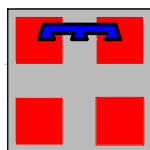


AUTOSTRADA ASTI - CUNEO S.p.A.



PROVINCIA DI ASTI



REGIONE PIEMONTE



PROVINCIA DI CUNEO

COLLEGAMENTO AUTOSTRADALE ASTI - CUNEO

TRONCO II A21 (ASTI EST) - A6 (MARENE)

LOTTO 6 RODDI - DIGA ENEL

VERIFICA DI ASSOGGETTABILITA' EX ART. 20 D.LGS. 152/06
STRALCIO DEL PROGETTO ESECUTIVO

OPERE D'ARTE IN SEDE

GALLERIA DI VERDUNO

GALLERIA NATURALE

RELAZIONE SPECIFICHE TECNICHE SCAVO MECCANIZZATO

Aggiornato: 00	Data : Marzo 2014	Descrizione: EMISSIONE	Redatto: Ing. Gatti	Controllato: Ing. Ossesia	Approvato: Ing. Ghislandi	Codifica: 2.6 E - r D.2.2.02 <small>Lotto Prog. Tipo Elaborato</small>
Aggiornato:	Data :	Descrizione:	Redatto:	Controllato:	Approvato:	Data: MARZO 2014
Aggiornato:	Data :	Descrizione:	Redatto:	Controllato:	Approvato:	Scala: -



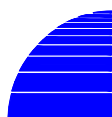
PROGETTISTA e RESP. INTEGRAZIONE PRESTAZIONI SPECIALISTICHE:

Dott. Ing. Enrico Ghislandi
Albo di Milano
N° A 16993

CONSULENZA SPECIALIZZATA

ROKSOJL S.p.A.
CONSULENZA E ASSISTENZA TECNICA
nel campo della GEOINGEGNERIA

CONCESSIONARIA:



AUTOSTRADA ASTI - CUNEO S.p.A.



INDICE

1. INTRODUZIONE.....	2
2. DETERMINAZIONE DELLE PRESSIONI DA MANTENERE IN CAMERA DI SCAVO.....	3
2.1. ANALISI DEL COMPORTAMENTO DEL FRONTE DI SCAVO.....	3
2.2. PRESSIONI IN CAMERA DI SCAVO.....	6
2.2.1. <i>Analisi alle differenze finite</i>	6
2.2.2. <i>Analisi 1 (Unità 7 - H = 90m)</i>	10
<i>Parametri geotecnici di calcolo</i>	11
<i>Esame e valutazione dei risultati</i>	11
2.2.3. <i>Analisi 2 (Unità 7a - H = 70 m)</i>	13
<i>Parametri geotecnici di calcolo</i>	14
<i>Esame e valutazione dei risultati</i>	15
2.2.4. <i>Analisi 3 (Unità 6 - H = 40 m)</i>	16
<i>Parametri geotecnici di calcolo</i>	17
<i>Esame e valutazione dei risultati</i>	18
2.2.5. <i>Sintesi dei risultati</i>	19
3. DETERMINAZIONE DEI VALORI DI SPINTA PER L'AVANZAMENTO DELLA TBM21	
3.1. PRESSIONI AL CONTORNO DELLO SCUDO.....	21
3.2. SPINTA PER L'AVANZAMENTO DELLA TBM	26
4. PRINCIPALI CARATTERISTICHE DELLA MACCHINA	31
5. PARAMETRI OPERATIVI DELLA MACCHINA E DATI DI SCAVO	32
5.1. DATI SULLE CARATTERISTICHE DEI TERRENI	32
5.2. DATI SULLA PRODUZIONE	33
5.3. DATI DI SCAVO – VOLUMI DI SCAVO E RIEMPIMENTO	34
5.4. DATI DI SCAVO – PARAMETRI DELLA MACCHINA.....	35
5.5. PARAMETRI DI PRESSIONE IN CAMERA DI SCAVO	36
5.6. GRAFICI DI CONTROLLO.....	36
6. CONSIDERAZIONI CONCLUSIVE.....	39



1. INTRODUZIONE

Oggetto della presente relazione sono le modalità di scavo mediante TBM del tipo EPB della galleria naturale “Verduno”, opera facente parte del Lotto 6, Tronco 2 del collegamento autostradale A6-A21 (Asti-Cuneo).

Nel seguito si esaminano nel dettaglio, per le principali Formazioni geologiche interessate, le pressioni al fronte da utilizzare nel corso degli scavi e le spinte necessarie per consentire l’avanzamento della macchina.

Si evidenziano inoltre i principali “parametri operativi” e “dati di scavo” da tenere sotto controllo durante gli avanzamenti. Tali parametri permetteranno, in corso d’opera, di calibrare le modalità di avanzamento anche in relazione alla risposta raccolta dal sistema di monitoraggio predisposto, in galleria ed a piano campagna.



2. DETERMINAZIONE DELLE PRESSIONI DA MANTENERE IN CAMERA DI SCAVO

Nel presente capitolo si riportano le considerazioni svolte per la definizione della pressione da mantenere in camera di scavo nelle tratte più significative della galleria in esame.

2.1. ANALISI DEL COMPORTAMENTO DEL FRONTE DI SCAVO

La valutazione di come evolve lo stato tensionale nell'ammasso roccioso a seguito dell'apertura di una galleria è possibile solo attraverso l'attenta analisi della risposta deformativa del fronte e del cavo, in termini di estrusione, pre-convergenza e convergenza. La loro entità ci permette di effettuare valutazioni nei riguardi della stabilità a breve e a lungo termine della galleria.

In particolare, l'elemento centrale per l'analisi dell'evoluzione dei fenomeni deformativi è il comportamento del fronte di scavo, inteso come il prisma di terreno individuato a monte del fronte dallo stesso profilo di scavo per una profondità di circa un diametro.

