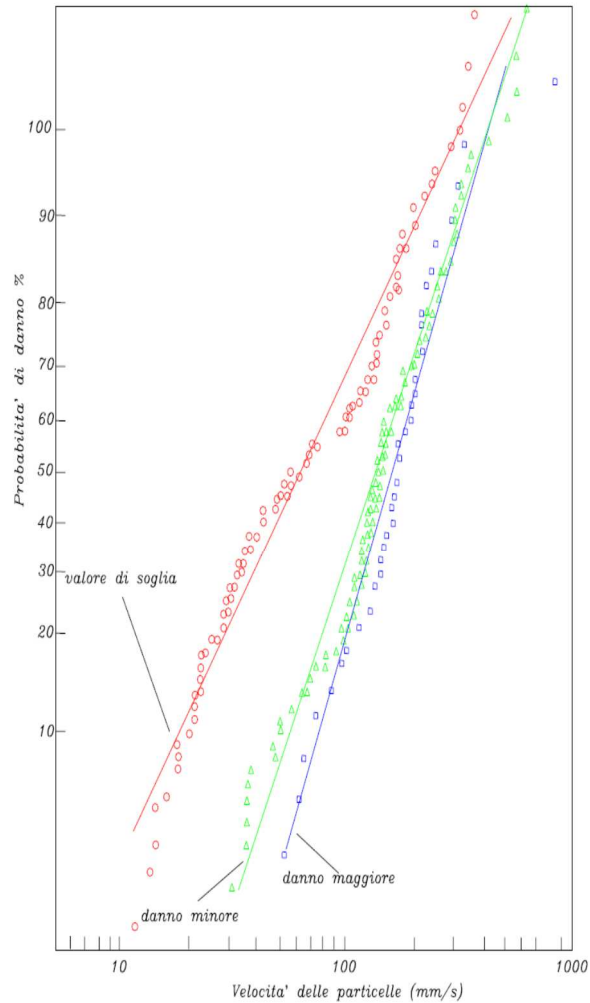


Fig. 3.1 – Probabilità di danno per strutture tipo normale abitazione secondo lo standard USA, in funzione della velocità di picco delle particelle (USBM).

**Figura 3: Limiti ammissibili per danni ad edifici (USBM) (soglia d'allerta e di danno)**

Esiste una sostanziale differenza tra la sensibilità umana e quella strutturale agli effetti del fenomeno sismico: da una parte le strutture sono sollecitate maggiormente da basse frequenze, dall'altra parte l'uomo è più sensibile ai campi di frequenze più alti.

L'essere umano, inoltre, è soggetto a fattori di carattere psicologico, che tendono ad amplificare la percezione delle sollecitazioni dinamiche, soprattutto se queste ultime sono generate da esplosione di cariche o sono continue nel tempo.

In letteratura sono date curve per stimare l'entità del fastidio indotto da una vibrazione, se ne propone una nella figura qui di seguito. Si vede che al di sotto della soglia di 0.4 s non si considera percettibile la vibrazione anche nel caso di durata massima investigata di 15 minuti (circa 1000 s).

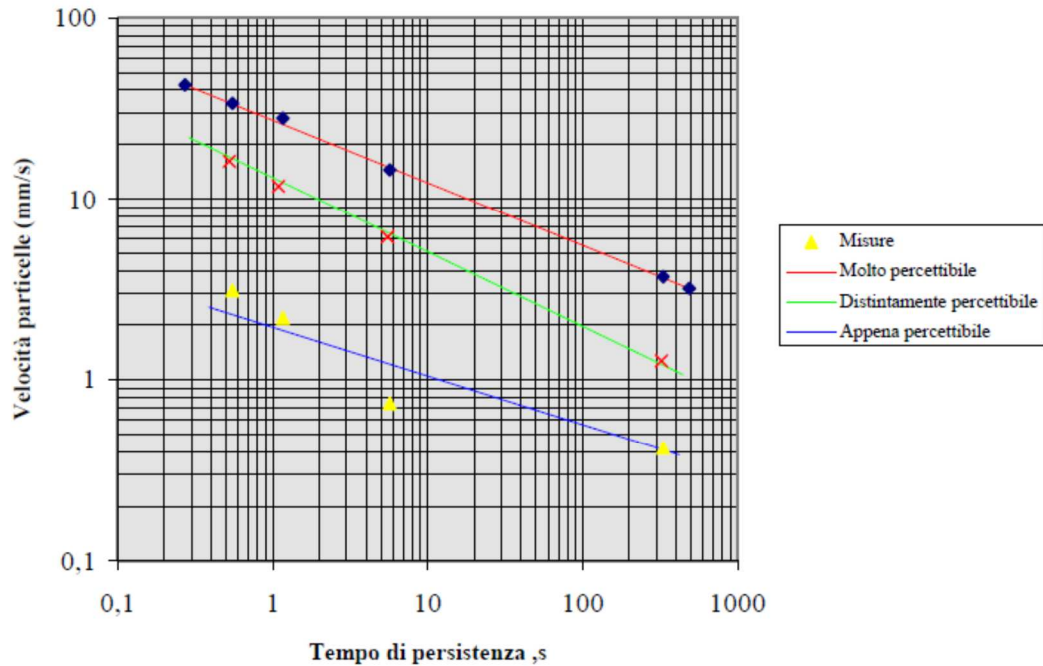


Figura 4: percettibilità della vibrazione secondo entità e durata di fenomeni vibratorii (Dowding, 1985)

Questo significa che nel caso in esame il valore di 0.02 cm/s è circa 1/3 dell'entità percettibile per l'uomo e di oltre 100 volte più bassa di quella necessaria per causare danni ad edifici. Nel caso dell'abitato di Venaus, sebbene la copertura sia inferiore (55 m), bisogna considerare che lo scavo non avviene principalmente con cutters ma con scrapers e che la presenza di terreno alluvionale rende tali vibrazioni meno rilevanti, per cui si giunge a conclusioni simili.

## 5. Scavo con metodi tradizionali

### 5.1 Avanzamenti in condizioni normali

Il tunneling con metodi tradizionali comprende essenzialmente due fasi di lavoro ben distinte:

- l'abbattimento dell'ammasso roccioso a mezzo di esplosivo e/o mezzo meccanico puntuale (escavatore, martellone, fresa puntuale) che, ovviamente, avviene al fronte di scavo;
- l'installazione dei sostegni di 1° fase e poi dei rivestimenti definitivi che è effettuata ad una certa distanza dal fronte, compatibilmente con il comportamento allo scavo dell'ammasso: i sostegni sono generalmente posizionati il più a ridosso possibile del fronte mentre i rivestimenti hanno posizionamento variabile anche in funzione delle modalità costruttive (esempio: arco rovescio che segue o precede la posa in opera delle murette).

Questo metodo di tunneling è da sempre il più utilizzato per la sua economicità e flessibilità in termini di:

- geometrie di scavo dalla forma e dimensione qualsiasi e variabili nell'ambito di pochi metri: al fine di realizzare grandi sezioni è infatti possibile parzializzare gli scavi attraverso l'utilizzo di strutture temporanee; per quanto relativo alle gallerie correnti (sezione di scavo pari a circa 85 m<sup>2</sup>) là dove necessario, è possibile prevedere la parzializzazione della sezione in: a) scavo (e sostegno) della calotta; b) scavo (e sostegno) dello strozzo;

- variabilità della distanza d'installazione dei sostegni dal fronte;
- possibilità di adeguare le dimensioni dello scavo anche in funzione delle deformazioni attese e possibilità di installare sostegni deformabili;
- estrema facilità nell'adeguare il metodo di abbattimento alle caratteristiche dell'ammasso roccioso attraversato;
- possibilità di eseguire "agilmente" trattamenti della massa rocciosa in avanzamento rispetto al fronte di scavo.

Nell'ambito delle gallerie di linea tale metodo può, di principio, essere applicato ovunque con velocità di avanzamento proprie. Certamente, esso troverà il massimo impiego nell'ambito delle aree di sicurezza, per tutti i tratti di galleria di linea all'interno delle aree di sicurezza e per tutti i rami di collegamento. Tale metodo dovrà anche essere applicato forzatamente lungo le gallerie laddove non sarà possibile prevedere l'impiego di una qualunque tipologia di TBM.

Come accennato nel capitolo precedente, alcune delle opere in sotterraneo previste in progetto dovranno essere realizzate attraverso metodologie di tipo tradizionale, in particolare:

- alcune tratte del Tunnel di Base (TdB);
- le gallerie di connessione 1 e 2
- parte della galleria Maddalena 2;
- tutte le gallerie che compongono l'area di sicurezza di Clarea;
- il tunnel di Interconnessione (TdI);
- i rami di collegamento tra i due tubi che compongono le gallerie di linea del TdB e del TdI;
- nicchie ed opere sotterranee minori in genere.

Per quanto riguarda le parti di gallerie di linea del TdB, analogamente con quanto previsto nel caso di avanzamenti con TBM aperte, e quindi al fine di studiare le differenti fasi di costruzione e la logistica base, sono state ipotizzate varie tipologie di sezioni tipo di scavo (S1, S2, S3a, S3b, S4, S5a, S5b, S6, S7, S8, S9) e rivestimento, funzione del comportamento allo scavo e delle fenomenologie deformative attese. Queste sezioni, prevedono sempre l'impiego di uno scavo con presenza di arco rovescio strutturale al fine di omogeneizzare/facilitare gli avanzamenti e la logistica in galleria. Per maggiori dettagli si veda la relazione PRV\_C3A\_3949\_26-19-00 e gli elaborati grafici ad essa connessi.

Per gli schemi delle fasi esecutive, si vedano i documenti PD2\_C3A\_6557 a 6561 e 6570\_33-02-00 (per D&B).

## 5.2 Le problematiche dell'abbattimento

### 5.2.1 Abbattimento con esplosivi

L'abbattimento con esplosivo è un mezzo a tutt'oggi insostituibile e che molto probabilmente continuerà, anche in futuro, a rappresentare un metodo efficace e competitivo per scavare molte gallerie in rocce resistenti.

