

# LIAISON LYON - TURIN / COLLEGAMENTO TORINO - LIONE

Partie commune franco-italienne  
Section transfrontalière

Parte comune italo-francese  
Sezione transfrontaliera

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

REVISION DE L'AVANT-PROJET DE REFERENCE – REVISIONE DEL PROGETTO DEFINITIVO  
CUP C11J05000030001

GENIE CIVIL – OPERE CIVILI

CONSTRUCTION - COSTRUZIONE

METHODES DE CONSTRUCTION EN SOUTERRAIN – METODOLOGIA COSTRUTTIVA IN  
SOTTERRANEO

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

CREUSEMENT AU TUNNELIER – SCAVO MECCANIZZATO CON FRESA

Indice	Date/ Data	Modifications / Modifiche	Etabli par / Concepito da	Vérifié par / Controllato da	Autorisé par / Autorizzato da
0	30/11/2012	Première diffusion / Prima Diffusione	M. JANUTOLO (BG) A. MIGNINI (AMB) E. GARIN (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) E. GARIN (BG) S. MINON (BG)	M. RUSSO C. OGNIBENE	L. CHANTRON M. PANTALEO

CODE DOC	P	D	2	C	3	A	T	S	3	0	8	9	6	A	A	P	P	L	A
	Phase / Fase			Sigle étude / Sigla			Émetteur / Emittente			Numero			Indice	Statut / Stato		Type / Tipo			

ADRESSE GED INDIRIZZO GED	PD2	//	//	33	02	02	10	05

ECHELLE / SCALA
-

 **Tecnimont**  
Civil Construction  
Dott. Ing. Aldo Mancarella  
Ordine Ingegneri Prov. TO n. 6271 R



LYON TURIN FERROVIAIRE

LTF sas – 1091 Avenue de la Boisse – BP 80631 – F-73006 CHAMBERY CEI  
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 LTF Tous droits réservés – Propriété LTF Tutti i diritti riser



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



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

## SOMMAIRE / INDICE

RESUME/RIASSUNTO .....	3
1. INTRODUZIONE .....	4
1.1 Documenti di riferimento .....	4
1.2 Bibliografia .....	5
2. INQUADRAMENTO GEOLOGICO-GEOMECCANICO.....	6
3. CARATTERISTICHE DELLA FRESA .....	7
4. CARATTERISTICHE DEL RIVESTIMENTO IN CONCI PREFABBRICATI.....	9
5. MODALITÀ DI LAVORO E RENDIMENTI LUNGO IL TRACCIATO .....	9
6. CALCOLO PRESSIONI ZONA CENISCHIA.....	12
7. CALCOLO DELLE SPINTE NECESSARIE PER L'AVANZAMENTO.....	13
8. TRATTAMENTI PRIMA E DOPO LO SCAVO.....	16
9. CONCLUSIONI .....	19
ALLEGATO 1: CALCOLO DELLE PRESSIONI AL FRONTE SOTTO LA VAL CENISCHIA .....	20

## LISTE DES FIGURES / INDICE DELLE FIGURE

<b>Figura 1</b> – profilo geologico della tratta scavata con TBM mista.....	6
<b>Figura 2</b> – Utilizzo ottimale EPB/Slurry.....	7
<b>Figura 3</b> – Profilo longitudinale di spostamento considerando il confinamento dello scudo per la sezione C2 .....	14
<b>Figura 4</b> – Curva caratteristica per la sezione C2 .....	15
<b>Figura 5</b> – Schema sistema di iniezioni in avanzamento .....	17
<b>Figura 6</b> – Schema di scavo in mina lungo la fresa per intervento in avanzamento allo scavo .....	18
<b>Figura 7</b> – Schema di scavo di galleria laterale per intervento in avanzamento allo scavo....	18

## RESUME/RIASSUNTO

Ce document fournit le projet et les principales caractéristiques du tunnelier qui devra creuser le TdB coté Italie à partir de la caverne de lancement à 450 m de la tête de Susa jusqu'au massif d'Ambin (pk 52+000). Il s'agit d'un tunnelier mixte à bouclier à circuit hydraulique capable à s'adapter aux différentes conditions géologiques/geomecaniques à traverser. Les principales fonctions de la machine ont été décrites; de plus, les poussées et les pressions au front ont été évaluées et les traitements et les interventions pendant le creusement ont été illustrés.

Il presente documento fornisce il progetto e le principali caratteristiche della TBM che dovrà scavare il TdB lato Italia a partire dalla caverna di montaggio/lancio a 450 m circa dall'imbocco di Susa fino al massiccio d'Ambin (pk 52+000). Si tratta di una fresa mista scudata a circuito idraulico capace di adattarsi alle diverse condizioni geologiche/geomeccaniche da attraversare. Le principali funzionalità della macchina sono state descritte; si sono altresì stimate le spinte, le pressioni al fronte ed illustrati i trattamenti e gli interventi durante lo scavo.



## 1. Introduzione

Nell'ambito dello sviluppo del progetto definitivo, si è approfondito lo studio sulla metodologia costruttiva in sotterraneo per la tratta lato Italia, in particolare in meccanizzato tramite l'uso di una fresa mista scudata.

Si ricorda che il PP2 prevedeva per lo scavo del TdB lato Italia la seguente metodologia:

- Unità oceanica: scavo in D&B
- Zona Piemontese: fresa mista roccia-idroscudo per scavo in modalità aperta
- Zona Cenischia: modifica fresa per scavo in modalità chiusa
- Zona a Scaglie: camerone smontaggio fresa e scavo in tradizionale
- Zona di contatto Clarea-Ambin: montaggio fresa aperta da roccia e scavo fino alla Pk 52+020
- Area di Sicurezza di Clarea fino a Pk 52+020: con fresa aperta proveniente lato Francia

La soluzione ottimizzata e che recepisce le delibere del CIPE presentata in PD2 prevede:

- Unità oceanica: scavo con martello demolitore idraulico (MDI)
- Zona Piemontese: fresa mista per scavo in modalità aperta (dalla pk 60+600)
- Zona Cenischia: 1<sup>a</sup> modifica fresa e scavo in modalità chiusa con circuito idraulico
- Zona a Scaglie: 2<sup>a</sup> modifica fresa e scavo in modalità aperta da roccia fino alla Pk 52+000
- Smontaggio fresa ed arrivo imminente della fresa aperta proveniente da Modane .

Con riferimento alla soluzione di PD2 di cui sopra, il presente documento illustra di seguito le caratteristiche ed il rendimento atteso della fresa mista scudata, in funzione delle diverse zone geologiche da scavare.

### 1.1 Documenti di riferimento

Sono direttamente collegati alla presente relazione i documenti del capitolo 26-19 (Tunnel di Base-sezione corrente lato Italia):

Titolo	Codice documento
RELAZIONE TECNICA E DI CALCOLO	PD2_C3A_3949_26-19-00_10-02
RELAZIONE DI CALCOLO DEL RIVESTIMENTO CON CONCI PREFABBRICATI	PD2_C3A_3950_26-19-00_10-03
PROFILO LONGITUDINALE GEOTECNICO-GEOMECCANICO CON APPLICAZIONE AD TECNICA DELLE SEZIONI TIPO 1/2	PD2_C3A_3951_26-19-00_40-01
PROFILO LONGITUDINALE GEOTECNICO-GEOMECCANICO CON APPLICAZIONE AD TECNICA DELLE SEZIONI TIPO 2/2	PD2_C3A_3948_26-19-00_40-02
SEZIONE TIPO TM 45. GEOMETRIA ANELLO E DISPOSIZIONE CONCI	PD2_C3A_0620_26-19-30_40-02
SEZIONE TIPO TM40; GEOMETRIA ANELLO E DISPOSIZIONE CONCI	PD2_C3A_0621_26-19-30_40-03
DETTAGLIO DEI CONCI PREFABBRICATI	PD2_C3A_4851_26-19-30_40-04



Titolo	Codice documento
INTERVENTI ECCEZIONALI SCAVO IN MECCANIZZATO TBM SCUDATA	PD2_C3A_4014_26-19-30_30-02
INTERVENTI ECCEZIONALI SCAVO IN MECCANIZZATO TBM SCUDATA	PD2_C3A_4015_26-19-30_30-03
RELAZIONE TECNICA (IMPIANTI OOC E DRENAGGIO)	PD2_C3A_3956_26-19-40_10-02

## 1.2 Bibliografia

Nella preparazione del presente documento si sono consultati in forma libera i seguenti documenti (raccomandazioni e letteratura sullo state-of-the-art di frese scudate nonché calcolo della pressione al fronte):