Durante le fasi di avanzamento, passando da uno stato tensionale tridimensionale ad uno stato piano, si determinano importanti ridistribuzioni nel nucleo al fronte. Se il nucleo non è costituito da materiale sufficientemente resistente, tale da mantenere in campo elastico il proprio comportamento tenso-deformativo, si sviluppano fenomeni deformativi e plasticizzazioni rilevanti in avanzamento sul fronte, cui conseguono il detensionamento e il decadimento delle caratteristiche geomeccaniche del terreno al contorno del cavo. Se, viceversa, il comportamento del nucleo d'avanzamento si mantiene in campo elastico, esso svolge un'importante azione di precontenimento del cavo, che si mantiene a sua volta in condizioni elastiche, con una benefica riduzione delle pressioni agenti sulle opere di sostegno (in questo caso dapprima lo scudo



metallico e successivamente l'anello in conci prefabbricati). Tale comportamento è principalmente condizionato da:

- le caratteristiche di resistenza e deformabilità dei terreni attraversati;
- i carichi litostatici corrispondenti alla copertura;
- le pressioni idrostatiche connesse alla quota di falda;
- la forma e le dimensioni della sezione di scavo;
- gli eventuali sovraccarichi in superficie;
- le modalità di avanzamento (per scavi mediante EPB, la pressione al fronte).

Il comportamento del fronte di scavo, al quale è legato quello della cavità, può essere, secondo l'approccio Adeco-RS ("Analisi delle deformazioni controllate nelle rocce e nei suoli" – Lunardi 2000) sostanzialmente di tre tipi:

- Categoria A: "stabile"
- Categoria B: "stabile a breve termine"
- Categoria C: "instabile"

Per la definizione delle categorie di comportamento delle diverse tratte analizzate si rimanda alla relazione tecnica e di calcolo.

L'azione stabilizzante operata dalla TBM in fase di avanzamento è duplice: da un lato si ha l'azione di sostegno del fronte operata dalla testa fresante (che presenta aperture per l'ingresso del materiale generalmente in percentuale pari al 32%); dall'altro l'azione di pre-confinamento del fronte operata dalla pressione mantenuta in camera di scavo.



Quest'ultima in particolare può consentire di esercitare pressioni di entità tale da mantenere il terreno in condizioni pressoché indisturbate, in termini tensionali e deformativi. Il valore di pressione deve essere scelto nell'ottica di mantenere il nucleo al fronte, come precedentemente discusso, in condizioni elastiche, allo scopo di minimizzare il decadimento dei parametri di resistenza e deformabilità del terreno e controllare le pressioni agenti sul cavo (scudo metallico e anello di rivestimento).

La determinazione delle pressioni di contenimento del fronte è stata effettuata sulla base dei risultati ottenuti da una serie di analisi alle differenze finite condotte con il codice di calcolo FLAC 7.0. Le analisi sono state sviluppate, con riferimento a diverse condizioni geomeccaniche e di copertura, mediante modelli assialsimmetrici, che hanno consentito di:

- Determinare la linea caratteristica del fronte, valutando gli spostamenti dell'ammasso allo scavo al variare della pressione di contenimento;
- Valutare la plasticizzazione dell'ammasso in avanzamento in funzione della pressione esercitata sul fronte.

Le analisi sono state condotte in sforzi efficaci, così da valutare la pressione da prevedere in camera di scavo (**s'**) per regolare il comportamento tenso-deformativo dell'ammasso al fronte e mantenerlo il più possibile in condizioni elastiche; a questa pressione viene poi sommata la componente di controbilanciamento delle pressioni idrostatiche (**u**), laddove si voglia evitare l'innescò di significativi fenomeni di filtrazione. Nel dettaglio:

$$S_{\text{(pressione in camera di scavo)}} = s' + u \quad (\text{kPa})$$

Nel seguito si valuteranno nel dettaglio i valori di pressioni correlati ai diversi scenari di analisi, così da individuare, per ciascuna tratta di galleria, il valore progettualmente più idoneo.

2.2. PRESSIONI IN CAMERA DI SCAVO

Nel seguito si riportano i risultati delle analisi alle differenze finite condotte. Si riportano inoltre, in conclusione, i valori scelti in sede di progetto, tenendo conto anche del contributo necessario per contrastare, almeno parzialmente, la spinta determinata dal battente idraulico, secondo lo schema riportato nella Figura 1 seguente, dove la pressione di bilanciamento in camera di scavo (in grigio) consente di contrastare le pressioni dell'ammasso al fronte (marrone) e della spinta idrostatica (azzurro).

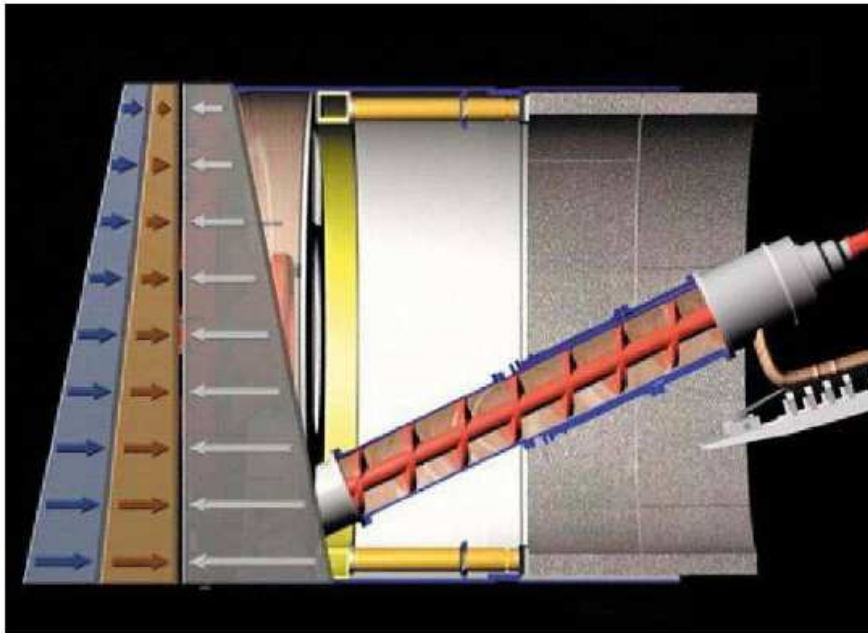


Figura 1: Valutazione della pressione in camera di scavo

2.2.1. Analisi alle differenze finite

Come già anticipato le analisi alle differenze finite condotte hanno fatto riferimento alle condizioni geomeccaniche e di copertura ritenute più rappresentative per la galleria in esame, che vengono riassunte nella Tabella 1 seguente.