Questo metodo, tuttavia, lascia aperti due temi di discussione: la regolarità nella profilatura dello scavo e le vibrazioni indotte dallo sparo mine.

Una profilatura corretta ha positivi risvolti in termini tecnici, economici e di sicurezza: si riduce drasticamente il disgaggio, la possibilità di crolli fuori sagoma, il disturbo della massa rocciosa oltre il profilo di scavo, il consumo di calcestruzzo proiettato.

Rapport sur les méthodes de creusement coté Italie / Relazione sui metodi di scavo delle gallerie lato Italia

La necessità di eseguire i fori di contorno divergenti per mantenere la sagoma, porta a fuori sagoma tecnici, che non possono essere eliminati, di entità dipendente dalla lunghezza della volata.

A prescindere da quelli tecnici, è necessario limitare il più possibile i fuori sagoma che derivano dalle condizioni geomeccaniche dell'ammasso in cui si scava. Questo è reso parzialmente possibile dalla riduzione dello sfondo e soprattutto dall'adozione di schemi di tiro controllato.

I parametri di base per il tiro controllato sono:

- il diametro dei fori di profilatura (Dfp: normalmente 51/32mm);
- la distanza tra di essi (40-90cm);
- la distanza tra fori di profilatura (fp) e l'ultima fila esterna dei fori di produzione (50-100cm);
- il diametro della cartuccia di esplosivo (17-25mm);
- la densità lineare carica - spaziatura tra le cartucce di esplosivo (0.2-0.5kg/m).

Per la profilatura si utilizzano generalmente delle micce detonanti. Attualmente, l'esplosivo utilizzato è il più sovente di tipo emulsione pompata al posto delle cartucce. Si veda a questo proposito la raccomandazione AFTES GT3R6F1 "Utilisation des explosifs: émulsions, sensibilisées et pompées directement au front de taille".

E' necessario evidenziare che i migliori risultati potranno aversi solamente dopo un'accurata sperimentazione in cantiere.

Il problema della trasmissione delle vibrazioni indotte dallo sparo mine è estremamente complesso per la presenza di molteplici fattori, per la generazione delle vibrazioni:

- modalità di divisione della volata in cariche istantanee;
- lo schema delle mine di prima apertura (rinora);
- il tipo e l'entità del ritardo dei detonatori;
- il tipo di esplosivo utilizzato;
- le caratteristiche dell'ammasso rocciosa da abbattere;

per la trasmissione delle vibrazioni:

- forma dello scavo;
- le caratteristiche dell'ammasso rocciosa da abbattere (litologia, discontinuità);

per il rilevamento delle vibrazioni:

- tipo di struttura;
- collegamento struttura-terreno;
- tipo di strumento rilevatore.

Per l'identificazione della trasmissività sismica dei terreni interessati dallo scavo al fine di valutare i potenziali effetti vibratorii indotti in superficie dal brillamento di cariche esplosive, in fase di avvio dei lavori, è necessario prevedere un piano di misura delle vibrazioni indotte, in galleria ed in superficie, dal brillamento controllato di alcune volate di prova.

In particolare occorre verificare in quale modo le caratteristiche geomorfologiche del sito (formazione rocciosa e coperture, stato di fratturazione della roccia, presenza di discontinuità strutturali ecc.) possano influenzare la propagazione delle onde elastiche, prodotte dagli scavi, dal sottosuolo alla superficie in relazione alle condizioni di stabilità delle pareti rocciose

Rapport sur les méthodes de creusement coté Italie / Relazione sui metodi di scavo delle gallerie lato Italia

sovrastanti le zone di imbocco (con particolare riferimento agli imbocchi del Tunnel di Interconnessione) ed alla sicurezza delle strutture potenzialmente interferite.

L'attività in oggetto avrà come scopo quello di individuare una legge di sito per la previsione del valore massimo di velocità di vibrazione originato dal brillamento di cariche d'esplosivo.

La legge di sito è ricavabile dalla seguente relazione empirica:

$$v_{\max} = k \left( \frac{D}{\sqrt{Q}} \right)^{-m}$$

dove:

- $v_{\max}$  = massima velocità di vibrazione (mm/s);
- $k$  e  $m$  = costanti a dimensionali funzioni delle caratteristiche dell'esplosione e del terreno attraversato;
- $Q$  = quantità di esplosivo espressa in kg;
- $D$  = distanza del punto di scoppio dal punto in esame (m);

attraverso l'individuazione dei valori delle costanti  $k$  e  $m$  che meglio si adattano alla caratterizzazione del sito in esame. La grandezza  $\frac{D}{\sqrt{Q}}$ , definita distanza scalata (D.S.), correlata su un grafico bilogarithmico con i valori massimi di velocità di vibrazione misurati, permette, attraverso un'interpolazione ai minimi quadrati, di individuare una retta la cui intercetta con il valore di D.S.=1 ed il cui coefficiente angolare definiscono rispettivamente le costanti  $k$  e  $m$ .

In fase di progettazione della volata, tale legge permetterà di valutare la massima quantità di carica per ritardo ammissibile affinché ad una determinata distanza non siano superati i valori di vibrazioni di soglia imposti dalle normative vigenti.

A puro titolo indicativo, nel grafico seguente (Figura 5) si riportano, applicando la legge di sito sopra descritta ad un caso reale di avanzamento con esplosivo in galleria, più curve velocità massima di vibrazione – distanza, calcolate per diverse quantità di esplosivo per foro. Da tali curve è possibile valutare quali sono le distanze dal punto di volata oltre le quali le velocità di vibrazione massime non superano determinati valori limite (ad es. quelli forniti dalla normativa DIN 4150/3 - Germania, febbraio 1999<sup>5</sup>) che saranno stabiliti in relazione alle tipologie degli obiettivi da salvaguardare (instabilità pareti rocciose, integrità edifici e strutture, ecc).

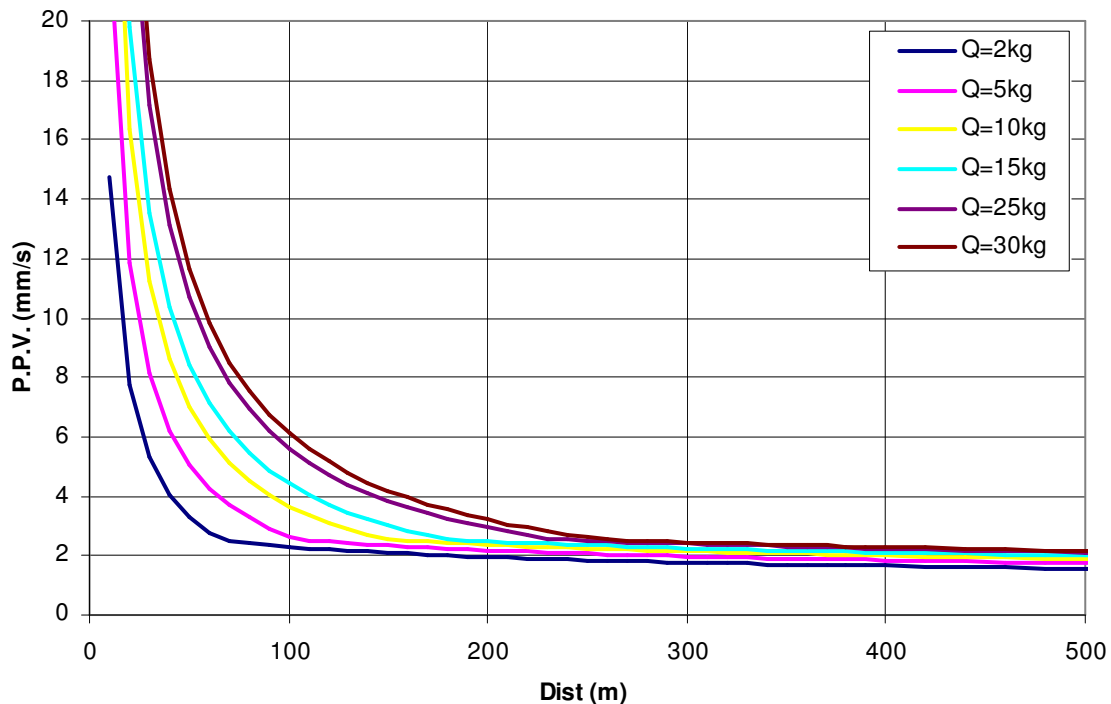


Figura 5: Esempio applicato di legge di sito: curve velocità massima di vibrazione (P.P.V) – distanza al variare della quantità di carica per foro

Una delle modalità adottabili per ridurre le vibrazioni indotte dallo sparo mine è quello di adottare il “tiro controllato” cioè adattare lo schema di tiro alle esigenze di protezione attraverso una riduzione della carica che esplosa istantaneamente.

Relativamente alle parti di galleria che si prevede di realizzare con metodologia D&B nel Tunnel di Base lato Italia si deve rilevare una generale assenza di strutture sensibili a distanze minori di 200m dai punti di emissione (fronti di avanzamento).

Vi sono invece più strutture sensibili a distanze minori di 200m nel caso del Tunnel di Interconnessione (linea storica ferroviaria, autostrada, abitato di Coldimosso, ecc...), dove si dovranno adottare schemi di volata particolari, anche con adozione di microritardi, finalizzati alla riduzione massima delle vibrazioni.

<sup>5</sup> Questa normativa indica i valori a cui fare riferimento per evitare l’insorgenza dei danni nei manufatti, danni intesi come riduzione del valore d’uso e ad essa ci si riferisce comunemente per la determinazione e valutazione degli effetti indotti dalle vibrazioni su manufatti che sono dimensionati per resistere prevalentemente a sollecitazioni statiche) che saranno stabiliti in relazione alle tipologie degli obiettivi da salvaguardare (instabilità pareti rocciose, integrità edifici e strutture, ecc)



Ulteriore condizione particolare è rappresentata dalle zone di imbocco in senso stretto (scavo dei primi 200m circa di galleria): in questo caso il problema principale è rappresentato dal rumore conseguente alle volate. L'abbattimento del rumore potrà essere ottenuto attraverso il posizionamento di pannelli fonoassorbenti in corrispondenza degli imbocchi.