- GT4R3A1 Choix des techniques d'excavation mécanisée (AFTES)
- Maidl B, Schmid L, Ritz W, Herrenknecht M (2008): *Hardrock Tunnel Boring Machines*
- Bringiotti (2003): *Guida al Tunnelling l'evoluzione e la sfida*
- Barla G, Pelizza S (2000): *TBM tunnelling in difficult ground conditions*. Proceedings of GeoEng 2000, Australia
- Gollegger J, Priller A, Rausch M (2009): *The use of open tunnel boring machines in squeezing rock in the Gotthard Base Tunnel*, Geomechanics and Tunneling, 2(5), 591-600
- Gutter W., Romualdi P. (2003): *New design for a 10 m universal double shield TBM for long railway tunnels in critical and varying rock conditions*. Proceedings for RETC 2003, New Orleans, USA.
- Grandori R, Romualdi P. (2006): *Galleria di Abdalajis. La sfida della TBM universale a doppio scudo*. Strade ed autostrade
- Palaez M, Arroyo J C, Alonso N (2009): *Experience acquired in the excavation of railway tunnels in Spain using tunnel boring machines*. Proceedings of WTC 2009, Budapest, Hungary.
- Mendana F (2004): *Double Shield tunnellers in the construction of Guadarrama tunnels*. Congress on mechanized tunnels: challenging case histories, Torino.
- Gonzalez J. F., Gandia J, Fernandez N: (2004): *Tunel de Abdalajis ejecutado con TBM para la linea de Alta Velocidad Cordoba-Malaga*, Revista de obras publicas, 350.
- Ramoni M (2010): *On the feasibility of TBM drives in squeezing ground and the risk of shield jamming*. Dissertation no. 18965, ETH Zurich, Switzerland
- Ramoni M, Anagnostou G (2011): *The interaction between shield, ground and tunnel support in TBM tunnelling through squeezing conditions*, Rock Mechanics and Rock Engineering, 44, 37-61.
- Zhao K. (2012): *3D numerical modelling of squeezing conditions in mechanized excavation of deep tunnels*. Tesi di Dottorato. Dipartimento di Ingegneria Strutturale e Geotecnica, Politecnico di Torino.
- Fritz P. (2003): *Slurry shield tunnelling in highly permeable ground*, 39<sup>th</sup> US Rock Mechanics Symposium.
- Holzhauser J, Hunt S W, Mayer C (2006): *Global experience with soft ground and weak rock tunnelling under very high groundwater heads*, North American Tunnelling Congress, Chicago.

- Werner Burger, François Dudouit (2011): *The Hallandsås dual mode TBM*, ETH Kolloquium, May 2011, Zurich.
- Golder associate Ltd (2009): *Ground control for slurry TBM tunneling*
- Anagnostou G, Kovari K (1996): *Face stability in slurry and EPB shield tunneling*, Geotechnical aspects of underground constructions in soft ground.

## 2. Inquadramento geologico-geomeccanico

Come illustrato in figura 1, la fresa dovrà scavare, in successione da Est a Ovest, le seguenti zone, le cui caratteristiche sono riassunte nel profilo geotecnico-geomeccanico (PD2-C3A-TS3-3951 e PD2-C3A-TS3-3948).

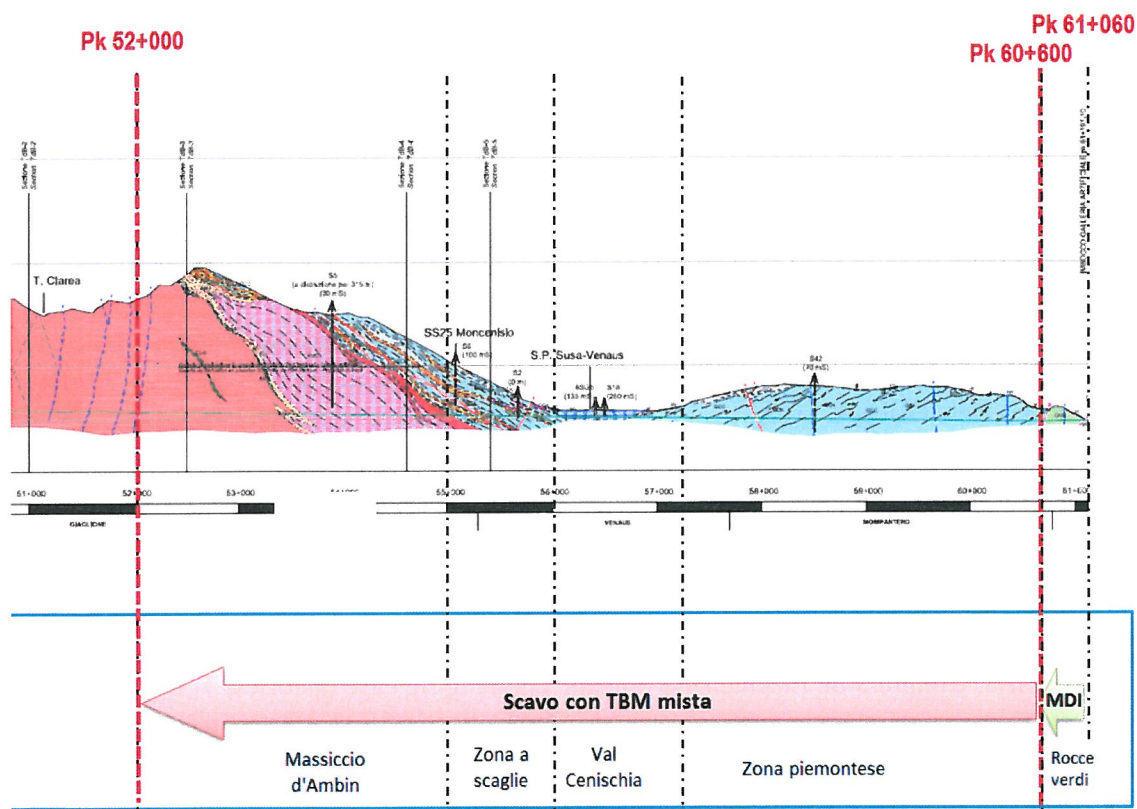


Figura 1 – profilo geologico della tratta scavata con TBM mista

Le caratteristiche dell'ammasso roccioso, le analisi di comportamento allo scavo (con il metodo delle linee caratteristiche) e le problematiche di scavo possibili lungo il tracciato sono contenute nella relazione PD2-C3A-TS3-3949. Le informazioni contenute in tale relazione costituiscono dunque la base per la concezione e progettazione della macchina e del sistema di sostegno, di seguito illustrata.



### 3. Caratteristiche della fresa

Di seguito vengono identificati i requisiti di base di una fresa mista capace di adattarsi alle diverse zone e condizioni da attraversare lungo il tratto di circa 8.6 km del TdB lato Italia, assumendo che le due gallerie saranno scavate da due frese uguali ed in maniera indipendente. I valori proposti sono dei range di min-max per coprire le diverse condizioni previste e la loro valutazione si è basata sulle esperienze precedenti e la letteratura tecnica citate in bibliografia.

Sarà da valutare in una fase successiva le possibili interferenze tra le due gallerie così come la possibilità o meno di utilizzare il primo tunnel per eventuali trattamenti/interventi non pianificati in avanzamento allo scavo del secondo tunnel nelle zone critiche di faglia, alluvioni e grandi coperture.

La fresa deve attraversare i depositi alluvionali della Val Cenischia. Tenendo conto della granulometria di queste alluvioni e dell'elevato battente idrico e pressioni conseguenti (fino a 6 bar), si è selezionata una TBM di tipo slurry.

Questa tecnologia infatti, sebbene più costosa di quella EPB, consente di fronteggiare pressioni maggiori a causa del sistema idraulico di estrazione dello smarino. Il sistema di estrazione a vite delle EPB non risulta, infatti, adeguato a scavare con pressioni così importanti.

Inoltre la curva granulometrica di queste alluvioni non rientra nel fuso ottimale di lavoro di una macchina tipo EPB (Fritz, 2003; Holzhauser et al., 2006).