ANALISI	FORMAZIONE	COPERTURA
1	Unità 7	90,0 m
2	Unità 7a	70,0 m
3	Unità 6	40,0 m

Tabella 1: Analisi alle differenze finite

Ciascuna analisi è stata condotta impiegando il codice di calcolo FLAC 7.0 (Fast Lagrangian Analysis of Continua), sviluppato da ITASCA Consulting, il quale consente di affrontare problemi di meccanica del continuo, determinando gli stati tensionali e deformativi in un dominio bidimensionale, le cui caratteristiche sono definite da leggi di comportamento, di tipo elastico o plastico, e da imposte condizioni al contorno, implementando il metodo delle differenze finite. Tale metodo si basa sulla discretizzazione delle equazioni differenziali che governano il problema fisico in esame, attraverso la sostituzione delle derivate con quozienti di differenze finite. In questo modo, le equazioni differenziali vengono trasformate in equazioni algebriche, da risolversi in successivi passi di calcolo. L'algoritmo di calcolo segue uno schema lagrangiano denominato "esplicito per integrazione diretta nel tempo" (explicit time marking), il quale è in grado di lavorare agevolmente e molto velocemente per sistemi con grandi deformazioni, con stati di collasso molto avanzati e in condizioni di instabilità (la possibilità di giungere al collasso non è infatti limitata da problemi di stabilità numerica, quale l'invertibilità di matrici). L'adattamento del metodo alle differenze finite a casi di griglia di forma qualunque segue l'approccio di Wilkins M.L..

La discretizzazione viene operata sovrapponendo alla porzione di continuo considerata un reticolo, in genere di maglie quadrilatere, in corrispondenza dei cui nodi (gridpoints) sono definite le grandezze in gioco. E' allora possibile approssimare la derivata prima di una funzione rispetto a una variabile indipendente, con il rapporto tra la variazione subita dalla funzione stessa nel passare da un nodo ad uno contiguo, e la corrispondente variazione della variabile indipendente.

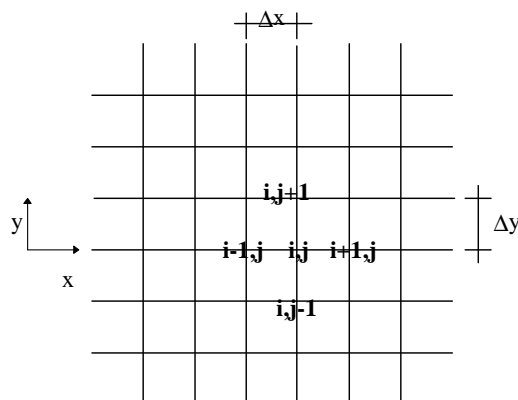
Con riferimento alla figura seguente, può assumersi ad un certo istante t una delle seguenti equivalenze:

$$\left(\frac{\partial u}{\partial x}\right)_{i,j} \approx \frac{u_{i+1,j}^t - u_{i,j}^t}{\Delta x},$$

$$\left(\frac{\partial u}{\partial x}\right)_{i,j} \approx \frac{u_{i+1,j}^t - u_{i-1,j}^t}{2\Delta x},$$

$$\left(\frac{\partial u}{\partial x}\right)_{i,j} \approx \frac{u_{i,j}^t - u_{i-1,j}^t}{\Delta x}.$$

In modo analogo si opera per le derivate rispetto ad y , e per le derivate di ordine superiore.

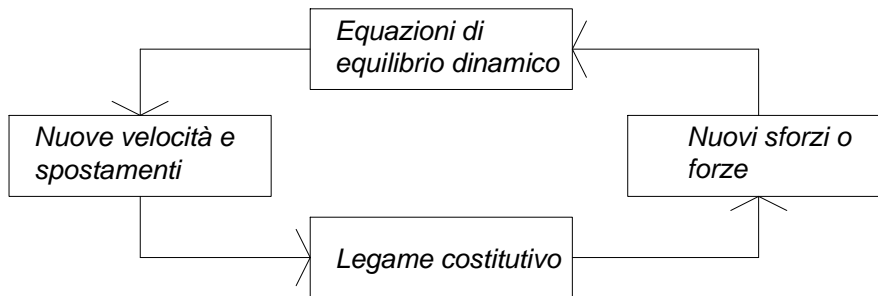


La legge costitutiva del materiale viene espressa nella seguente forma:

$$\sigma = E \cdot \frac{\partial u}{\partial x} \Rightarrow \sigma_{i,j}^t = E \cdot \frac{u_{i+1,j}^t - u_{i,j}^t}{\Delta x}$$

Il codice di calcolo FLAC usa uno schema di soluzione “esplicito condizionatamente stabile”, la cui sequenza di calcolo iterativo, illustrata schematicamente nella figura seguente, comprende i seguenti passi:

- per ogni nodo della griglia si valuta la massa m , la risultante delle forze esterne F_e (gravità, carichi esterni ...), la risultante delle forze interne F_i , calcolata per integrazione degli sforzi nelle zone collegate al nodo stesso, così che è possibile determinare la forza squilibrata agente sul nodo F_u (unbalanced force $F_u = F_e - F_i$);
- per ogni gridpoint si scrive l'equazione di Newton $F_u = m \cdot a$, tramite la quale è possibile determinare l'accelerazione del nodo in esame; integrando due volte l'accelerazione si ottiene la velocità e lo spostamento incrementale di ogni nodo;
- dal campo di spostamenti incrementali, è possibile risalire al campo di deformazioni incrementali e quindi, attraverso il legame costitutivo dei materiali, al campo di variazioni degli sforzi nel reticolo;
- la variazione degli sforzi comporta la modifica, per ogni nodo della griglia, della risultante delle forze interne e conseguentemente la necessità di rideterminare la F_u , dando inizio ad un nuovo passo di calcolo. Il processo iterativo ha termine qualora si ottenga una forza squilibrata che abbia un valore minore di una tolleranza prestabilita.