### 5.2.2 Abbattimento con martello demolitore idraulico

Il martello demolitore idraulico (martellone) montato su escavatore è un mezzo di abbattimento “tradizionale” nel settore della costruzione di gallerie sia per i lavori di disgregazione conseguenti allo scavo per mezzo di esplosivo, sia direttamente per i lavori di scavo.

Il martellone può abbattere la roccia sia utilizzando l'utensile come ripper oppure immettendo sollecitazioni di compressione nella roccia.

In genere l'applicabilità del martellone è limitata agli ammassi rocciosi da discreti a scadenti.

Nel caso di questo progetto, lo scavo sarà eseguito con martello demolitore idraulico per l'alesaggio dei cameroni all'imbocco Est.

La produttività teorica con martellone può essere valutata applicando alcuni sistemi empirici.

La definizione di un modello meccanico di interazione tra l'utensile demolitore ed il mezzo da abbattere richiede la presa in conto di numerosi parametri che riguardano sia le caratteristiche costitutive e le prestazioni del martellone sia le proprietà fisiche del mezzo da abbattere.

Il metodo utilizzato per la determinazione delle grandezze di interesse è basato su correlazioni derivanti da studi statistici sulle prestazioni del martellone in numerose gallerie italiane.

I dati che vengono ipotizzati a base dei calcoli sono:

⇒ energia di percussione  $BE = 8000 \text{ J/colpo}$

⇒ massima frequenza di percussione  $MBF = 500 \text{ colpi/min}$

Alcuni studi statistici effettuati hanno evidenziato come sia possibile ottenere una stima della produttività di un martello demolitore in funzione di un solo parametro, identificato nella velocità delle onde elastiche ( $S_V$ ) nella roccia.

In merito sono state sviluppate alcune correlazioni tra  $S_V$ , quantità di energia necessaria ad abbattere  $1\text{m}^3$  di roccia (ovvero energia specifica -  $S_E$ ), rendimento di picconatura cioè il rapporto tra la massima frequenza di percussione (MBF) e la frequenza reale di percussione (RF). La zona compresa tra  $S_V=2000\text{m/s}$  e  $S_V=3300\text{m/s}$  è definibile come “fascia ottimale della velocità delle onde elastiche”. Oltre i limiti superiori di tale fascia si ha un rapido innalzamento dell'energia specifica ( $S_E$ ) necessaria per l'abbattimento di  $1\text{m}^3$  di roccia Analogamente oltre i limiti inferiori si ha un rapido abbassamento del rendimento di picconatura (RF/MBF).

Le rette di interpolazione dei dati sperimentali per la “fascia ottimale della velocità delle onde elastiche” possono essere espresse in forma analitica dalle seguenti formule:

$$S_E = a * S_V + k1$$

$$RF/MBF = a * S_V + k2$$

dove:

Rapport sur les méthodes de creusement coté Italie / Relazione sui metodi di scavo delle gallerie lato Italia

- $S_E$  è l'energia specifica richiesta;
- RF è la frequenza reale di percussione, ovvero il rapporto fra il tempo in cui la macchina può effettivamente operare alla massima frequenza di percussione rispetto al tempo totale al fronte;
- MBF è la massima frequenza di percussione (data del costruttore);
- a, k1, k2 sono i coefficienti delle rette interpolatrici.

Utilizzando  $S_v=2500\text{m/s}$ , valore medio rappresentativo di ammassi mediamente fratturati, si ottengono rispettivamente:

$$RF/MBF = 0.35-0.40$$

$$S_E = 2\text{MJ/m}^3$$

La massima produttività oraria teorica (QTt) si ricava dalla:

$$QTt = \frac{(RF / MBF) * BE * MBF}{S_E} = 0.7 \div 0.8 \text{m}^3 / \text{min}$$

Questo valore deve essere ridotto in funzione di un coefficiente di impiego (c) che tiene conto di una serie fattori operativi: la suddivisione e la durata dei tempi di manutenzione ordinaria della macchina, il tempo necessario alla sostituzione dell'utensile, il tempo necessario ad ispezioni del fronte, il tempo impiegato per movimentare la macchina, ecc.

Alcuni dati sperimentali indicano per i casi presi in esame  $c=0.8$  conseguentemente la massima produttività oraria è:

$$QT = QTt * c * 60 = 34-38\text{m}^3/\text{h}$$

In conclusione si ritiene che un martellone avente  $BE = 8000 \text{ J/colpo}$  e  $MBF = 500 \text{ colpi/min}$  possa essere idoneo per lo scavo per i cameroni all'imbocco di Susa e per i rami nelle rocce verdi. Per maggiori dettagli su tale procedura di scavo nella tratta in questione si veda l'elaborato PRV\_C3A\_7618\_33-02-02. Potrebbe essere eventualmente utilizzato (sebbene non previsto allo stato attuale delle conoscenze) in altre tratte del Tunnel di Base e del Tunnel dell'Interconnessione, a condizione che l'ammasso roccioso sia fratturato.

Anche per lo scavo con martellone si propone il tema delle vibrazioni.

Nelle immediate prossimità del fronte di scavo si producono frequenze molto elevate a causa dell'impulso generato dal moto percussivo o roto-percussivo del martello demolitore (sino a 6-800 colpi al minuto). Quanto sopra si traduce nella trasmissione di grandi quantità di energia in un tempo molto breve. Con l'aumentare della distanza, il contributo delle frequenze elevate, cui è associata un'energia minore, diventa rapidamente trascurabile, mentre permangono le frequenze basse, cui è associata la maggior parte dell'energia.

L'energia trasferita alla punta ad ogni colpo del martello demolitore è dell'ordine di alcuni KJoule (per le operazioni di scavo in galleria tra 3 e 6 kJ) e di solito occorrono uno o più colpi successivi per rompere e staccare un blocco di roccia con una frequenza regolabile o fissa di alcuni Hz.

Rapport sur les méthodes de creusement coté Italie / Relazione sui metodi di scavo delle gallerie lato Italia

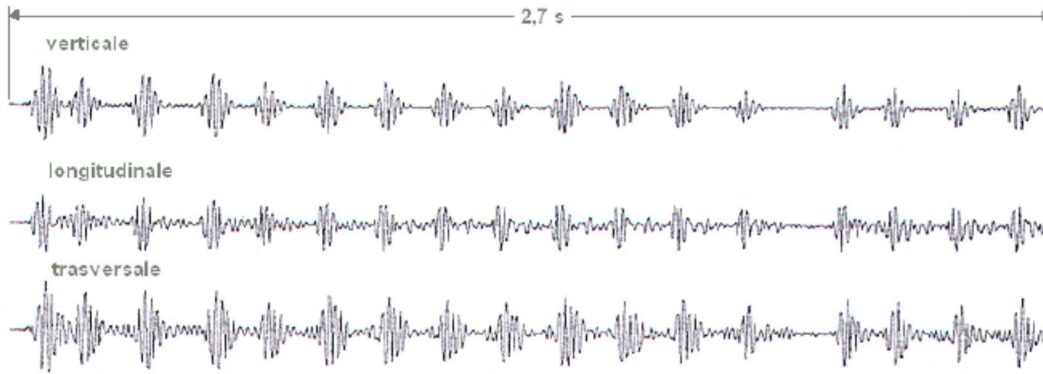


Figura 6: Vibrazioni tipiche indotte da scavo con martello demolitore (A. Fabbri 2007)

Il vibrogramma che si ottiene registrando le vibrazioni prodotte dal martello demolitore è pertanto caratterizzato da successioni di impulsi (colpi) a frequenza elevata intervallati abbastanza regolarmente tra loro di un centinaio di millisecondi e da pause di uno o più secondi. L'energia connessa con i colpi del martello demolitore è di circa 1/1000 di quella connessa all'uso di esplosivo, ma le onde vibratorie si propagano a distanza nello stesso modo.

Sebbene l'energia rilasciata dipenda da una serie di parametri (presenza di giunti, direzione del colpo, resistenza della roccia, ecc...), alcuni studi hanno condotto a identificare delle leggi di trasmissione in funzione della distanza scalata in funzione dell'energia associata al colpo.

In Figura 7: Vibrazioni misurate dallo scavo con martellone in funzione della distanza (Dantini 2002)

è riportata una curva distanza-velocità di vibrazione (Dantini, 2002).

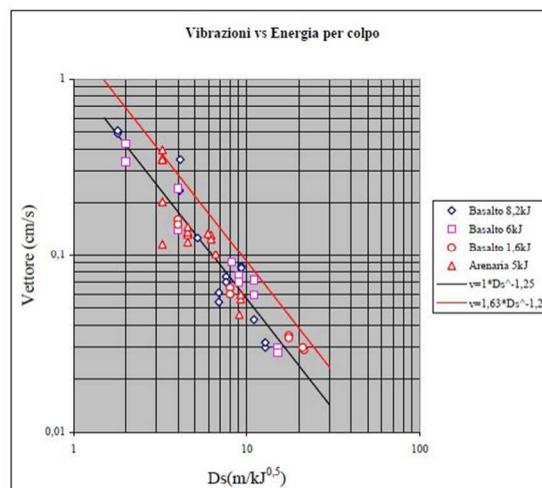


Figura 7: Vibrazioni misurate dallo scavo con martellone in funzione della distanza (Dantini 2002)

Considerando un martello demolitore da 5 kJ e applicando la relazione distanza-velocità espressa attraverso la legge empirica  $v = 37,4 \times D^{-1.58}$ : le vibrazioni per D pari a circa 80 m inducono un vettore velocità di vibrazione dell'ordine di 0.03 cm/s, pari a circa 1/200 del

valore di soglia per danneggiamento degli edifici e di circa 1/3 della minima percettibile all'uomo (si vedano le soglie di cui al par. 4.5).

### 5.2.3 *Abbattimento mediante fresa puntuale*

Le frese puntuali (FP) sono macchine di scavo che generalmente operano in materiali medio-teneri.