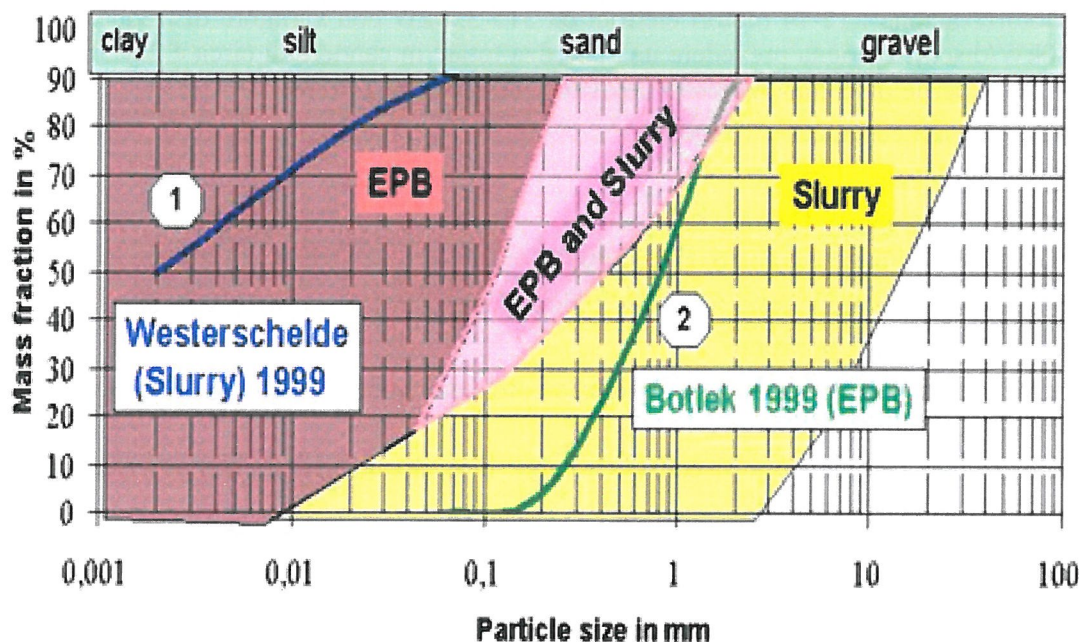


Figura 2 – Utilizzo ottimale EPB/Slurry

Le caratteristiche previste della fresa sono le seguenti:

- Scudo chiuso singolo con testa retrattile articolata e spinta longitudinale su conchi + grippers laterali (solo per situazioni puntuali per correzione scudo)



- Iniezione intercapedine (gap) con pea gravel (ghiaietto) e malta cementizia (grouting) attraverso rivestimento/scudo di coda a seconda del sistema di impermeabilizzazione previsto (caso drenato o non drenato; vedere relazione PD2-C3A-TS3-3956);
- Diametro nominale di scavo : 9.950-9.970 mm (testa fresante più grande dello scudo di 50-70 mm)
- Diametro massimo di scavo : 10.220 mm (180-200 mm di sovrascavo con dispositivi, che si può considerare come valore limite per la loro fattibilità; si veda ad es. Ramoni, 2010)
- Conicità : 50 mm sul raggio
- Intercapedine tra coda dello scudo ed estradosso del rivestimento definitivo: 90-100 mm
- Lunghezza scudo : 10 m
- Apertura testa : 6-8%
- Utensili di taglio : 75-60 dischi da 17” o 19” con raffreddamento a getto d’acqua (a parità di energia impiegata, maggiore è il diametro del disco e maggiore è la penetrazione però aumenta il rilascio di calore e la temperatura della testa) e con una spaziatura di 80-100mm ed una penetrazione attesa di 8-10mm/rivoluzione) ovvero un rapporto spaziatura/penetrazione di 8-10. Basato sul  $\sigma_c$  e sul CAI atteso, la vita media attesa dei dischi nei calcescisti e gneiss di questa zona è stimata pari a circa 800-1000 m<sup>3</sup> che si riduce per i dischi più centrali e si allunga per quelli periferici. Ciò presuppone un cambio di quelli centrali circa ogni 400-500m e di quelli periferici ogni 800-1000m.
- Modalità di scavo aperta con nastro per estrazione smarino (capacità 1500-1800 t/hr)
- Motorizzazione : 12-14 motori elettrici da 315-350kW con variatore di frequenza (65-80kW/disco). Bisogna prevedere una potenza totale in cantiere di circa  $\epsilon 2 \times 5MW + 2 \times 2MW$  per le installazioni ausiliarie ovvero un totale di 14MW
- Vita utile del cuscinetto : 15000 ore
- Spinta nominale : 120.000 kN
- Spinta sbloccaggio : 150.000 kN
- Momento nominale testa : 16.000-21.000 kNm
- Momento sbloccaggio testa : 25.000-30.000 kNm
- Rivoluzioni testa : 0-6 rpm
- Attrezzatura per perforazione in avanzamento per riconoscimento geognostico fino a 20-30m con 20-30 posizioni
- Attrezzatura per iniezioni di consolidamento in avanzamento per trattamento faglie e zone fortemente fratturate
- Attrezzatura per perforazione ombrello di infilaggi in avanzamento attraverso lo scudo per supporto calotta in zone di faglia e fortemente fratturate.
- 15 coppie di martinetti di spinta.
- La fresa, i suoi componenti e lo svolgimento delle attività di avanzamento devono garantire le prescrizioni degli “Indirizzi operativi comuni per la costruzione in sicurezza del megatunnel sulla linea ferroviaria”.

#### 4. Caratteristiche del rivestimento in conci prefabbricati

Il diametro esterno è pari a 9.6 m. Gli anelli sono rastremati: le due facce non sono parallele per permettere di seguire le curve della galleria sia planimetricamente che altimetricamente.

Questi anelli universali hanno una rastrematura adeguata alle curve del progetto (il raggio minimo è 4250 m) ed eventuali curve di recupero. La lunghezza media dell'anello, compatibile con la corsa del martinetto ed il montaggio della chiave, è di 1.80 m, per uno spessore dei conci di 45 cm dalla PK 57+400 a 52+000 e di 40 cm dalla pk 60+600 alla pk 57+400. I conci sono in c.a. con cls di resistenza C45/55 in corrispondenza allo spessore dei conci di 45 cm (TM45) e C40/50 in corrispondenza allo spessore dei conci di 40 cm (TM40).

L'anello costituito da conci è composto da 8 elementi:

- 6 conci generici romboidali (variabili solo per la rastrematura), di 48°.
- 1 concio di controchiave, di 48°.
- 1 concio di forma trapezia di 24°.

I giunti trasversali e longitudinali sono piani; i conci sono collegati tra loro (sia trasversalmente che longitudinalmente) da bullonature inclinate e da connettori biconici. Gli anelli successivi vengono montati in modo che i giunti non siano allineati.

Per il processo di prefabbricazione dei conci si veda la relazione PD2-C3A-TS3-3950.

L'impermeabilizzazione del rivestimento è garantita dall'uso di giunti elastomerici EPDM da inserirsi nella scanalatura prevista a questo scopo. Si prevedono dei giunti M385 87° di tipo "Groene Hart". Sono previsti per lavorare sotto pressioni massime di 25 bar per un'apertura di 3 mm e di 16 bar per un'apertura di 4 mm per un offset massimo teorico di 15 mm. Nel caso attuale devono resistere a pressioni di 10 bar.

#### 5. Modalità di lavoro e rendimenti lungo il tracciato

##### Assemblaggio Fresa (Caverna tecnica da Pk 60+600 a Pk 60+640)

- Durata fabbricazione fresa e trasporto a cantiere : circa 14-16 mesi.
- Durata montaggio/commissioning fresa e installazioni cantiere : circa 3-4 mesi
- Durata totale fabbricazione/montaggio/commissioning fresa 1 : circa **17-20 mesi** (15-17 mesi per fresa 2).

##### Scavo Zona Piemontese (circa 3200m da Pk 60+600 a Pk 57+400) :

- Rendimento medio previsto : 40-50% del tempo per lo scavo e montaggio anello ed un 50-60% per manutenzione, prospezione e trattamento in avanzamento. Quanto sopra equivale a una media di circa 8 anelli/gg o 12-15m/gg o 270-350m/mese
- Velocità di penetrazione attesa : 5-7m/hr : scavo medio anello 20-30min. e montaggio anello 20-30min
- Durata scavo : circa **12 mesi**.

##### Modifica TBM (Pk 57+400) :

- Ritiro nastro e messa a punto circuito idraulico (senza bolla d'aria)
- Commissioning impianto di trattamento dei fluidi bentonici da installare nella galleria artificiale



- Apertura parziale della ruota fino a 15-20% per permettere l'entrata di massi decimetrici
- Prove di tenuta della giunta del cuscinetto con pressioni fino a circa 7 bar (pressione nella parte bassa della camera + fluttuazione di 0,5bar)
- Preparazione linee di schiuma per uso di polimeri fluidificanti e coagulanti per agevolare l'estrazione del materiale con bentonite e ridurre consumo tubazioni
- Preparazione ingrassaggio spazzole con grasso ad alta densità
- Sostituzione di circa 50-60% dei dischi con scrapers
- Cambio tipologia conci: spessore 45 cm e classe C45/55
- Durata prevista modifica : **1-1,5 mesi** in caso tali modifiche vengano realizzate senza cunicolo di accesso al fronte della fresa.