2.2.2. Analisi 1 (Unità 7 - H = 90m)

Si è considerata la sezione in condizioni di copertura massima, pari a circa 90 m, in presenza della Formazione delle “Marne di Sant’Agata”.

L’analisi numerica è stata condotta considerando un reticolo di forma rettangolare, avente dimensioni e grado di infittimento in corrispondenza del fronte di scavo tali da garantire una soluzione numerica accurata e rappresentativa della situazione in sito. Le dimensioni della griglia e la distanza della galleria dai limiti esterni della griglia stessa sono tali da allontanare eventuali effetti di bordo dall’area di interesse del reticolo.

Il contorno del modello è stato vincolato lateralmente ed inferiormente mediante carrelli.

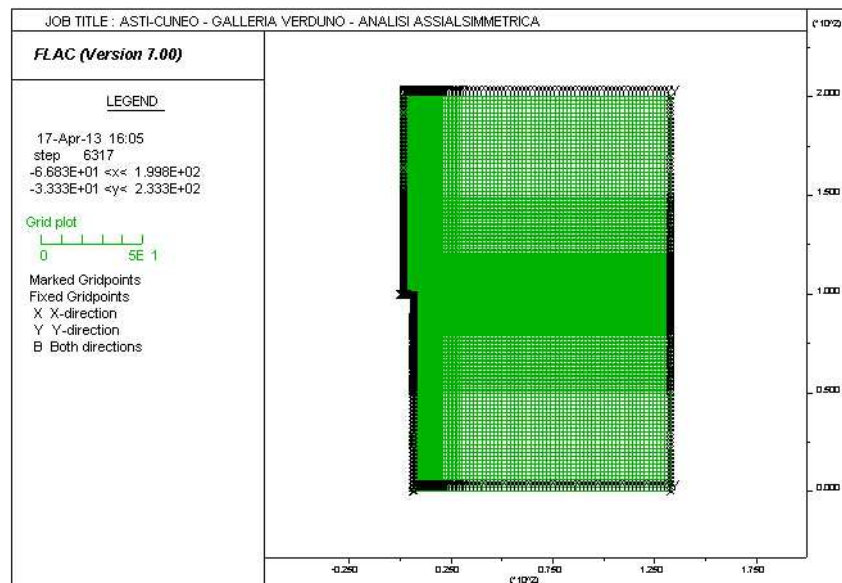


Figura 2: Unità 7 – Copertura 90 m – Modello

Parametri geotecnici di calcolo

L'analisi è stata condotta attribuendo al materiale interessato dallo scavo valori medi dei parametri geomeccanici, come riportato nella tabella seguente:

materiale	γ	c'	ϕ'	E	ν
Unità 7	21 KN/m ³	100 KPa	30°	200 MPa	0,30

Tabella 2: Unità 7 – Copertura 90 m – Parametri geotecnici

Esame e valutazione dei risultati

L'analisi condotta ha permesso di definire la curva riportata nella figura seguente, che esprime il rapporto tra la pressione applicata al fronte e l'estrusione del nucleo.

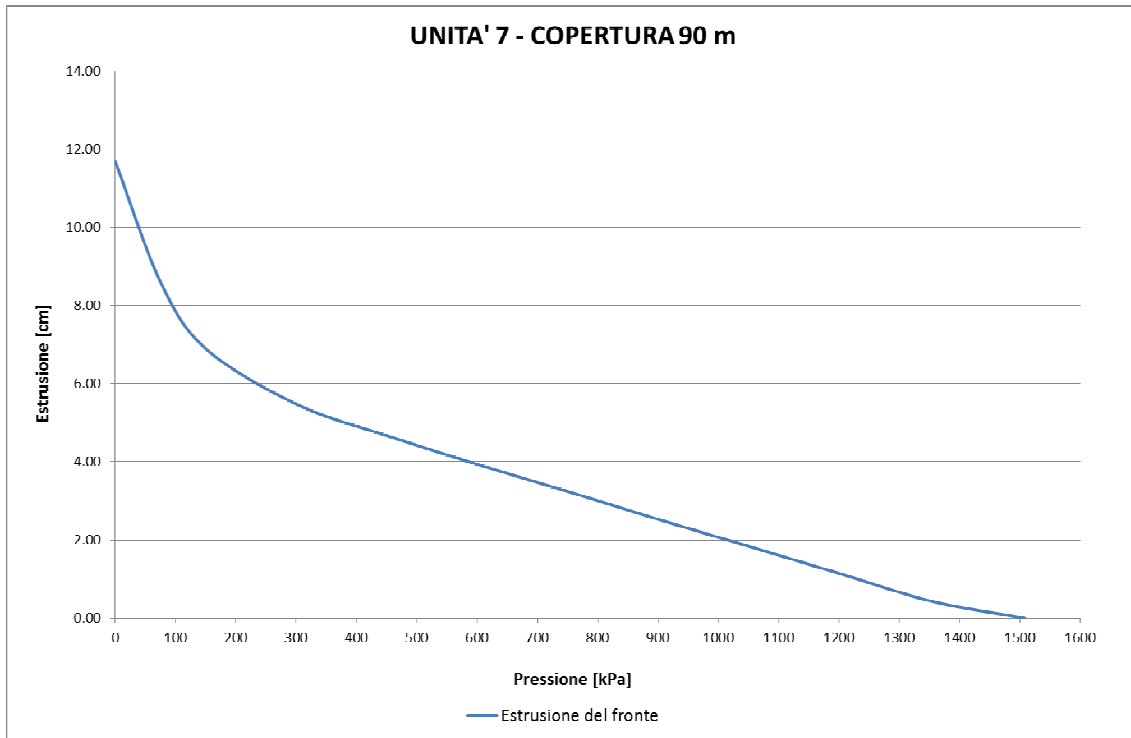


Figura 3: Unità 7 – Copertura 90 m – Curva di estrusione del fronte

Come si può osservare la curva presenta un ramo elastico molto evidente ed un ramo plastico che, pur essendo ben definito, giunge comunque a convergenza, sebbene con valori di estrusione piuttosto elevati (circa 10-12 cm).