A seconda del tipo di applicazione le FP possono essere posizionate all'interno di uno scudo protettivo oppure su un carro cingolato; in entrambi i casi sono normalmente equipaggiate con sistemi di carico dello smarino e nastri trasportatori che ne permettono la movimentazione dal fronte alla parte posteriore della macchina evitando la necessità di alternare al fronte la macchina di produzione con quella di smarino.

Le FP utilizzano due diversi tipi di testa rotante portautensili: coniche e a tamburo. Nelle FP con testa conica l'asse di rotazione della testa coincide con l'asse del braccio FP, in fase di lavoro la traiettoria degli utensili è una cicloide che dal punto di vista pratico può essere approssimata ad una traiettoria circolare. Le FP con testa a tamburo sono costituite da due semisfere che ruotano attorno ad un asse disposto ortogonalmente all'asse del braccio, in questo caso la traiettoria degli utensili in fase di lavoro è elicoidale.

Rispetto alle frese con testa a tamburo quelle con testa conica posseggono una migliore capacità di profilatura del fronte di scavo, caratteristica apprezzabile soprattutto nelle gallerie a piccola sezione dove non è necessario spostare l'asse della macchina per "battere" l'intera sezione.

In generale la produttività delle FP è influenzata in modo rilevante sia dalle caratteristiche geomeccaniche proprie del materiale che dalle caratteristiche geomeccaniche dell'ammasso, ulteriori fattori sono le caratteristiche meccaniche delle FP e la geometria della galleria da scavare.

Nel caso di ammassi aventi  $C_{o_{max}} \leq 80\text{MPa}$ ) è possibile utilizzare FP con potenza  $P = 150\text{kW}$  ottenendo produzioni nette significative ( $p > 20\text{m}^3/\text{h}$ ).

La produzione globale (Q) per turno è ricavabile in base alla seguente formula:

$$Q = p \cdot h \cdot C_a \cdot C_b (1 - C_c); \text{ dove:}$$

p = produzione netta ( $\text{m}^3/\text{h}$ );

h = numero di ore di produzione per turno (h);

$C_a$  = coefficiente di efficienza (adim);

$C_b$  = coefficiente di disponibilità (adim);

$C_c$  = coefficiente dei "tempi morti" (adim).

Il valore che i coefficienti  $C_a$  e  $C_b$  possono assumere tiene conto delle indicazioni contenute nelle seguenti tabelle:

Ca	Condizioni di efficienza
1.0	condizioni in suola galleria buone
0.8	cattive, poca produzione di polvere
0.7	molta produzione di polvere
0.5	cattive e molta produzione di polvere

**Tabella 7: Coefficiente Ca in funzione delle diverse condizioni di efficienza in galleria**

Cb	Condizioni di disponibilità
0.1	condizioni pessime
0.2	lavoro in più fasi
0.5	lavoro in una sola fase
0.85	condizioni ottime

**Tabella 8: Coefficiente Cb in funzione delle diverse condizioni di disponibilità in galleria**

Il coefficiente Cc vale 0.125 in media per tutte le condizioni.

Le discontinuità presenti nell'ammasso influenzano in modo notevole la produttività di una FP: maggiore è il numero di discontinuità e minore è l'energia specifica richiesta per l'abbattimento.

Ipotizzando:

$h = 6-8$ ;  $Ca = 0.8$ ;  $Cb = 0.5$  si ottiene  $Q = 48-56m^3/turno$ , cioè un avanzamento massimo che nelle condizioni di ammasso più resistente risulta minore di 1m/turno.

La fresa puntuale può essere utilizzata lungo il tunnel di Base ed il Tunnel di Interconnessione solo in alcuni casi, specie in presenza di terreni. E' adatto per esempio allo scavo dei rami sotto la Val Cenischia.

## 6. Rocce verdi, radioattività e gas radon

Per quanto riguarda la valutazione del rischio legato alle rocce potenzialmente amiantifere, la radioattività e il gas radon si veda la relazione PRV\_C3B\_0083\_00-05-04.

### 6.1 Avanzamenti in condizioni particolari: rocce verdi

Si veda la relazione PRV\_C3A\_7610\_33-02-02.

## 6.2 Avanzamenti in condizioni particolari: Uranio

L'applicazione della presente procedura operativa è prevista per la gestione del materiale di scavo, per il quale venga rilevato un livello di concentrazione media di radionuclidi superiore o uguale a 1 Bq/g, come indicato nel D. Lgs. 230/95 e s.m.i.

Il monitoraggio del livello di radioattività naturale del materiale di scavo verrà monitorato in fase di avanzamento predisponendo i seguenti presidi di rilevamento:

- Controllo preliminare allo scavo – esecuzione di sondaggi in avanzamento con esecuzione di gamma ray logging;
- Controllo al fronte di scavo – sistemi di misurazione in continuo della radioattività al fronte con contatore geiger. I dati verranno giornalmente registrati per valutare eventuali scostamenti dal fondo ambientale stabilito in 0,2 microGy/h. Si prevede in tal caso l'effettuazione di più misure nell'arco del giorno della durata di 15 minuti. La soglia di allarme che genera la sospensione dei lavori ed il conseguente intervento degli organi di vigilanza è previsto tra 0,6-0,7 microGy/h, in tal caso si provvederà ad una caratterizzazione del contenuto in radionuclidi;
- Controllo del materiale di scavo – caratterizzazione radiometrica in spettroscopia gamma (radio, uranio, radon) con rivelatore al germanio iperpuro (HPGe);
- Deposito temporaneo del materiale presso il cantiere – verifica periodica sul materiale con caratterizzazione radiometrica in spettroscopia gamma sul PTS e rilevazioni con contatore geiger sul materiale prima dell'avvio del materiale al deposito definitivo;
- Deposito definitivo – caratterizzazione radiometrica periodica in spettrometrica gamma sul PTS.

In presenza di rilevazioni che segnalino il riscontro di livelli di radioattività superiori ai valori di riferimento si opererà come segue:

- confinamento del fronte mediante barriere ad acqua al fine di prevenire la dispersione di polveri eventualmente radioattive;
- Il materiale di scavo deve essere opportunamente sigillato al fronte e trasferito da operatore autorizzato alla gestione di materiale radioattivo presso un apposito impianto di smaltimento di rifiuti radioattivi.

Tutti i materiali di scavo classificabili come rifiuti dovranno essere gestiti secondo quanto previsto dalla normativa di riferimento e quindi potranno essere mobilizzati solo ed esclusivamente da parte di un soggetto autorizzato. La mobilizzazione dei materiali dovrà essere documentata seguendo le procedure previste dal D. Lgs. 230/1992 e s.m.i.

## 6.3 Avanzamenti in condizioni particolari: Gas radon

In Italia la protezione dei lavoratori dalle radiazioni ionizzanti, nelle quali rientrano le emissioni da radon, è disciplinata dal D.Lgs 17 marzo 1995 n° 230 e successive modificazioni.

I cantieri in sotterraneo sono da ritenersi compresi nei luoghi di lavoro di cui al Capo III-bis 10 bis, comma 1, lettere a) e b), per questi luoghi di lavoro il livello di azione è fissato in termini di 500 Bq/m<sup>3</sup> di concentrazione di attività di radon media in un anno.

Pertanto, il sistema di ventilazione, deve essere dimensionato per provvedere all'abbattimento delle concentrazioni del gas radon e polveri prodotti dai lavori, e deve coprire il fabbisogno di ventilazione necessario per prevenire l'accumulo del gas radon oltre la soglia ammissibile.

Tuttavia, per verificare l'efficienza del sistema di ventilazione si prevede di eseguire delle regolari misure di screening (attività volumica) del livello di esposizione nel tunnel, mediante prelievo passivo ed analisi differita. Le misure saranno eseguite prioritariamente nella parte bassa delle zone meno ventilate, dove il rischio è più elevato.

In caso di superamento del valore limite di 500 Bq/m<sup>3</sup> si procederà come segue:

- Attuazione di idonee misure correttive (intervento sul sistema di ventilazione per eliminare le zone di accumulo del radon);
- Attuazione di misure puntuali e/o continue per garantire l'efficacia delle misure correttive e, all'occorrenza, determinare le fonti e vie di trasferimento del radon e permettere di migliorare o integrare le misure correttive.

In caso di superamento sistematico del valore previsto, senza efficacia delle misure correttive o superamento del valore di 1000 Bq/m<sup>3</sup>, si procederà all'evacuazione del personale e definizione delle condizioni di installazione del cantiere appositamente adeguate in funzione dell'origine particolare della produzione di gas radon.

Nel caso in cui il materiale dovesse risultare una potenziale sorgente di radon, questo dovrà essere tenuto coperto e sigillato durante tutte le fasi di trasporto, impedendo l'emissione di radon in atmosfera.

Occorre precisare che il periodo di decadimento radioattivo del radon (ossia il tempo necessario per la scomparsa della metà de radon per disintegrazione) è di 3,8 giorni. In pratica, nel giro di 30 giorni, tutto il radon creatosi ad un determinato momento sarà dissolto.

Nello specifico dovranno essere utilizzati dalle diverse figure professionali coinvolte e in base alle previsioni di rischio, i DPI adeguati; dovrà inoltre essere posta particolare attenzione per le tratte di galleria nelle quali si sono ipotizzate particolari venute d'acqua e durante l'esecuzione dei sondaggi in avanzamento particolare attenzione dovrà essere posta per quelle operazioni che rischiano di intercettare o liberare sacche di Radon, prevedendo particolari protocolli per la gestione di tale emergenza.

## **7. Le metodologie previste (soluzione di progetto)**

### **7.1 Aspetti generali**

Come già detto, nel caso del Tunnel di Interconnessione, delle gallerie di connessione 1 e 2, dell'area di sicurezza di Clarea e dei rami non verrà usato lo scavo meccanizzato.