#### Scavo transizione Zona Piemontese - Cenischia (circa 150m da Pk 57+400 a 57+250)

- Scavo confinato con pressioni variabili fino ad incontrare i depositi del Cenischia
- Rendimento medio previsto : 5-6 anelli/gg o 9-11m/gg
- Durata scavo prevista : circa 2-3 settimane
- Durata totale prevista per modifica e scavo : circa **2-2.5 mesi**.

#### Scavo Cenischia (circa 1200m da Pk 56+000 a Pk 57+250) :

- Modalità di scavo chiusa con pressioni in chiave di 5.6 bar (v. calcolo in allegato 1)
- Rendimento medio previsto: 6-10m/gg o 150-240 m/mese
- Durata prevista : circa **6 mesi** senza/con cambio utensili. In caso fosse necessario realizzare una revisione della testa (da evitare), si dovrà prevedere il trattamento del fronte da dentro la fresa al fine di ridurre il carico idrostatico attraverso la riduzione della permeabilità circostante ed il drenaggio controllato del freatico.

#### Scavo Transizione Cenischia - Zona a Scaglie (circa 50m dalla Pk 56+000 alla Pk 55+950) :

- Modalità di scavo chiusa con pressioni fino ad annullarsi
- Rendimento medio previsto: 6-10m/gg o 150-240 m/mese
- Durata prevista : circa **0.25 mesi** senza cambio utensili.

#### Modifica TBM (Pk 55+950) :

- Riconoscimento e trattamento per stabilizzazione e impermeabilizzazione del fronte
- Realizzazione di un cunicolo laterale per accesso al perimetro testa della fresa per rinforzo perimetro con placche hardox. Il cunicolo laterale avrà le stesse caratteristiche di quelle mostrate nell'elaborato PD2-C3A-TS3-4015 per gli interventi eccezionali.
- Modifica utensili con installazione 100% dischi da 19"
- Modifica apertura testa da ridurre a 5-8%
- Installazione pompe ad alta capacità per drenaggio acque dell'Ambin con capacità fino a circa 300-400 lt/sec.
- Attrezzatura (2 bracci indipendenti) per perforazioni/infilaggi di consolidamento attraverso lo scudo di coda e per perforazione a distruzione attraverso i conci, con giro di +/-180° e capacità di traslazione su monorotaia di 8-10m di escursione longitudinale (per trattamento di circa 4-6 anelli dietro lo scudo). Ciò permetterà di trattare in calotta



le zone con comportamento fortemente spingente al fine di ridurre il rischio di bloccaggio dello scudo nelle zone di grande copertura (v. Ambin) e di limitare il fenomeno differito di creep intorno al rivestimento nelle zone di faglia e delle carniole.

- Durata prevista modifica : **1,5-2 mesi.**

Scavo Zona a Scaglie (circa 950m dalla Pk 55+000 alla Pk 55+950) :

- Perforazione in avanzamento per riconoscimento geognostico fino a 20-30m
- Iniezioni orizzontali di consolidamento in avanzamento per trattamento faglie zone fortemente fratturate
- Ombrello di infilaggi in avanzamento per supporto calotta in entrata e uscita faglie e zone fortemente fratturate
- Velocità di penetrazione attesa : 3-5m/hr : scavo medio anello 30-40min. e montaggio anello 30-40min
- Rendimento medio previsto : 30-40% del tempo per lo scavo e montaggio anello ed un 60-70% per manutenzione, prospezione e trattamento in avanzamento. Quanto sopra equivale a una media di circa 5-6 anelli/gg o 9-11m/gg o 210-260m/mese.
- Durata scavo prevista : circa **4 mesi.**

Revisione fresa (Pk 55+000) : una volta passata la zona a scaglie si dovrà revisionare a fondo la fresa e tutte le sue installazioni per affrontare al meglio la tratta successiva di circa 3 km di rocce competenti (micascisti e gneiss dell'Ambin) con importanti coperture fino a 1400 m, elevati battenti idraulici e con presenza di faglie pluridecametriche sub-verticali.

Le problematiche previste in questa tratta sono bloccaggi della testa, eccessivo confinamento/bloccaggio e/o deformazione dello scudo, eccessiva convergenza del rivestimento, fessurazioni ed eventualmente rotture dei conci, forti entrate d'acqua, che si verificheranno in corrispondenza delle faglie/zone fratturate, che si prevedono essere comunque di lunghezza e frequenza limitata fino alla pk 52+000. A queste problematiche si aggiungeranno altri fenomeni quali distacchi, colpi di montagna (rock burst), venute d'acqua importanti.

La configurazione della fresa sarà quella atta a garantirne le massime prestazioni possibili (v. valori max. parametri meccanici, in particolare spinta e coppia), da accompagnare con un'attenta pianificazione della campagna e procedure di indagini, trattamenti e drenaggi da realizzare in avanzamento e dietro lo scudo.

Lo scavo avverrà in salita, per cui non vi sono rischi considerevoli di allagamento della fresa, dato che sul fondo con battenti idrici limitati (es. 20 cm) vi è la possibilità di avere delle portate considerevoli, in relazione alle massime venute d'acqua possibili. Si predisporrà comunque un adeguato sistema di pompaggio in corrispondenza della coda dello scudo al fine di evitare il ristagno di acqua in quella zona (dato che l'intradosso dei conci si trova a quota più alta – circa 60-65 cm). Le venute d'acqua possono comunque rallentare l'installazione dei conci od il riempimento a tergo di essi.

Sarà inoltre fondamentale la capacità di monitorare in tempo reale tutti i parametri operativi della fresa e dello stato tenso-deformativo del rivestimento, così come la facoltà di eseguire analisi incrociate e a ritroso dei dati per ridurre progressivamente i margini di rischio.

- Durata prevista revisione : circa **1 mese**.

#### Scavo Copertura Ambin-Clarea (circa 3000m dalla Pk 52+000 alla Pk 55+000)

- Perforazione in avanzamento per riconoscimento geognostico fino a 20-30m
- Iniezioni orizzontali di consolidamento in avanzamento per trattamento faglie pluridecamiche e zone fortemente fratturate previste in ordine progressivo di scavo alle Pk 54+950 e 52+000
- Ombrello di infilaggi in avanzamento per supporto calotta in entrata e uscita faglie e zone fortemente fratturate
- Perforazione a distruzione attraverso i conci per drenaggio acque e consolidamento ammasso per riduzione del confinamento
- Uso di sovrascavi adeguati (da realizzarsi con dispositivi –overboring systems - di tipo fisso od estensibile)
- Velocità di penetrazione attesa : 4-6m/hr : scavo medio anello 20-30min. e montaggio anello 20-30min
- Rendimento medio previsto : 30-50% del tempo per lo scavo e montaggio anello ed un 50-70% per manutenzione, prospezione e trattamento in avanzamento. Quanto sopra equivale a una media di circa 4-8 anelli/gg o 8-14m/gg o 200-320 m/mese.
- Durata scavo prevista : circa **12 mesi**.

Per quanto riguarda il planning, si veda il documento PD2-C3A-TS3-7853 del capitolo 35-01-01.

## 6. Calcolo pressioni zona Cenischia

Si calcola la pressione  $P_{st(S1)}$  misurata dal sensore collocato nella parte alta della camera e corrispondente a circa 0,5m sotto la chiave della sezione di scavo. Da tale valore si può derivare un diagramma di pressioni nella camera in funzione della densità apparente del materiale in essa contenuta ( $\gamma_{SL}$ ), che sarà un mix di materiale di scavo, bentonite, acqua e schiume additivate.

Il calcolo si basa sul metodo di Anagnostou e Kovari (1996) basato sulla formulazione di Horn per terreni sciolti.

La pressione  $P_{st}$  corrisponde al valore limite ultimo (SLU tensioni efficaci) trasmesso in calotta dall'acqua e dalla struttura del terreno durante lo scavo (situazione di breve periodo). Si veda l'allegato 1 per i richiami teorici (formula) e le assunzioni effettuate.

Per quanto riguarda i valori adottati per la formula di Anagnostou & Kovari, si assume quanto segue:

- Peso specifico totale del terreno  $\gamma=19,3 \text{ kN/m}^3$
- Coesione  $c' = 0$
- $Z_w = 0, 10, 20$  o  $25 \text{ m}$  a seconda della posizione.