Si ritiene quindi opportuno applicare una pressione al fronte di circa 300 KPa (valore medio in corrispondenza del piano dei centri), così da mantenere il fronte in campo elastico (vedi Figura 4), al fine di ridurre il decadimento dei parametri di resistenza e deformabilità del terreno (limitando quindi le pressioni agenti sul cavo) e garantire maggiori condizioni di sicurezza nel corso dello scavo.

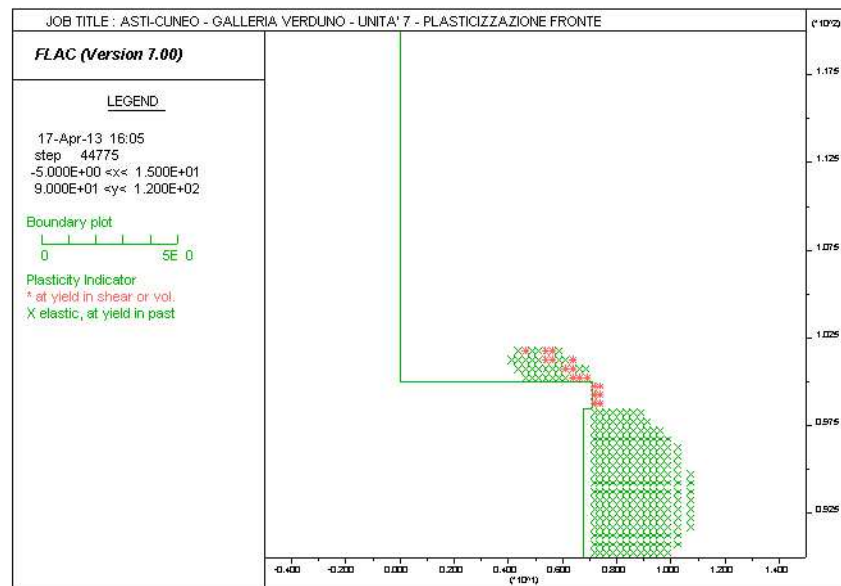


Figura 4: Unità 7 – Copertura 90 m – Plasticizzazione al fronte

Tenendo conto delle caratteristiche dell'ammasso, che risulta particolarmente impervio, caratterizzato da valori di permeabilità molto bassi, non si ritiene necessario, nella Formazione in esame, prevedere pressioni in camera di scavo di controbilanciamento delle pressioni idrostatiche legate alla quota di falda. La pressione di progetto (misurata in corrispondenza della calotta della galleria) dovrà quindi essere compresa nel range 1,8 ÷ 2,2 bar.

2.2.3. Analisi 2 (Unità 7a - H = 70 m)

Si è considerata la sezione in condizioni di copertura pari a circa 70 m, rappresentativa del settore di galleria ove si è riscontrata la presenza di corpi detritici, con falda in pressione (Unità 7a), all'interno della Formazione di Sant'Agata. L'analisi numerica è stata condotta considerando un reticolo di forma rettangolare, avente dimensioni e grado di infittimento in corrispondenza del fronte di scavo tali da garantire una soluzione numerica accurata e rappresentativa della situazione in sito. Le dimensioni della griglia e la distanza

della galleria dai limiti esterni della griglia stessa sono tali da allontanare eventuali effetti di bordo dall'area di interesse del reticolo. Il contorno del modello è stato vincolato lateralmente ed inferiormente mediante carrelli.

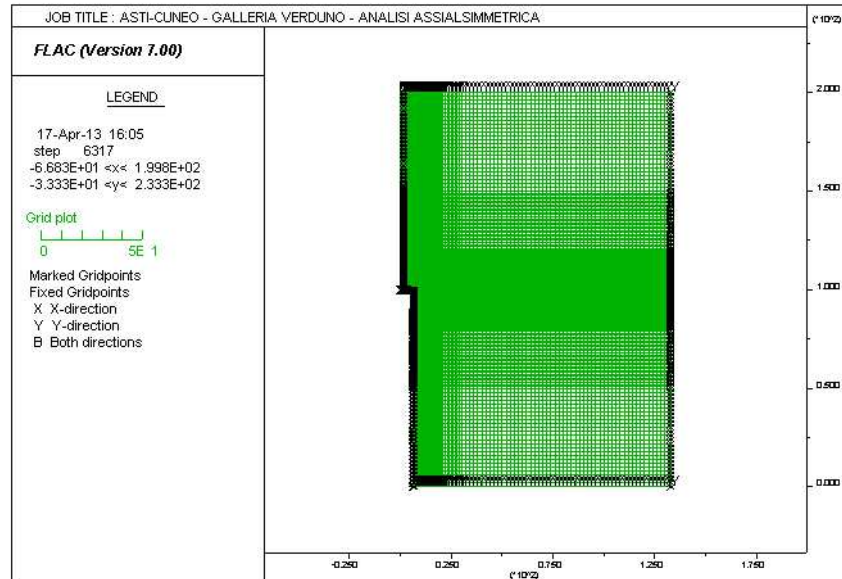


Figura 5: Unità 7a – Copertura 70 m – Modello

Parametri geotecnici di calcolo

L'analisi è stata condotta attribuendo al materiale interessato dallo scavo valori medi dei parametri geomeccanici, come riportato nella tabella seguente:

materiale	γ	c'	ϕ'	E	ν
Unità 7a	19 KN/m ³	0 KPa	35°	40 MPa	0,30

Tabella 3: Unità 7a – Copertura 70 m – Parametri geotecnici

Esame e valutazione dei risultati

L'analisi condotta ha permesso di definire la curva riportata Figura 6, che esprime il rapporto tra la pressione applicata al fronte e l'estrusione del nucleo.