Per il Tunnel di Base nella tratta lato Italia la convenienza del metodo meccanizzato è stata valutata sulla base dei criteri illustrati nel Capitolo 4 di questa relazione (caratteristiche complessive, caratteristiche geologiche, caratteristiche geotecniche, previsione del comportamento allo scavo). Lo scavo con metodo tradizionale in riferimento alle dimensioni delle gallerie di linea è, di principio, applicabile ovunque se si considerano puramente i fattori di natura geologica e di logistica di cantiere (anche se, in alcune condizioni, come nel caso del sottoattraversamento della Val Cenischia, non è il metodo preferibile). La scelta di questo metodo è quindi conseguenza dell'inapplicabilità e/o non convenienza nell'utilizzo della TBM. Le caratteristiche complessive delle opere da realizzare non costituiscono particolare impedimento alla realizzabilità con TBM (si veda la Tabella 4). Nel paragrafo seguente, a seconda della geologia, della geomeccanica, della previsione e delle problematiche relative al comportamento allo scavo, si sono definiti i metodi di scavo e le tipologie di TBM più adatte lungo il tracciato e si è poi illustrata e motivata la soluzione di progetto.

## 7.2 Tunnel di Base lato Italia (gallerie di linea inclusi cameroni all'imbocco)

### 7.2.1 Metodi di scavo e tipologie di TBM più adatte lungo la tratta

Per un inquadramento generale sulla geologia, sulla geomeccanica, sulla previsione e le problematiche relative al comportamento allo scavo per la tratta lato Italia, si veda la relazione PRV\_C3A\_3949\_26-19-00 ed i documenti ad essa connessi.

Di seguito vengono illustrati e brevemente motivati i metodi di scavo e le tipologie di TBM più adatte lungo il tracciato a seconda della litologia.

#### Micascisti di Clarea (pk 48+677-53+750)

Si tratta di un ammasso tendenzialmente di buona qualità (RMR II e III), contenente al suo interno delle zone fratturate e faglie di potenza pluridecimetrica (circa 20 m), specie tra la pk 49+330 e la pk 52+625. Tali faglie non hanno portato condizioni di particolare criticità durante lo scavo del cunicolo della Maddalena e solo in corrispondenza di alcune si è riscontrato un degradamento significativo del GSI, che scende localmente fino a 37. Si è osservata inoltre una scistosità con angoli passanti da bassi (<20°) fino a medi (<50°) verso Est approssimandosi al contatto con il complesso di Ambin. La scistosità suborizzontale ha portato nel cunicolo esplorativo a problemi diffusi di stabilità in calotta, con impatto sulle sezioni tipo adottate e quindi sulle produzioni della macchina (TBM aperta).

Tali condizioni consentono l'uso dello scavo meccanizzato con TBM aperta o scudata. I problemi di stabilità (fenomeni di rilascio) hanno generato alcuni problemi per lo scavo con TBM aperta, che sono tuttavia state sormontate con l'uso di un sistema di protezione in calotta con barre metalliche di tipo McNally. Tale sistema è composto da barre metalliche inserite in apposite tasche saldate al di sotto dello scudino della macchina.

L'uso di una TBM scudata, grazie allo scudo ed alla posa dei conci al di sotto della coda dello scudo (che garantisce una continuità di protezione tra scudo ed anello di conci), è quindi preferibile in queste condizioni, ma lo scavo con TBM aperta rimane fattibile mediante l'uso di dispositivi e sezioni tipo adeguate. Lo scavo in tradizionale dovrebbe portare ad una riduzione dei fenomeni rispetto allo scavo con TBM aperta.

#### Gneiss d'Ambin e altre litologie (pk 53+750-55+029)

L'ammasso è tendenzialmente di buona qualità (RMR II e III) e la copertura è minore rispetto alla tratta precedente. Una TBM aperta ma anche una TBM scudata (in particolare una TBM a doppio scudo) possono essere utilizzate senza grandi problemi.

#### Zona a scaglie (pk 55+029-56+058)

Le notevoli problematiche e le condizioni dell'ammasso estremamente variabili previste durante l'attraversamento di questa zona, come descritte nella relazione PRV\_C3A\_3949\_26-19-00, fanno propendere per uno scavo in tradizionale. L'uso di una TBM aperta non è fattibile data la presenza delle carniolate, aventi caratteristiche geomeccaniche pessime, che non permettono il serraggio dei grippers e che provocano un'instabilità delle pareti di scavo, che rappresenta un rischio notevole per i lavoratori. Con una TBM scudata i lavoratori operano



**Rapport sur les méthodes de creusement coté Italie / Relazione sui metodi di scavo delle gallerie lato Italia**

---

sotto la protezione dello scudo. L'attraversamento di questa zona può richiedere l'esecuzione di interventi di mitigazione in avanzamento (consolidamento del fronte e/o del contorno), con conseguenti necessità di fermo macchina e rallentamenti del processo di produzione industriale. Sarà inoltre molto importante eseguire drenaggi in avanzamento in un anello attorno al futuro tunnel per scaricare le pressioni degli acquiferi presenti negli orizzonti permeabili.

Val Cenischia (pk 56+058-57+160)

Per lo scavo nei terreni alluvionali sotto la Val Cenischia, dove vi è la necessità di non abbassare la falda e drenare l'acquifero, che comunque si ricaricherebbe in continuo data la permeabilità dei terreni e l'alimentazione permanente dovuta al Torrente Cenischia (per via, tra l'altro, della presenza dell'abitato di Venaus), il metodo preferenziale è una TBM a contropressione di fango, data la granulometria dei terreni e le elevate pressioni idrostatiche (si veda a questo proposito anche la relazione PRV\_C3A\_0896\_33-02-02). L'uso di una TBM a contropressione di terra potrebbe essere utilizzato sebbene non sia frequente in queste condizioni. Lo scavo in tradizionale mediante l'uso di jet grouting ed iniezioni è possibile anche se non preferibile (sarà usato per i rami). L'uso di una TBM aperta è semplicemente impossibile.

Zona Piemontese (pk 57+160-60+695)

Le condizioni di scarsa copertura e con un ammasso roccioso di medie caratteristiche geomeccaniche possono consentire lo scavo con una qualsiasi TBM da roccia (aperta, monoscudo, a doppio scudo).

Rocce verdi (60+695-61+076.5)

Le condizioni di scarsa copertura e con un ammasso roccioso di medie caratteristiche geomeccaniche possono consentire lo scavo con una qualsiasi TBM da roccia (aperta, monoscudo, a doppio scudo). Per quanto riguarda la protezione dei lavoratori nei confronti di tali rocce potenzialmente asbestiformi, l'uso di una TBM scudata è preferibile in quanto non vi è contatto diretto con le pareti di scavo.

**7.2.2 Metodologie adottate**

Nel paragrafo precedente si è evidenziato come l'uso di una TBM scudata che possa lavorare in modalità chiusa/confinata sotto il val Cenischia ed in modalità aperta nelle altre tratte è preferibile rispetto ad una TBM con grippers per l'attraversamento della zona a scaglie, della Val Cenischia e delle rocce verdi ed è fattibile in tutte le altre tratte. Gli studi del Progetto Definitivo Approvato, convalidati dal Comitato Esperti Tunnel del 07/09/2012, hanno mostrato la fattibilità dello scavo con TBM mista scudata (mixshield), appropriata e tecnicamente avanzata, fino alla pk 52+000 circa.

Si è quindi prevista che questa fresa venga montata nell'area di cantiere della Maddalena, traslata nei primi 160 m per le ragioni già esposte al § 4.2.2 e poi scavi la galleria Maddalena 2 fino ad immettersi sul BP del TdB e successivamente scavi la sezione corrente del TdB fino all'imbocco. La fresa del BD viene invece montata in un'apposita caverna lungo il BD e scava la sezione corrente fino all'imbocco. Per le caratteristiche tecniche di tale fresa e dei concetti

Rapport sur les méthodes de creusement coté Italie / Relazione sui metodi di scavo delle gallerie lato Italia

prefabbricati montati a tergo e le modalità di lavoro lungo il tracciato si vedano le relazioni PRV\_C3A\_0896\_33-02-02 e PRV\_C3A\_3950\_26-19-00.







Per la tratta dall'estremità est dell'area di sicurezza di Clarea all'innesto/ montaggio delle frese miste scudate, la lunghezza limitata della tratta (circa 1 km) porta ad adottare lo scavo con metodo tradizionale (esplosivo) in questa tratta.

Per la tratta dalla fine dell'area di sicurezza di Modane fino all'area di sicurezza di Clarea, il tracciato interessa litologie di vario tipo (principalmente gessi, quarziti, dolomie) fino ad arrivare al massiccio d'Ambin (micascisti di Clarea). Si tratta di ammassi rocciosi tendenzialmente di buona qualità (RMR II e III), contenenti al loro interno delle zone fratturate e faglie, con caratteristiche geomeccaniche da mediocri a scadenti. Data la migliore adattabilità a questi litotipi si prevede, in continuità con le fasi progettuali precedenti (APR, PP2, PD2), l'uso di una TBM aperta.






Le caverne di montaggio sono ubicate a circa 80 m dall'estremità Ovest dell'area di sicurezza di Clarea al fine di evitare una zona più fratturata che presenta un GSI di 40. Peraltro in questa tratta nel cunicolo della Maddalena sono state messe in opera sezioni tipo pesanti di tipo F5 o F4. Si ha quindi una breve tratta all'esplosivo prima della caverna di smontaggio delle TBM aperte provenienti da Modane.

I cameroni all'imbocco vengono alesati mediante martello demolitore idraulico previa rimozione dei conci.

La tabella seguente riassume i metodi di scavo per la tratta Modane-Susa.