- $F_0, F_1, F_2$  e  $F_3$  sono fattori adimensionali che dipendono dall'angolo di attrito  $\phi'$ , da H, da D e da altri parametri secondo gli abachi (vedere allegato 1)
- Peso volumico del fango  $\gamma_{SL} = 11,5 \text{ kN/m}^3$
- Angolo di attrito  $\phi' = 26,3^\circ$
- Fattore di Sicurezza = 1,2 da applicare all'angolo di attrito, altrimenti 1
- Sovraccarico in superficie  $q = 0$
- Tolleranza del sensore di pressione =  $\pm 0,2$  bar, in quanto si considera un controllo della pressione con la sola iniezione di fluido bentonitico senza bolla d'aria.

In allegato 1 vengono illustrati i risultati del calcolo in forma tabellare e grafica con riferimento a 4 posizioni diverse sotto la Val Cenischia (progressive ed altezze della falda diverse).

## 7. Calcolo delle spinte necessarie per l'avanzamento

Le convergenze elevate in alcune tratte possono provocare la chiusura dell'intercapedine tra scudo ed ammasso e richiedere dunque spinte notevoli per poter vincere l'attrito dovuto al contatto. In particolare, lungo il tracciato, le faglie nei micascisti di Clarea sotto grandi coperture rappresentano la situazione più difficile da questo punto di vista. Si è perciò verificato che in questa tratta, la spinta nominale massima della fresa di 120 MN possa essere sufficiente.

Per valutare la lunghezza di chiusura e le pressioni dell'ammasso, si è utilizzata la sezione di verifica C2 già mostrata nei documenti PD2-C3A-TS3-3949 e PD2-C3A-TS3-3950; in particolare, si è considerato il profilo longitudinale di spostamento (LDP) che tiene conto del contatto scudo-ammasso roccioso (figure 3 e 4). Bisogna considerare la configurazione geometrica effettiva della macchina, per cui l'intercapedine è massima in chiave mentre è minima in corrispondenza dell'arco rovescio. Il contatto avviene quindi prima in arco rovescio, poi progressivamente nei piedritti fino alla chiusura totale dell'intercapedine. Inoltre le spinte dell'ammasso in arco rovescio provocano una traslazione verso l'alto dello scudo che viene a ridurre la distanza libera (dovuta all'intercapedine) in calotta.

Il contatto avviene per una lunghezza di circa 4 m, ovvero a 6 m dalla testa fresante. Si considera la chiusura totale dell'intercapedine: il contatto parziale che avviene prima di questo punto – in arco rovescio e poi nei piedritti – non è tale da influenzare molto i valori di spinta per cui è stato trascurato. In tale punto di chiusura totale si stima che lo spostamento radiale in calotta effettivo -considerata la traslazione- è pari a circa 20 cm mentre in arco rovescio a 10 cm. Si considera lo spostamento effettivo  $u$  (quello tale da determinare la chiusura dell'intercapedine), che è dato dalla seguente formula:

$$u = u_c - u_0$$

con  $u_c$  lo spostamento totale calcolato (dalla LDP), pari a 32 cm in calotta in questo caso e  $u_0$  lo spostamento al fronte, pari a 12 cm.

Questo corrisponde al sovrascavo sul diametro  $\Delta D$  pari a 25 cm (5-7 cm di sovrascavo di base dovuto ai dischi + 18-20 cm con i dispositivi adeguati) oltre che alla conicità disponibile a quella posizione, assunta pari a 5 cm sul diametro (è pari a 10 cm in corrispondenza della coda dello scudo).



Dato che lo scudo si caricherà progressivamente e data la conicità, si considera, dalle curve caratteristiche, la pressione dell'ammasso sulla coda dello scudo (distanza di 10 m), che è pari a 2.85 MPa.

Queste considerazioni sono basate sui calcoli convergenza-confinamento effettuati ma anche su documenti di letteratura sull'argomento. Si veda in particolare Ramoni e Anagnostou (2011) e Zhao (2012).

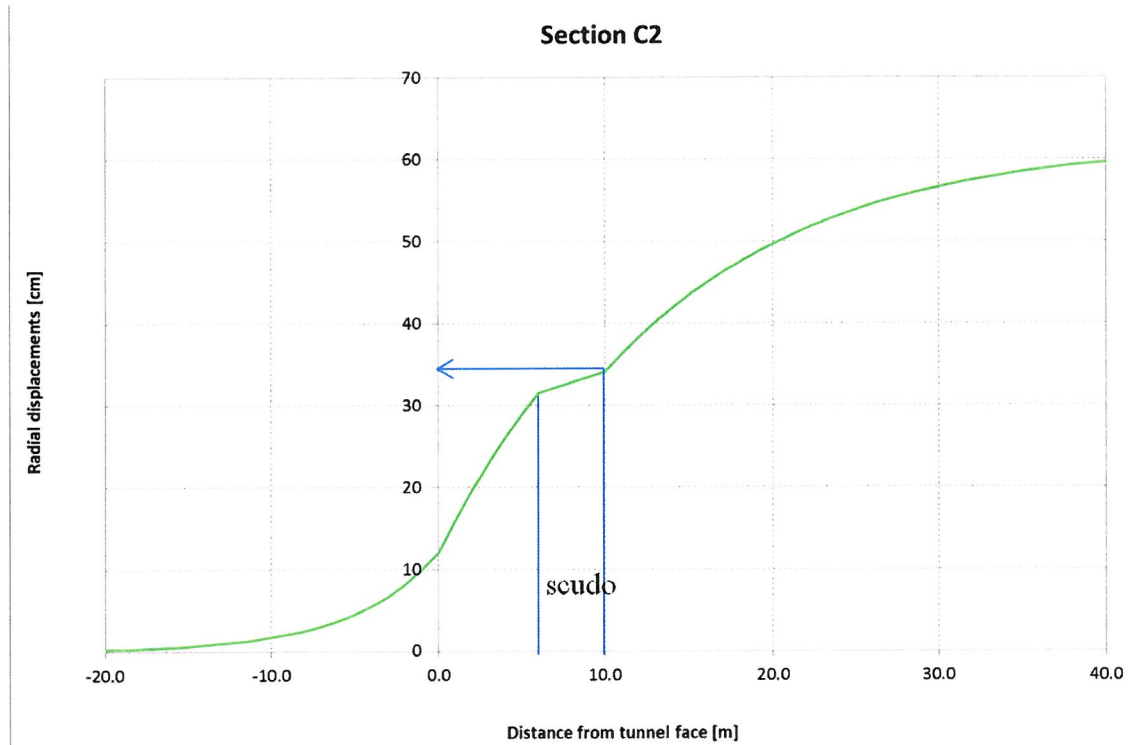


Figura 3 – Profilo longitudinale di spostamento considerando il confinamento dello scudo per la sezione C2

### Section C2

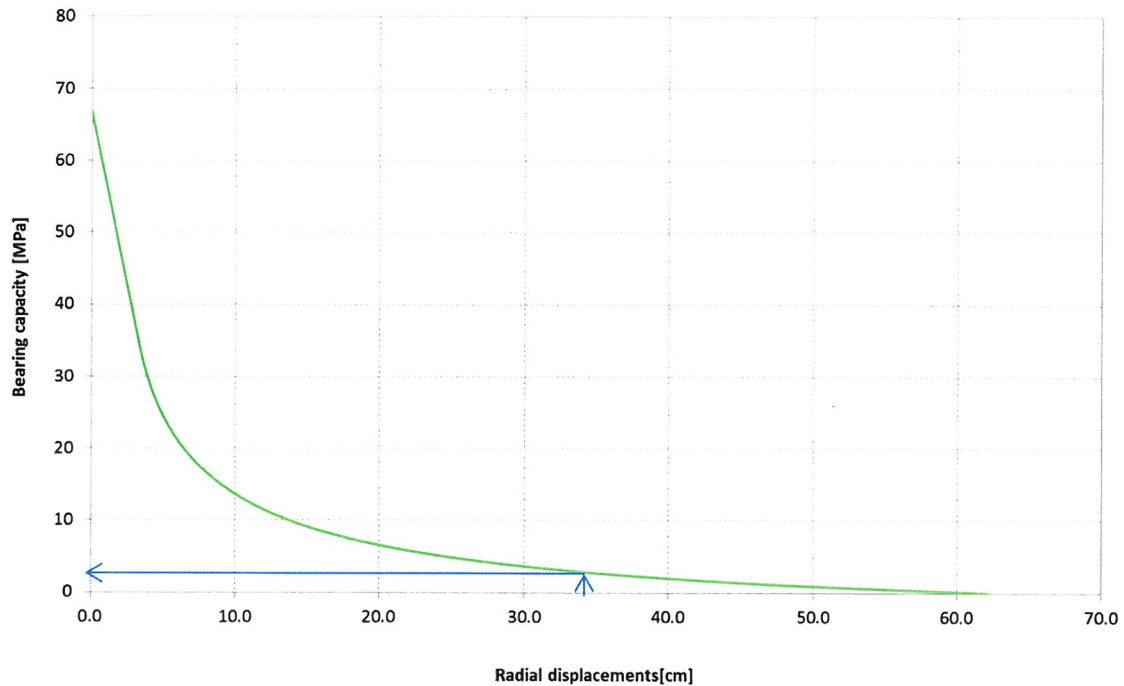


Figura 4 – Curva caratteristica per la sezione C2

La forza di spinta necessaria per vincere l'attrito e' stimata con la formula seguente:

$$F_f = \mu p 2\pi R L$$

Con:

- $\mu$  coefficiente di attrito. Ramoni e Anagnostou (2011) suggeriscono di usare  $\mu=0.15-0.3$  per il coefficiente cinetico durante l'avanzamento e  $0.25-0.45$  per il coefficiente statico usato per riprendere lo scavo dopo un fermo macchina. Il coefficiente di  $0.3$  è stato usato in questa verifica (come suggerito da Zhao, 2012). Tale valore non tiene conto di una eventuale lubrificazione dello scudo con iniezione di fluido bentonitico (ipotesi conservativa)
- $p$  pressione dell'ammasso, considerando il valore in corrispondenza alla coda dello scudo
- $R$  raggio dello scudo
- $L$  lunghezza di contatto (4 m).

Si ottiene  $F_f=105$  MN. A questo bisogna sommare la spinta alla testa  $F_N$ , che puo' essere calcolata come segue per la configurazione della macchina con sovrascavo (si suppone l'uso di circa 50 cutters da 17'' e 20 cutters da 19''):

$$F_N=50 \times 270 + 20 \times 300 = 19500 \text{ kN}$$

che puo' essere ridotta a circa 15 MN, considerando un fattore di non-contemporaneità di 0.7-0.8. Si ottiene dunque una spinta totale nominale pari a circa 120 MN.

Bisogna comunque considerare che il metodo curve caratteristiche-LDP tende a sovrastimare la spinta rispetto a modelli assialsimmetrici o 3D (si veda Zhao, 2012 a questo proposito).

Durante il sottoattraversamento della Val Cenischia, data la coesione quasi nulla dei terreni, lo scudo sarà a contatto con il terreno lungo quasi tutto il suo sviluppo. Tuttavia le pressioni di

contatto –dovute solo alla tensioni efficaci con la TBM in avanzamento- sono di gran lunga inferiori. Considerando  $p=138.4$  kPa e  $L=9$  m, si ottiene  $F_f=11.6$  MN.

Per quanto riguarda la stima delle sollecitazioni trasmesse all'anello in caso di manovra di "sbloccaggio" (es: spinte asimmetriche sui conci), si considera tale evenienza da verificare in fase esecutiva.

## 8. Trattamenti prima e dopo lo scavo

Uno dei requisiti fondamentali della fresa mista illustrata nel presente documento, é la possibilità di scavare sia in modalità chiusa in presenza di forti pressioni idrostatiche (vedi calcolo delle pressioni di lavoro zona Cenischia in allegato 1) come altresì essere capace di scavare in modalità aperta attraverso zone di forte instabilità con possibili venute d'acqua ad alta pressione (zona a scaglie).

Per quanto riguarda lo scavo in modalità chiusa, può sorgere l'esigenza di dover intervenire sulla testa della fresa per una manutenzione straordinaria non programmata, dovuta per esempio ad un consumo eccessivo degli utensili o al bloccaggio delle aperture. In entrambi i casi ciò comporta il parziale o totale svuotamento della camera di materiale e la necessità di entrare con personale qualificato e autorizzato in condizioni iperbariche che potrebbero richiedere pressioni superiori ai 5 bar al fine di poter ispezionare correttamente il fronte e la ruota di taglio.

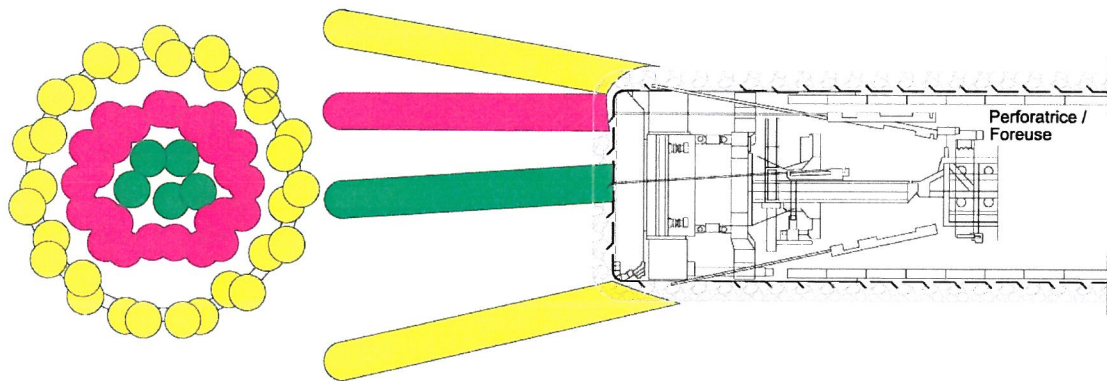
Per fare ciò é necessario eseguire un trattamento previo del fronte (da dentro la macchina in caso per varie ragioni non sia possibile dalla superficie), che può consistere nella creazione di un semplice cake di bentonite o in un blocco di materiale trattato con iniezioni di malta cementizia e/o additivata con sostanze reagenti all'acqua.

Quanto sopra é necessario per permettere alla fresa di fermarsi in una medio fortemente impermeabile, che permetta nell'immediato intorno di pompare acqua e ridurre a valori accettabili la pressione idrostatica e di conseguenza quella della bolla d'aria necessaria a mantenere il fronte in condizioni stabili durante le operazioni di manutenzione.

Per quanto riguarda invece lo scavo in modalità aperta, altra caratteristica della fresa é quella di poter eseguire indagini e trattamenti in avanzamento come altresì migliorare i parametri dell'ammasso una volta passato lo scudo, ovvero da un lato la capacità di identificare e trattare efficacemente possibili zone con forte rischio di instabilità e di venute d'acqua e dall'altra poter intervenire sull'ammasso da dentro il tunnel eseguito.

A tale scopo la fresa deve essere dotata di sistemi di perforazione ed iniezione con una distanza e raggio d'azione sufficienti a garantire le condizioni di sicurezza e produzioni medie previste. Le iniezioni saranno eseguite al fronte attraverso la testa fresante o in periferia attraverso lo scudo, come illustrato in Figura 5, in maniera a simile a quanto effettuato nel caso della TBM di Hallandsas (Burger and Dudit, 2011).





*Figura 5 – Schema sistema di iniezioni in avanzamento*

Si possono inoltre effettuare, in casi più critici, degli infilaggi a partire dalla coda dello scudo, iniettati eventualmente con miscele di resine chimiche, come nel caso della TBM di Abdalajis (Grandori e Romualdi, 2006).

In caso ciò non sia sufficiente e si produca un bloccaggio della fresa, si dovrà valutare l'opportunità di realizzare dei cunicoli laterali lungo lo scudo, in caso di ammasso stabile, o vere e proprie gallerie laterali (bypass) che permettano di raggiungere il fronte di scavo ed effettuare tutti quei trattamenti necessari per permettere lo sbloccaggio ed il ripristino delle regolari operazioni di scavo con la fresa. A tale scopo si fa riferimento agli schemi illustrati nelle seguenti figure 6 e 7.