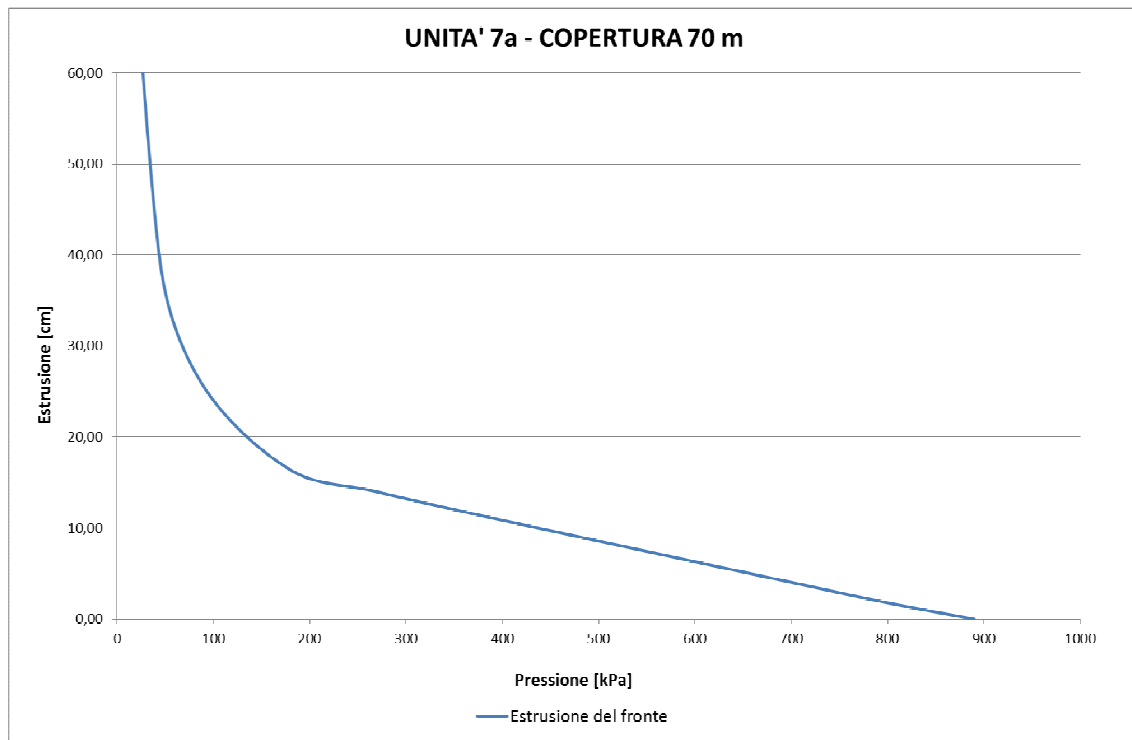


Figura 6: Unità 7a – Copertura 70 m – Curva di estrusione del fronte

Come si può osservare anche in questo caso la curva presenta un ramo elastico evidente seguito però da un ramo plastico molto ben definito, che mostra come il fronte non sia stabile in assenza di una pressione di stabilizzazione (la curva presenta infatti un asintoto verticale in corrispondenza di pressioni di contenimento pari a circa 50 kPa). Si ritiene quindi opportuno applicare una pressione al fronte di circa 250 KPa (valore medio in corrispondenza del piano dei centri), così da mantenere il fronte in campo elastico (vedi Figura 7), garantendone la stabilità e riducendo il decadimento dei parametri di resistenza e deformabilità del terreno (limitando quindi le pressioni agenti sul cavo).

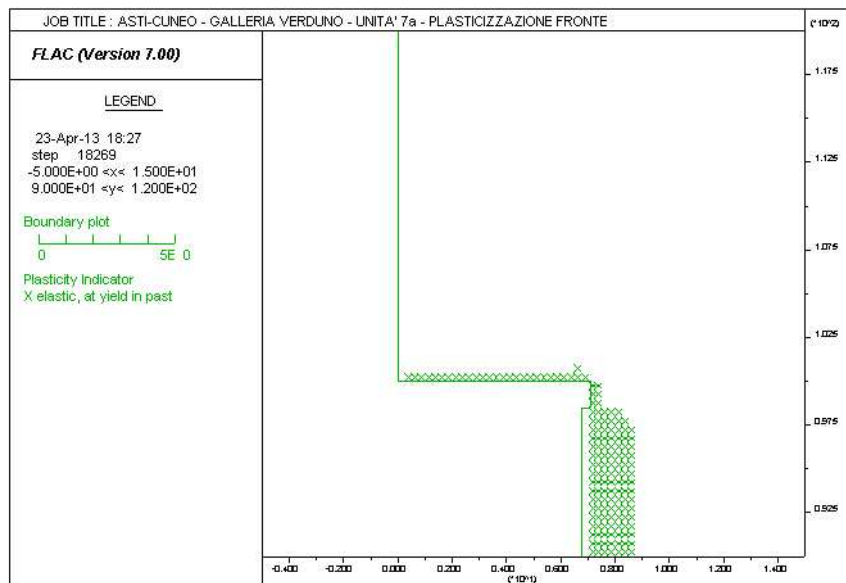


Figura 7: Unità 7a – Copertura 70 m – Plasticizzazione al fronte

La presenza di falda (con pressioni valutate tra 2 e 6 bar) all'interno dei corpi detritici, costituiti da materiale granulare molto permeabile, impone di considerare anche una componente della pressione in camera di scavo che controbilanci le spinte idrostatiche. La pressione di progetto (misurata in corrispondenza della calotta della galleria) dovrà quindi essere portata sui valori massimi, nel range 3,0 ÷ 3,5 bar (di cui 1,4 ÷ 2,3 bar relativo alla componente di controbilanciamento delle pressioni idrostatiche).