PK canna BP	PK canna BD*	Metodo di scavo / sezione	Senso dello scavo
33+550- 51+640	33+325- 51+640	Scavo con TBM aperta (grippers)	
51+640- 51+680	51+640- 51+680	Caverna per smontaggio TBM aperta	
51+680- 51+759.5	51+680- 51+759.5	Scavo in D&B – sezione corrente	
51+759.5- 52+598	51+759.5- 52+598	Galleria in linea area di sicurezza di Clarea	
52+598- 53+417	52+598- 53+650	Scavo in D&B – sezione corrente	
53+417- 53+514.8	53+650- 53+690	Caverna per montaggio e lancio fresa mista scudata per BD/	

Rapport sur les méthodes de creusement coté Italie / Relazione sui metodi di scavo delle gallerie lato Italia

		Innesto tra Maddalena 2 e TdB per BP	
53+514.8-55+950	53+690-55+950	Scavo con fresa mista scudata – modalità aperta	
57+400-60+695	57+400-60+695	Scavo con fresa mista scudata – modalità aperta	
60+695-61+021.5	60+695-60+934.5	Scavo con fresa mista scudata – modalità aperta – procedura speciale per scavo rocce verdi	
61+021.5-61+076.5	60+934.5-61+076.5	Sezioni allargate in corrispondenza degli imbocchi (scavo con fresa mista scudata poi alesaggio con martello demolitore)	

**Tabella 9: Sintesi delle metodologie di scavo per la tratta da Modane a Susa**

Per lo scavo della fresa scudata, il cantiere di competenza è il cantiere della Maddalena. Per la descrizione di tale cantiere si veda la relazione PRV\_C3A\_6010\_33-02-02.

Per lo scavo in D&B, il cantiere di competenza è il cantiere sotterraneo ubicato nell'area di sicurezza di Clarea, a sua volta dipendente dal cantiere in superficie di Maddalena.

Per lo scavo a partire dall'area di sicurezza di Modane, il cantiere di competenza è il cantiere sotterraneo ubicato nell'area stessa e dipendente dal cantiere in superficie all'imbocco della discenderia di Villarodin-Bourget/Modane. Si veda la relazione analoga lato Francia PRF\_C3A\_6000\_33-01-01.

### 7.3 Rami e locali tecnici del Tunnel di Base

Come già anticipato e motivato nel § 4.2.3.1, i rami ed i locali tecnici del TdB (nicchie per gli apparecchi di interruzione e serbatoi per l'accumulo dei materiali pericolosi) verranno scavati con metodo tradizionale.

Per tutta la tratta a cui corrisponde lo scavo del Tunnel di Base con TBM scudata che comporta il montaggio a tergo di conci prefabbricati, i conci nella sagoma di ingombro dei rami saranno rimossi e, per quelli di bordo, parzialmente tagliati con sega circolare, prima di effettuare lo scavo.

Inoltre, si dovrà procedere alla messa in sicurezza dei sostegni del Tunnel di Base (o dei conci, nella tratta scavata con TBM scudata) tramite la messa in opera di una trave in acciaio provvisoria ancorata con bulloni autoperforanti.

Quando situati in ammassi rocciosi, i rami ed i locali tecnici saranno scavati con esplosivo, salvo nelle rocce verdi in cui lo scavo verrà effettuato con MDI. Per quanto riguarda il sistema di sostegno, sono previste 4 sezioni tipo (S1, S2, S3 e S4) a seconda della geologia e del comportamento allo scavo previsto.

Un discorso a parte meritano i rami situati nei materiali sciolti sotto la Val Cenischia, data la natura dei terreni ed i vincoli ambientali già evidenziati in tabella 4 (necessità di non

abbassare la falda e presenza di edifici in superficie): il rischio maggiore è quello di subsidenza in superficie. Prima di rimuovere i conci ed effettuare lo scavo è necessario infatti rinforzare il terreno a tergo dei conci con iniezioni ed un doppio anello di colonne secanti in jet-grouting e drenare in contemporanea il terreno sostituendo l'acqua all'interno dei vuoti con le iniezioni. Dopo aver rimosso i conci si scaverà per sfondi da 1 m. Lo scavo può avvenire con escavatore (specialmente per i primi metri dopo la rimozione dei conci) o con fresa puntuale. La scelta è lasciata all'impresa esecutrice. Lo scavo sarà accompagnato dalla realizzazione di colonne di jet grouting sul contorno dello scavo e dalla messa in opera del sostegno con centine e cls proiettato.

La verifica della riuscita dell'intervento di iniezione si farà con piezometri spia in asse al ramo prima dell'apertura dell'anello della galleria.

Per maggiori dettagli si veda la relazione illustrativa PRV\_C3A\_1200\_26-90-10 e gli elaborati ad essa connessi.

#### 7.4 Tunnel di Interconnessione (gallerie di linea compresi cameroni e rami)

Come già motivato nel § 4.2.1, la metodologia di scavo proposta è in tradizionale. Si prevede l'uso di esplosivo principalmente sulle base delle seguenti motivazioni:

- 1) Durezza della formazione rocciosa: secondo il profilo geologico-geomeccanico, il GSI e l'UCS indicano che la roccia è competente, per cui poco si presterebbe ad uno scavo con martellone.
- 2) Esperienze precedenti: nella zona in oggetto sia la galleria ferroviaria Tanze prima che la galleria autostradale A32 Prapontin poi, sono state scavate interamente all'esplosivo fatta eccezione per gli imbocchi che sono stati scavati con martellone fino ad incontrare condizioni idonee per lo scavo con esplosivo. E' previsto monitorare la geometria dei binari nella zona di influenza dello scavo del camerone della galleria del binario pari del TdI sotto la linea storica di superficie.

Sono previste 9 sezioni tipo di scavo e sostegno, a cui corrispondono altrettante sezioni geometriche, di cui 8 sezioni per il TdI ed una per la caverna di smontaggio della fresa del futuro Tunnel dell'Orsiera: TdI-S1, S2, S3, S4, S5, S7, S8 e S6. Si rimanda alla relazione illustrativa del TdI PD2\_C3A\_4700\_65-00-00 ed agli elaborati ad essa connessi per ogni dettaglio.

I rami verranno scavati anch'essi con metodo tradizionale (esplosivo) e con sistema di sostegno conforme alle sezioni tipo corrispondenti lungo le due canne.

#### 7.5 Gallerie di connessione

Come già motivato al § 4.2.2, le gallerie di connessione 1 e 2 verrà scavata con metodo tradizionale. Data la geologia-geomeccanica lo scavo verrà effettuato con esplosivi. Si prevedono 3 sezioni tipo di scavo e sostegno per ogni opera: S1, S2 e S3. Si rimanda alle relazioni descrittive PRV\_C3A\_3820\_26-48-20 e PRV\_C3A\_7540\_26-48-21 ed agli elaborati ad essa connessi per ogni dettaglio.

## 7.6 Galleria Maddalena 2

Come già motivato al § 4.2.2, lo scavo avverrà con TBM scudata per la maggior parte della tratta. Nei primi 160 m lo scavo avverrà con escavatore o fresa puntuale ed esplosivo negli ultimi metri. Si prevedono due sezioni tipo di scavo e sostegno: S1 e S2.

La tabella seguente riassume i metodi di scavo.

PM	Metodo di scavo / sezione	Senso dello scavo
0-127	Scavo in tradizionale con escavatore o fresa puntuale	↓
127-160	Scavo in D&B	↓
160-3058	Scavo con fresa mista scudata – modalità aperta	↓

Tabella 10: Sintesi delle metodologie di scavo per la galleria Maddalena 2

Si rimanda alla relazione descrittiva PRV\_C3A\_7540\_26-48-21 ed agli elaborati ad essa connessi per i dettagli.

## 7.7 Area di sicurezza di Clarea

Data la geologia-geomeccanica, le gallerie e le caverne che compongono l'area di sicurezza di Clarea saranno scavate con esplosivo. Si prevedono 4 sezioni tipo di scavo e sostegno: S1, S2, S3 e S4. Si rimanda alla relazione descrittiva PRV\_C3A\_3700\_26-46-10 ed agli elaborati ad essa connessi per ogni dettaglio.

## **ALLEGATO 1: Tabella di correlazione tra indagini/prove, parametri ottenibili e scavo meccanizzato in rocce/terreni**

Rapport sur les méthodes de creusement coté Italie / Relazione sui metodi di scavo delle gallerie lato Italia

	Tipo di indagine/prova	Riferimento bibliografico	Parametri ottenibili	Relazione con lo scavo meccanizzato
Indagini e prove in sito	Rilievi geologico-strutturali	ISRM - 1978	Assetto geo-strutturale	Stima generale della tipologia di TBM adottabile
	Sondaggi meccanici a carotaggio	AGI - 1977	Stratigrafia di dettaglio	
	Sondaggi meccanici a distruzione (parametri di perforazione)	-	Grado di compattezza e fratturazione degli strati Venute d'acqua e presenza di gas	
	Sondaggi geoelettrici	ASTM - G57	Stratigrafia di larga massima, falda idrica	Da valutare caso per caso
	Sismica di superficie (rifrazione/riflessione)	Palmer - 1982	Contatti importanti, faglie, parametri elastici dinamici	
	Sismica in foro (cross-hole)	ASTM - D4428	Caratteristiche geosismiche locali, parametri elastici dinamici	
	Gravimetria	Colley - 1983	Presenza di vuoti e/o zone decomprese	Eventuali predisposizioni per interventi di riempimento
	Rock Quality Designation (RQD)	Deere - 1964	Indice di qualità	Localizzazione dei macchinari per il posizionamento dei sostegni (TBM non scudate)
	Caratterizzazione delle discontinuità (orientamento, JRC, JCS)	ISRM - 1978	Stima resistenza al taglio delle discontinuità	
	Misure piezometriche	AGI - 1977	Stima pressioni neutre e livelli idrici statici	Eventuali predisposizioni per interventi di drenaggio in avanzamento agli scavi
Lugeon (permeabilità in foro)	AGI - 1977	Permeabilità e grado di fratturazione		
Prove di laboratorio	Compressione uniassiale	ISRM - 1978	Resistenza a compressione (UCS), parametri elastici statici (Et, Es, n <sub>t</sub> , n <sub>s</sub> )	Principali parametri macchina: spinta, coppia, potenza. Tipologia e disposizione degli utensili sulla testa di scavo.
	Trazione indiretta (Brasiliana)	ISRM - 1977	Resistenza a trazione (To)	
	Point load test	ISRM - 1985	Resistenza al carico puntuale (Is50)	
	Martello di Schmidt	ISRM - 1977	Durezza e stima della resistenza a compressione	
	Velocità onde soniche	ASTM - D2845 ISRM - 1978	Competenza della roccia, grado di anisotropia, parametri elastici dinamici (v <sub>p</sub> , v <sub>s</sub> , E <sub>d</sub> , n <sub>d</sub> )	
	Punch test	Handewith - 1969	Resistenza al punzonamento (di, Sc)	Tipologia/consumo utensili
	Analisi petrografica	-	Composizione mineralogica, tessitura, struttura intrinseca	
	CERCHAR	West G. - 1989	Abrasività (CAI index)	Consumo utensili
	Abrasività	N.T.H. - 1990	Abrasività (AVS)	
	Perforabilità al trapano	Innaurato et al. - 1988	Perforabilità (s/q)	
	Cone Indenter del NCB	National Coal Board, U.K. - 1964	Durezza (Incb)	Prestazioni di scavo
	Sievers'	N.T.H. - 1990	Perforabilità (Sj)	
	DROP test	N.T.H. - 1990	Frammentabilità (S <sub>20</sub> )	
Knoop	Cassinelli et al. - 1983	Microdurezza (HK)		