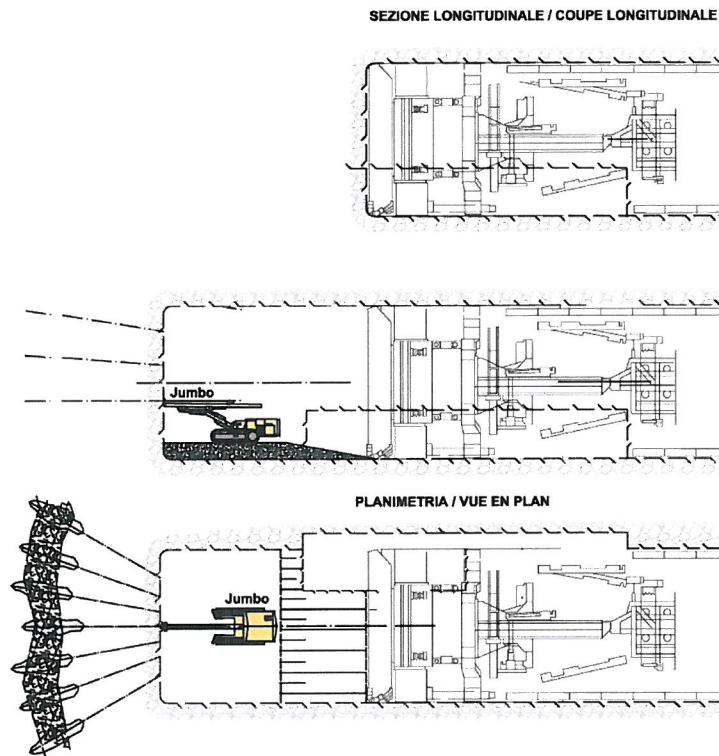


Figura 6 – Schema di scavo in mina lungo la fresa per intervento in avanzamento allo scavo

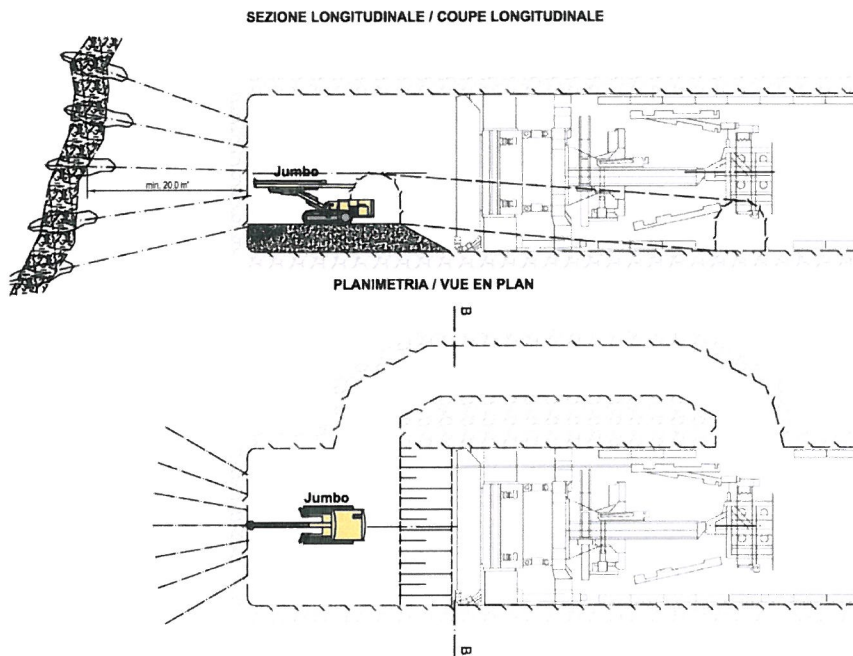


Figura 7 – Schema di scavo di galleria laterale per intervento in avanzamento allo scavo

Per maggiori dettagli su questi interventi, si vedano gli elaborati PD2-C3A-TS3-4014e4015\_ interventi eccezionali scavo in meccanizzato TBM scudata.

Per la localizzazione di tali trattamenti lungo il tracciato in funzione dei rischi geologici/idrogeologici/geotecnici, si vedano i documenti PD2-C3A-TS3-3951, PD2-C3A-TS3-3948 (profili long. geotecnici), PD2-C3B-TS3-0088 e PD2-C3B-TS3-0089 (analisi dei rischi geologici). In particolare, in questo paragrafo si sono considerati i rischi seguenti:

- Permeabilità superiore alle previsioni
- Presenza di venute d'acqua persistenti (costanti)
- Carsismo
- Faglie non previste (o di entità superiore alle previsioni)
- Instabilità del fronte di scavo
- Difficoltà di realizzare interventi in condizioni iperbariche.

Per i tipi di iniezione si veda il documento PD2-C3A-TS3-3949.

## 9. Conclusioni

In questo documento si è dimensionata una fresa mista scudata per poter affrontare lo scavo del Tunnel di Base lato Italia per 8.6 km circa in ammassi rocciosi e terreni dalle caratteristiche notevolmente diverse.

Le caratteristiche di base sono state illustrate, così' come gli interventi in corrispondenza di faglie e zone geotecniche difficili.

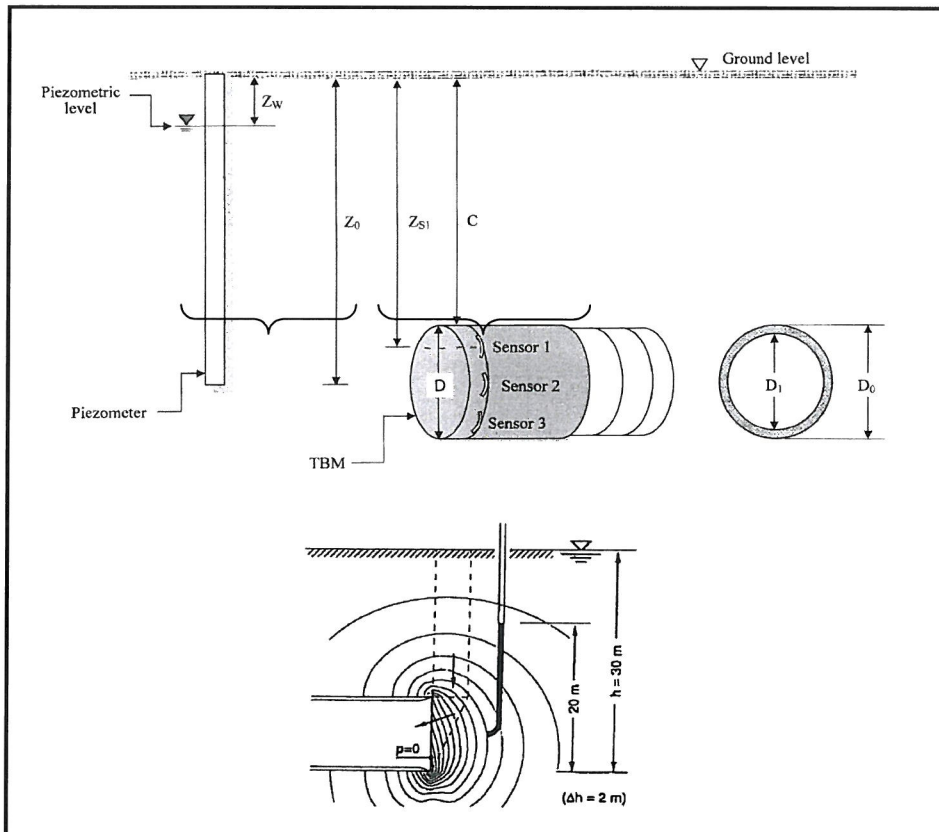


## **Allegato 1: Calcolo delle pressioni al fronte sotto la Val Cenischia**

**1) Definizione dei parametri utilizzati per il calcolo**

Simbolo	Definizione	Unità
C	Copertura (cf punto 2)	m
D	Diametro di scavo del tunnel (cf punto 2)	m
$Z_0$	Profondità tra la superficie (piano campagna) e l'asse del tunnel (cf punto 2)	m
$Z_{s1}$	Profondità tra la superficie (piano campagna) ed il sensore di pressione 1 (cf punto 2)	m
$Z_w$	Profondità tra la superficie (piano campagna) ed il livello della falda (cf punto 2)	m
$\gamma$	Peso volumico totale del terreno	kN/m <sup>3</sup>
$\gamma'$	Peso volumico del terreno alleggerito	kN/m <sup>3</sup>
$\gamma_{sl}$	Peso volumico del fango	kN/m <sup>3</sup>
$\gamma_w$	Peso volumico dell'acqua	kN/m <sup>3</sup>
$P_s$	Pressione di fango applicata al fronte	kPa
$P_{st}$	Pressione target di fango applicata al fronte	kPa
$P_{st(Crown)}$	Pressione target di fango del tunnel in calotta	kPa
$P_{st(s1)}$	Pressione target di fango al sensore di pressione n°1	kPa
$P_{s(s1)}$	Pressione di fango al sensore di pressione n°1	kPa
$v$	Tolleranza dei sensori di pressione	kPa
q	Sovraccarico medio in superficie	kPa
$\Delta h$	Variazione di altezza piezometrica tra esterno ed interno del tunnel (cf punto 2)	m
c'	Coesione efficace	kPa
$\phi'$	Angolo di attrito efficace	°
$eZ_{s1}$	Spessore di TBM tra sensore di pressione n°1 e profondità di scavo ( $Z_{s1}-C$ )	m
S	Fattore di sicurezza	/
$F_0$	Coefficiente adimensionale definito da Anagnostou e Kovari su abaco (cf punto 3)	/
$F_1$	Coefficiente adimensionale definito da Anagnostou e Kovari su abaco (cf punto 3)	/
$F_2$	Coefficiente adimensionale definito da Anagnostou e Kovari su abaco (cf punto 3)	/
$F_3$	Coefficiente adimensionale definito da Anagnostou e Kovari su abaco (cf punto 3)	/