2.2.4. Analisi 3 (Unità 6 - H = 40 m)

Si è considerata una sezione con ricoprimento pari a circa 40 m, che rappresenta la massima copertura nella Formazione Gessoso-solfifera (Unità 6). Anche in questo caso, l'analisi numerica è stata condotta considerando un reticolo di forma rettangolare, avente dimensioni e grado di infittimento in corrispondenza del fronte di scavo tali da garantire una soluzione numerica accurata e rappresentativa della situazione in sito. Le dimensioni della griglia e

la distanza della galleria dai limiti esterni della griglia stessa sono tali da allontanare eventuali effetti di bordo dall'area di interesse del reticolo. Il contorno del modello è stato vincolato lateralmente ed inferiormente mediante carrelli.

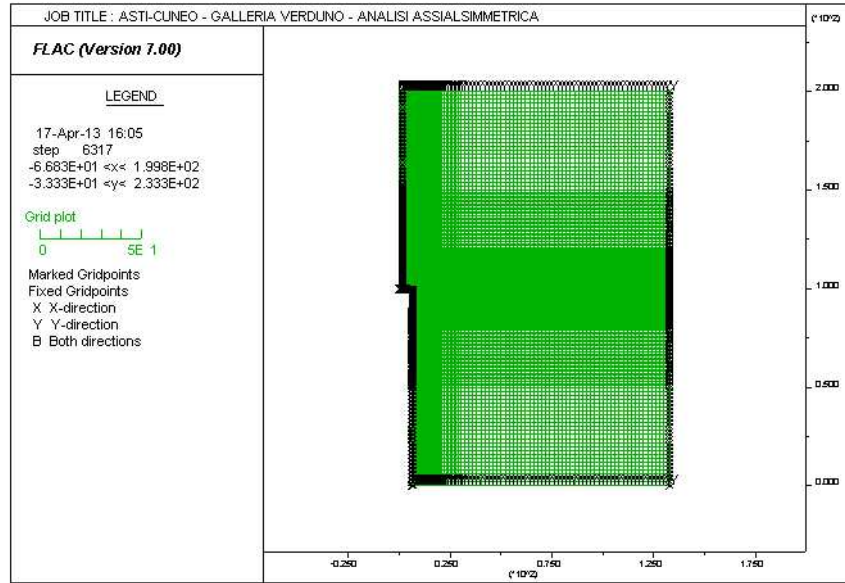


Figura 8: Unità 6 – Copertura 40 m – Modello

Parametri geotecnici di calcolo

L'analisi è stata condotta attribuendo al materiale interessato dallo scavo valori medi dei parametri geomeccanici, come riportato nella tabella seguente:

materiale	γ	c'	ϕ'	E	ν
Unità 6	20 KN/m ³	40 KPa	24°	200 MPa	0,30

Tabella 4: Unità 6 – Copertura 40 m – Parametri geotecnici

Esame e valutazione dei risultati

L'analisi condotta ha permesso di definire la curva riportata nella Figura 9 seguente, che esprime il rapporto tra la pressione applicata al fronte e l'estrusione del nucleo.

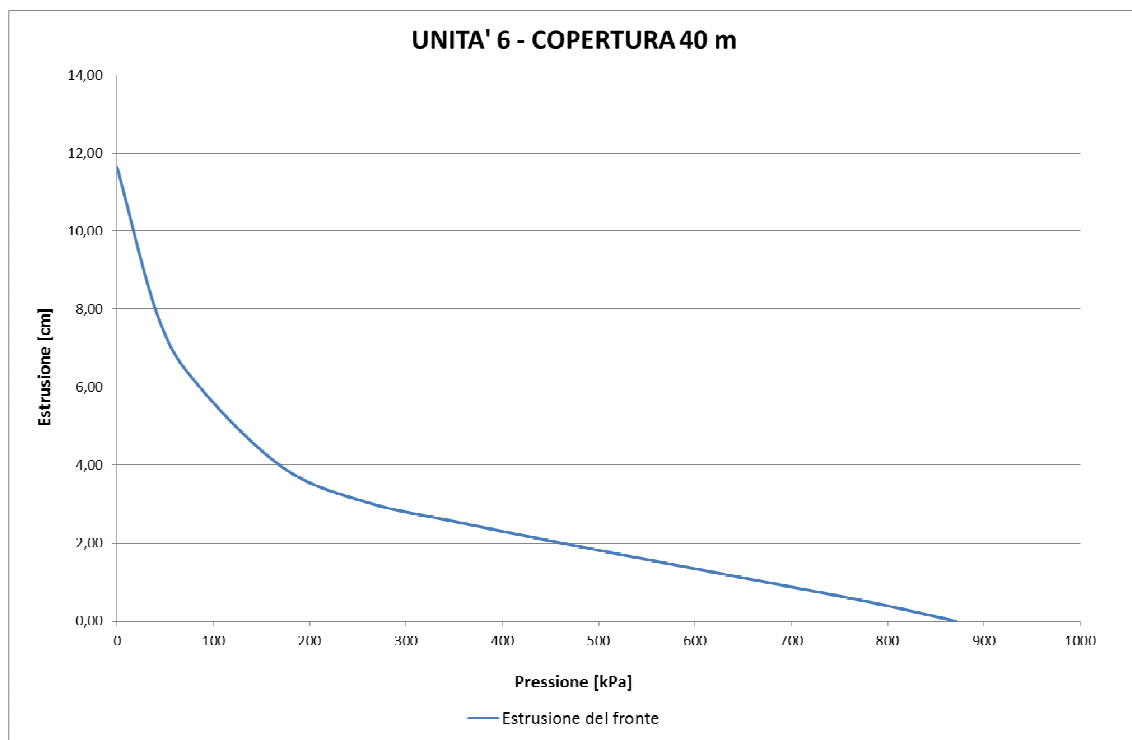


Figura 9: Unità 6 – Copertura 40 m – Curva di estrusione del fronte

Come si può osservare la curva presenta un ramo elastico molto evidente ed un ramo plastico che, pur essendo ben definito, giunge comunque a convergenza, sebbene con valori di estrusione piuttosto elevati (circa 10-12 cm). Si ritiene quindi opportuno applicare una pressione al fronte di circa 250 KPa (valore medio in corrispondenza del piano dei centri), che consente di contenere l'estrusione, mantenendo il fronte in campo elastico (vedi Figura 10), svolgendo

al contempo un'importante azione di precontenimento del cavo, con conseguente riduzione delle pressioni agenti sullo scudo.