v<sub>p</sub> = velocità onde soniche longitudinali

v<sub>s</sub> = velocità onde soniche trasversali

E<sub>d</sub> = modulo elastico dinamico

n<sub>d</sub> = rapporto di Poisson dinamico

UCS = Resistenza a compressione uniassiale

To = resistenza a trazione diretta

Sj = Sievers' J-value

S<sub>20</sub> = Valore di frammentazione

CAI = CERCHAR Abrasivty Index

Incb = durezza al cono indenter del NCB

HK = durezza Knoop

AVS = Abrasion Value Steel

s/q = spianamento/volume di roccia abrasa

Et, Es, n<sub>t</sub>, n<sub>s</sub> = Moduli di Young e rapporti di Poisson tang. e sec.

di, Sc = Indice di penetrazione, resistenza a compressione

**Tabella 11: Correlazione tra indagini/prove, parametri ottenibili e scavo meccanizzato in roccia**

Rapport sur les méthodes de creusement coté Italie / Relazione sui metodi di scavo delle gallerie lato Italia

	Tipo di indagine/prova	Riferimento bibliografico	Parametri ottenibili	Relazione con lo scavo meccanizzato
Indagini e prove in sito	Rilievi geologico-strutturali	ISRM - 1978	Assetto geo-strutturale	Stima della tipologia di TMs adottabile
	Sondaggi meccanici a carotaggio	AGI - 1977	Stratigrafia di dettaglio	
	Sonadaggi meccanici a distruzione (parametri di perforazione)	-	Stratigrafia di larga massima, grado di compattezza	
	Sondaggi geoelettrici	ASTM - G57	Stratigrafia di larga massima, falda idrica	Da valutare caso per caso
	Sismica di superficie (rifrazione/riflessione)	Palmer - 1982	Contatti importanti, parametri elastici dinamici	
	Sismica in foro (cross-hole)	ASTM - D4428	Caratteristiche geosismiche locali, parametri elastici dinamici	
	Gravimetria	Colley - 1983	Presenza di vuoti e/o zone decomprese	Eventuali predisposizioni per interventi di riempimento (Bouygues, 1995)
	Standard Penetration test (SPT)	AGI - 1977	Indice di qualità delle terre	Parametri per le valutazioni delle caratteristiche di resistenza e deformabilità dell'ammasso che influenzano lo stato tensionale e la stabilità del fronte
	Prove penetrometriche statiche (CPT)	AGI - 1977	Stima resistenza al taglio	
	Penetrometro/scissometro tascabile	AGI - 1977	Stima parametri di resistenza al taglio	
	Pressiometriche	Menard - 1957	Modulo di deformabilità (Ed)	
	Lefranc (permeabilità in foro)	AGI - 1977	Permeabilità (k)	Valutazione dell'eventuale necessità di contrasto al fronte di scavo
Misure piezometriche	AGI - 1977	Stima pressioni neutre e livelli idrici statici		
Prove di laboratorio	Prove triassiali	ASTM - D4767 AGI - 1994 BS - 1377	Parametri di resistenza (c, c', f, f', cu)	Tipologia di TBM (d/D, livelli idrici statici)
	Prove edometriche	ASTM - D4186 AGI - 1994 ISRM - 1989 ASTM - D2435	Consolidazione primaria, caratteristiche di compressibilità, permeabilità e pressione di rigonfiamento (Cv, Cc, Ec, Cs, K)	Stato tensionale (g, Ec, c, c', f, f', cu)
	Taglio diretto	ASTM - D3080 AGI - 1994 ASTM - D2435	Parametri di resistenza (f, c)	Stabilità del fronte di scavo (n, K, d/D, g, Ec, cu)
	Prove di caratterizzazione	ASTM - D4318 ASTM - D4254 ASTM - D3282	Pesi di volume, porosità, consistenza, contenuto d'acqua, plasticità, grado di sat., attività (g, n, w, wl, wp, Ip, Ic, S, A)	Collosità del terreno (cu, d/D, n, Ip, Ic, w, wl, wp, A)
	Granulometrie	ASTM - D422 AGI - 1994 ASTM - D2487	Caratteri tessiturali (d/D)	Escavabilità (g, Ic, Ip, cu, d/D)
	Conducibilità idraulica a carico costante e/o variabile	ASTM - D2438	Permeabilità (K)	Smarino (g, d/D, w, S)
	Diffratometria X	-	Composizione mineralogica	Consumo utensili (diffratometria X, d/D, cu)

g = pesi specifici

n = porosità

W = contenuto d'acqua

Wl, Wp = limite liquido e limite plastico

Ip = Indice di plasticità

S = grado di saturazione

A = coefficiente attività colloidale delle argille

Ic = Indice di consistenza

cv = coefficiente di consolidazione

cc = coefficiente di compressibilità edometrica

Ec = Modulo di compressibilità

Cs = coefficiente di rigonfiamento

K = permeabilità

c, f = coesione e angolo d'attrito interni totali

c', f' = coesione e angolo d'attrito in tensioni efficaci

Cu = coesione in condizioni non drenate

**Tabella 12: Correlazione tra indagini/prove, parametri ottenibili e scavo meccanizzato in terreni coesivi e/o granulari**



## ALLEGATO 2: Descrizione delle principali caratteristiche delle TBM potenzialmente utilizzabili per la realizzazione del Tunnel di Base

### TBM aperta

Principio operativo - Una testa porta utensili o testa di scavo, rotante attorno ad un asse coincidente con l'asse della galleria in realizzazione, viene spinta contro il fronte di scavo; gli utensili (normalmente dischi) penetrano nella roccia polverizzandola localmente e creando intense sollecitazioni di trazione e taglio. Il superamento della resistenza sotto ciascun disco provoca la creazione di linee di rottura che intersecandosi tra loro formano le scaglie (chips). Apposite aperture (buckets) ricavate nella testa porta utensili permettono la raccolta dei detriti ed il loro convogliamento al sistema di smarino primario. Il ciclo di lavoro è discontinuo, e prevede: 1) scavo per una lunghezza pari alla corsa utile (stroke); 2) riposizionamento (regripping); 3) nuovo scavo.

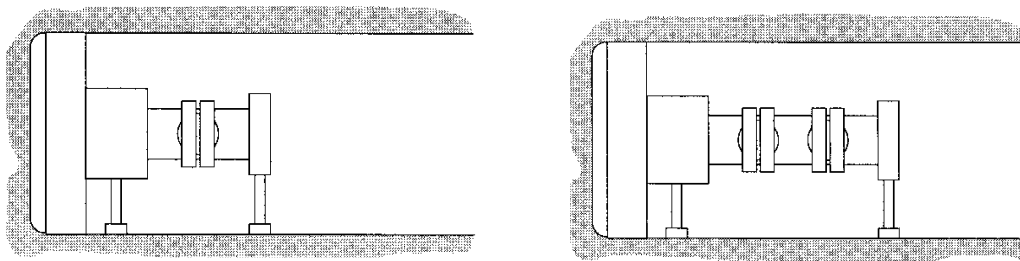
Costituzione della macchina - La TBM è sostanzialmente costituita da:

- l'elemento di lavoro traslante costituito essenzialmente dalla testa rotante porta utensili (cutting head) e dal sistema di smarino primario;
- un elemento stazionario che contrasta i martinetti di spinta della testa attraverso una o più coppie di piastre espandibili (grippers) che ancorano la TBM contro le pareti della galleria;
- un corpo posteriore contenente gli organi di guida e gli elementi di servizio;

sulla base della tipologia di elemento stazionario di contrasto è possibile suddividere le TBM aperte in: main beam type o kelly type.

Principale campo di applicazione - Ammassi rocciosi di caratteristiche da ottime a discrete con tempo di autoportanza da medio ad alto.

In figura si riporta lo schema generale delle TBM aperte (di fabbricazione Herrenknecht) utilizzate per la realizzazione del tunnel di Base del Gottardo e del Lötschberg (Svizzera).



### TBM monoscudo

Principio operativo - Vale quanto riportato per la TBM aperta. Anche in questo caso il ciclo di lavoro è discontinuo, e prevede: 1) scavo per una lunghezza pari alla corsa utile (stroke); 2) riposizionamento (attraverso i martinetti longitudinali di spinta) e con contemporanea posa del rivestimento galleria in conci prefabbricati; 3) nuovo scavo.

### Costituzione della macchina

- la testa di scavo porta utensili (dischi), che può essere collegata rigidamente allo scudo oppure articolata;
- lo scudo protettivo, di forma cilindrica o leggermente tronco-conica, entro il quale sono alloggiati tutti i principali componenti della macchina; lo scudo può essere monolitico (guida della macchina attraverso il sistema di spinta e/o la testa porta utensili) oppure articolato (guida della macchina attraverso il sistema di spinta e/o l'articolazione dello scudo);
- il sistema di spinta, costituito da una serie di martinetti idraulici o martinetti longitudinali, posti all'interno dello scudo che usano il rivestimento della galleria quale contrasto.