**2) Illustrazione**



# Analisi della stabilità del fronte per TBM a contropressione di fango (slurry)

Metodo di G. Anagnostou e K. Kovari  
 Applicazione: Tunnel di base lato Italia

## 3) Richiami teorici

### 3.1) Teoria di Anagnostou e Kovari sul calcolo della pressione effettiva minima da applicare al fronte

- > Basato sul metodo dell'equilibrio limite
- > Membrana omogenea di fango che si sviluppa al fronte
- > Utilizzo del modello della membrana

### 3.2) Calcolo della pressione target di fango sul contorno del tunnel

$P_{St(crown)}$  = Pressione dell'acqua + Pressione del terreno + Pressione dovuta al sovraccarico + tolleranza del sensore di pressione



- A =  $(C-Z_w) \cdot \gamma_w$
- B =  $F_0 \cdot \gamma \cdot D - F_1 \cdot c' + F_2 \cdot \gamma \cdot \Delta h - F_3 \cdot c' \cdot \Delta h / D$  (servirsi degli abachi qui di seguito per determinare  $F_0, F_1, F_2$  e  $F_3$ )
- C = Calcolato utilizzando gli abachi di Atkinson e Mair (1977)
- D = Tolleranza del sensore di pressione (se non conosciuta si può utilizzare 20kPa (0.2 bars))

**Attenzione:**  $\Delta h = 0$  nel caso di un tunnel a contropressione di fango utilizzando il modello della membrana

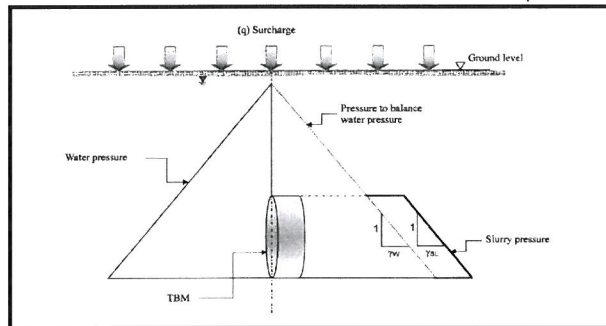
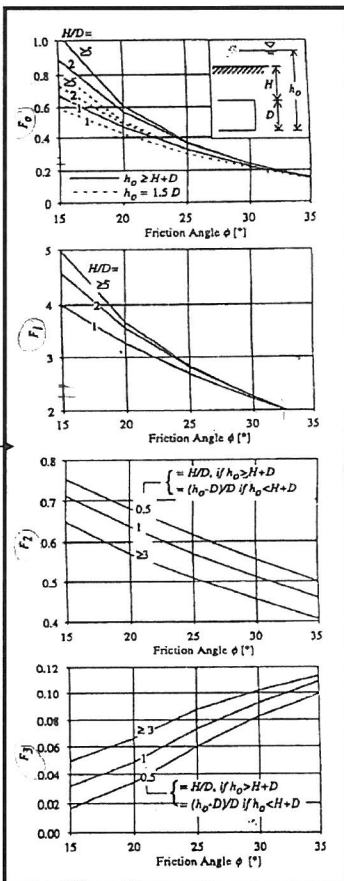
### 3.3) Calcolo della pressione target a livello del sensore di pressione n°1

- > La pressione da applicare dipende dalla posizione del sensore sulla TBM
- > La pressione da applicare dipende anche dalla distanza tra scavo e peso volumico del fango  $\gamma_{SL}$

$$P_{St(S1)} = P_{st(crown)} + (Z_{S1} - C) \cdot \gamma_{SL} = P_{St}$$

### 3.4) Durante lo scavo, la pressione da applicare non può scendere oltre $P_s$

$$P_s = P_{St(S1)} = P_{St(S1)} - v$$





**4) Applicazione numerica**

**4.1) Geometria**

Posizione	progressiva (PK)	C	Z <sub>w</sub>
Pont Ventoux	Da 56 a 56.4	45	25
Valle 1	Da 56.4 a 56.8	45	20
Valle 2	Da 56.8 a 56.9	48	10
Valle e torrente	Da 56.9 a 57.2	48	0

**4.2) Dati di ingresso**

Simbolo	Valore	Coefficiente di sicurezza	Valore con coefficiente di sicurezza
D	10	1	10
eZ <sub>s1</sub>	0,5	1	0,5
γ	19,3	1	19,3
γ' (= γ - γ <sub>w</sub> )	9,5	1	9,5
γ <sub>sl</sub>	11,5	1	11,5
γ <sub>w</sub>	9,8	1	9,8
v	50	1	50
q	0	0	0
Δh	0	1	0
c'	0	1,2	0
φ'	26,3	1	26,3
tg(φ')	0,493941271	1,2	0,592729525

Questi valori saranno utilizzati per il calcolo

**4.3) Determinazione dei coefficienti adimensionali F<sub>0</sub>, F<sub>1</sub>, F<sub>2</sub> e F<sub>3</sub>**

C	C/D	C+D	h <sub>0</sub>	(h <sub>0</sub> -D)/D	1.5*D	F <sub>0</sub>	F <sub>1</sub>	F <sub>2</sub>	F <sub>3</sub>
45	4,5	55	30	2	15	0,34	2,75	0,5	0,09
45	4,5	55	35	2,5	15	0,34	2,75	0,5	0,09
48	4,8	58	48	3,8	15	0,34	2,75	0,52	0,085
48	4,8	58	58	4,8	15	0,34	2,75	0,54	0,082

Déterminés sur abaques.Cf point 3.2

**4.4) Calcolo della pressione target di fango in calotta del tunnel P<sub>st(Crown)</sub>**

C	Z <sub>0</sub>	Z <sub>w</sub>	A	B	C	D	P <sub>st(Crown)</sub>
45	50	25	196	32,3	0	50	278,3
45	50	20	245	32,3	0	50	327,3
48	53	10	372,4	32,3	0	50	454,7
48	53	0	470,4	32,3	0	50	552,7

**4.5) Calcolo della pressione target di fango n°1 P<sub>st(S1)</sub>**

C	Z <sub>s1</sub>	P <sub>st(crown)</sub>	(Z <sub>s1</sub> -C)*γ <sub>SL</sub>	P <sub>st(S1)</sub> = P <sub>st</sub>	P <sub>st(S1)</sub> = P <sub>st</sub> [BAR]
45	45,5	278,3	5,75	284,05	2,8
45	45,5	327,3	5,75	333,05	3,3
48	48,5	454,7	5,75	460,45	4,6
48	48,5	552,7	5,75	558,45	5,6

**4.6) Durante lo scavo la pressione non può scendere oltre P<sub>s</sub>**

P <sub>st(S1)</sub>	v	P <sub>s</sub>	P <sub>s</sub> [BAR]
284,05	50	234,05	2,3
333,05	50	283,05	2,8
460,45	50	410,45	4,1
558,45	50	508,45	5,1



## Analisi della stabilità del fronte per TBM a contropressione di fango (slurry)

Metodo di G. Anagnostou e K. Kovari

Applicazione: Tunnel di base lato Italia

### 5) Rappresentazione grafica

Posizione	$P_k$	$P_{St(S1)} = P_{St}$ [BAR]	$P_s$ [BAR]
Pont Ventoux	56,0	2,8	2,3
	56,1	2,8	2,3
	56,2	2,8	2,3
	56,3	2,8	2,3
	56,4	2,8	2,3
Valle 1	56,4	3,3	2,8
	56,5	3,3	2,8
	56,6	3,3	2,8
	56,7	3,3	2,8
	56,8	3,3	2,8
Valle 2	56,8	4,6	4,1
	56,9	4,6	4,1
Valle e torrente	56,9	5,6	5,1
	57,0	5,6	5,1
	57,1	5,6	5,1
	57,2	5,6	5,1