Principale campo di applicazione - Ammassi rocciosi di caratteristiche da discrete a scadenti.

## **TBM a doppio scudo**

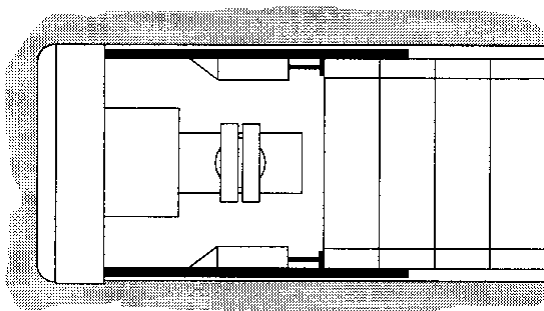
Principio operativo - Vale quanto riportato per la TBM aperta ma permette l'avanzamento in continuo grazie al doppio sistema di spinta.

### Costituzione della macchina

- la testa di scavo porta utensili (dischi);
- lo scudo protettivo, di forma cilindrica o leggermente tronco-conica, articolato, entro il quale sono alloggiati tutti i componenti della macchina;
- il doppio sistema di spinta (due modalità possibili), costituito da:
  - una serie di martinetti longitudinali (modalità monoscudo);
  - grippers, posti all'interno della parte anteriore dello scudo, che usano le pareti della galleria quale contrasto (modalità classica, ovvero a doppio scudo).

In figura si riporta lo schema generale della TBM a doppio scudo (di fabbricazione Wirth) utilizzata per la realizzazione del tunnel ferroviario di Guadarrama (Spagna).

Principale campo di applicazione - Ammassi rocciosi di caratteristiche da buone a scadenti.



Bisogna inoltre notare lo sviluppo, nell'ultimo decennio, delle cosiddette TBM a doppio scudo universali (DSU TBM), che costituiscono un'evoluzione delle TBM a doppio scudo classiche per quanto riguarda le seguenti caratteristiche:

- Lunghezza totale della TBM nella gamma di 11 m, ossia pari alla lunghezza di una TBM monoscudo del medesimo diametro;
- Diametro dello scudo posteriore molto più ridotto rispetto allo scudo frontale per consentire l'avanzamento della TBM anche in ammassi a elevata convergenza;

Rapport sur les méthodes de creusement coté Italie / Relazione sui metodi di scavo delle gallerie lato Italia

---

- Nuova progettazione dell'articolazione telescopica per eliminare il problema di intasamento del giunto telescopico in terreni instabili.

Tali caratteristiche permettono alle DSU TBM di poter avanzare anche in ammassi rocciosi spingenti e di poter avanzare in modalità a doppio scudo anche in condizioni di terreno avverse ed instabili: considerata la maggiore frequenza di fenomeni di instabilità in gallerie di grande diametro, tale caratteristica consente alla DSU TBM di avanzare con il massimo della produttività in una gamma di condizioni più ampia.

## Scudi chiusi combinati

Principio operativo - Lo scudo chiuso combinato è una macchina che si può adattare alle diverse condizioni di scavo principalmente attraverso la modifica del sistema di supporto del fronte di scavo. In gergo tecnico viene definito mixshield.

Le combinazioni che sono già state utilizzate sono:

- contropressione d'aria  $\rightarrow\leftarrow$  assenza di contropressione,
- contropressione di fango  $\rightarrow\leftarrow$  assenza di contropressione,
- contropressione di terra  $\rightarrow\leftarrow$  assenza di contropressione,

In assenza di contropressione la TBM opera come una macchina monoscudo, ma vi sono anche combinazioni con una macchina a doppio scudo (tuttavia solo nel caso di combinazioni con contropressione di terra).

### Costituzione della macchina

- testa rotante (ruota a razze portautensili più o meno chiusa);
- scudo protettivo;
- sistema di spinta: a martinetti longitudinali.

Principale campo di applicazione - La versatilità degli scudi chiusi combinati ne permette l'applicazione dalle rocce ai terreni sotto falda a limitata o nulla capacità di autosostegno.

Vi è stato un notevole sviluppo di tali macchine negli ultimi decenni.

### ALLEGATO 3: Attrezzature, materiali e mezzi necessari per la realizzazione delle gallerie di linea con metodologie meccanizzate (TBM)

C.	Lavorazione	Distanza dal fronte di scavo (D - m)	Mezzo	potenza [kW]	Note sul sistema di trasporto
<b>A</b>	<b>Avanzamento fronte di scavo</b>				
1	Eventuali perforazioni in avanzamento agli scavi	0-10	Perforatrice/bullonatore	100	
2	Scavo		Open TBM	4000	
3	Smarino	da 200m	Nastro trasportatore e magazzino nastri	Var.*	Nastro
<b>B</b>	<b>Sostegni</b>				
1	CLS Proiettato al contorno di scavo (1° fase)	5-50	Macchina per CLS proiettato (su back-up TBM)	Incl. TBM	Gomma
2	Bullonatura		Autobetoniera	80	
			Perforatrice/bullonatore (su back-up TBM)	Incl. TBM	
<b>C</b>	<b>Avanzamento servizi</b>				
	Avanzamento ventilazione, illuminazione, servizi vari	20-30	Dal back-up TBM		
<b>E</b>	<b>Impermeabilizzazione e rivestimento definitivo</b>				
1	Eventuale armatura e getto arco rovescio	50-100	Autobetoniera	80	Gomma
2	Impermeabilizzazione (calotta e piedritti)		Ponteggio a portale	0	
3	Getto rivestimento definitivo (calotta e piedritti)	>200	Cassero a portale	0	
			Autobetoniera	80	Gomma
			Autopompa	80	
<b>F</b>	<b>Finiture</b>				
		>300			
1	Eventuale armatura e getto CLS di 2° fase (compresi tubi, cavedi e pozzetti)		Autobetoniera	80	Gomma
			Autopompa	80	

(\*) - La potenza necessaria per il nastro è funzione di distanze da percorrere e pendenze da superare

**Tabella 13: Elenco dei mezzi di cantiere necessari per ciascuna lavorazione - Avanzamento con Tunnel Boring Machine (TBM) - TBM aperta - TS1-TS2-TS3**

Rapport sur les méthodes de creusement coté Italie / Relazione sui metodi di scavo delle gallerie lato Italia

C.	Lavorazione	Distanza dal fronte di scavo (D - m)	Mezzo	potenza [kW]	Note sul sistema di trasporto
<b>A Avanzamento fronte di scavo</b>					
1	Eventuali perforazioni in avanzamento agli scavi	0-10	Perforatrice/bullonatore	100	
2	Scavo		Open TBM	4000	
3	Smarino	da 200m	Nastro trasportatore e magazzino nastri	Var.*	Nastro
<b>B Sostegni</b>					
1	CLS Proiettato al contorno di scavo (1° fase)		Macchina per CLS proiettato (su back-up TBM)	30	
			Autobetoniera	80	Gomma
2	Bullonatura	5-50	Perforatrice/bullonatore (su back-up TBM)	100	
3	CLS Proiettato al contorno di scavo (2° fase)		Macchina per CLS proiettato (su back-up TBM)	30	
			Autobetoniera	80	Gomma
<b>C Avanzamento servizi</b>					
	Avanzamento ventilazione, illuminazione, servizi vari	20-30	Dal back-up TBM		
<b>E Impermeabilizzazione e rivestimento definitivo</b>					
1	Eventuale armatura e getto arco rovescio	50-100	Autobetoniera	80	Gomma
2	Impermeabilizzazione (calotta e piedritti)		Ponteggio a portale	0	
3	Getto rivestimento definitivo (calotta e piedritti)	>200	Cassero a portale	0	
			Autobetoniera	80	Gomma
			Autopompa	80	
<b>F Finiture</b>					
1	Eventuale armatura e getto CLS di 2° fase (compresi tubi, cavedi e pozzetti)	>300	Autobetoniera	80	Gomma

(\*) - La potenza necessaria per il nastro è funzione di distanze da percorrere e pendenze da superare

Tabella 14: Elenco dei mezzi di cantiere necessari per ciascuna lavorazione - Avanzamento con Tunnel Boring Machine (TBM) - TBM aperta – TS4-TS5

Rapport sur les méthodes de creusement coté Italie / Relazione sui metodi di scavo delle gallerie lato Italia

Cod.	Lavorazione	Distanza dal fronte di scavo (D - m)	Mezzo	potenza [kW]	Note sul sistema di trasporto
<b>A Avanzamento fronte di scavo</b>					
1	Eventuali perforazioni in avanzamento agli scavi	0-10	Perforatrice/bullonatore	Incl. TBM	
2	Scavo		TBM scudata	7000	
3	Smarino	da 200m	Nastro trasportatore e magazzino nastri	1250*	Nastro
<b>B (+E) Sostegni e rivestimento</b>					
1	Posa del rivestimento in conci	10	Erettore di conci su TBM	Incl. TBM	
2	Iniezione di malta all'estradosso dei conci	10	Da TBM	Incl. TBM	
3	Eventuale armatura e getto riempimento arco rovescio	50-100	Autobetoniera	80	Gomma
			Autopompa	80	Gomma
<b>C Avanzamento servizi</b>					
	Avanzamento ventilazione, illuminazione, servizi vari	20-30	Dal back-up TBM		
<b>F Finiture</b>					
1	Eventuale armatura e getto CLS di 2° fase (compresi tubi, cavedi e pozzetti)	>300	Autobetoniera	80	Gomma
			Autopompa	80	Gomma
	(*) - Potenza valutata per la tratta Susa - Clarea				

Tabella 15: Elenco dei mezzi di cantiere necessari per ciascuna lavorazione - Avanzamento con Tunnel Boring Machine (TBM) – TBM scudata

**Rapport sur les méthodes de creusement coté Italie / Relazione sui metodi di scavo delle gallerie lato Italia**

---