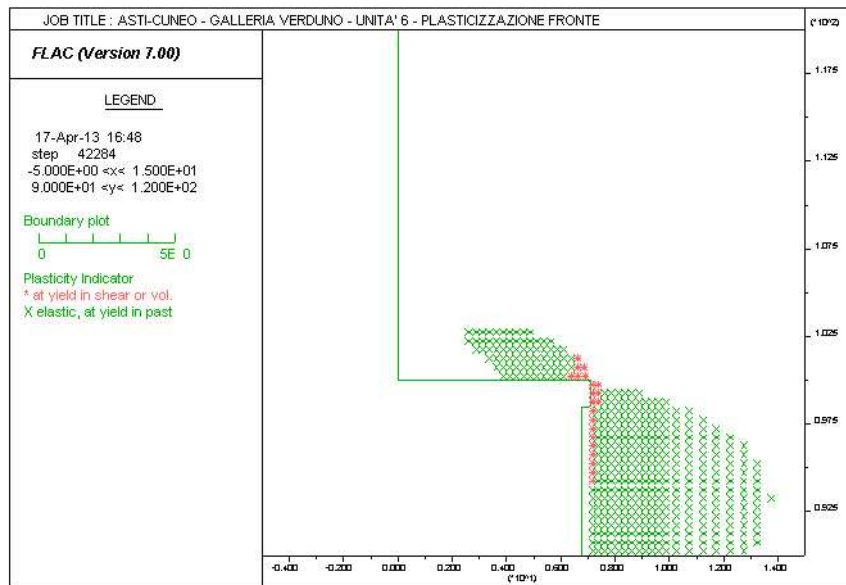


Figura 10: Unità 6 – Copertura 40 m – Plasticizzazione al fronte

Anche in questo caso la definizione della pressione al fronte dovrà tener conto di un contributo legato alla presenza della falda, che nel settore di galleria interessata dalla formazione dei gessi, risulta al massimo 4-5 m al di sopra della calotta della galleria.

La pressione di progetto (misurata in corrispondenza della calotta della galleria) dovrà quindi essere compresa nel range $1,2 \div 2,1$ bar (di cui $0,0 \div 0,5$ bar per controbilanciare la spinta idrostatica).

2.2.5. Sintesi dei risultati

Nella Tabella 5 seguente si riassumono i valori di pressione definiti per i contesti geomeccanici più significativi. Si rimanda invece agli elaborati di progetto (“Profilo geomeccanico di progetto – Canna di valle”, documento 2.6E-dD.2.1.23 e “Profilo geomeccanico di progetto – Canna di monte”, documento 2.6E-dD.2.1.24) per una definizione di dettaglio lungo il tracciato della galleria.



Collegamento autostradale Asti – Cuneo – Tronco II Lotto 6
VERIFICA DI ASSOGGETTABILITA' EX ART. 20 D.LGS. 152/06
STRALCIO DI PROGETTO ESECUTIVO
Galleria Verduno – Relazione specifiche tecniche scavo meccanizzato

ANALISI	FORMAZIONE	COPERTURA	PRESSIONE DI PROGETTO (in calotta)	PRESSIONE PER LA SOLA SPINTA IDROSTATICA
1	Unità 7	90,0 m	1,8 ÷ 2,2 bar	-
2	Unità 7a	70,0 m	3,0 ÷ 3,5 bar	1,4 ÷ 2,3 bar
3	Unità 6	40,0 m	1,2 ÷ 2,1 bar	0,0 ÷ 0,5 bar

Tabella 5: Determinazione della pressione in camera di scavo – Sintesi dei risultati



3. DETERMINAZIONE DEI VALORI DI SPINTA PER L'AVANZAMENTO DELLA TBM

La caratteristiche necessarie al corretto avanzamento della macchina all'interno della galleria sono determinate mediante lo studio dei fenomeni tenso-deformativi nell'ammasso al contorno del cavo e delle pressioni da esercitare al fronte. Note le pressioni che si ritiene di dovere prevedere in corrispondenza del fronte di scavo, come discusso al capitolo 2, si valutano le pressioni al contorno della TBM in fase di scavo, necessarie per un corretto dimensionamento dello scudo metallico. Quindi l'esame di tutte le forze in gioco consentirà di determinare la spinta massima da prevedersi per l'avanzamento della TBM.

3.1. PRESSIONI AL CONTORNO DELLO SCUDO

Al fine di determinare le pressioni nell'ammasso al contorno dello scudo, si riportano in tabella 7, per le formazioni considerate, le condizioni geostatiche, valutate a partire dal peso di volume dei materiali e dai livelli di ricoprimento presenti lungo il tracciato, applicando le note formulazioni:

$$\sigma_v = \gamma \cdot H$$

$$\sigma_h = K_0 \cdot \sigma_v$$

In favore di sicurezza si è operato in sforzi totali, assumendo per K_0 il valore 0.5 e 1.2 rispettivamente. Come si può osservare dalla tabella predisposta, gli stati tensionali in situ, così valutati, risultano assai elevati, specie per le massime coperture, tali da determinare difficoltà sia per il dimensionamento dello scudo metallico, sia per la definizione della spinta necessaria per l'avanzamento della TBM. Vi è però da osservare che, in considerazione della presenza al contorno della TBM di un gap anulare dovuto alla geometria conica dello scudo, nonché alla possibilità di operare un extra-scavo rispetto al diametro teorico, il profilo di



scavo potrà subire spostamenti durante gli avanzamenti (convergenze) determinando una redistribuzione delle tensioni nell'ammasso, con riduzione delle pressioni radiali al profilo di scavo ed incremento delle tensioni tangenziali ("effetto arco"). Si sono quindi prese in esame le relazioni esistenti tra le pressioni radiali al contorno del cavo e le deformazioni del profilo di scavo, le quali risultano - secondo la filosofia del metodo "convergenza-confinamento" – funzioni delle caratteristiche di resistenza dei materiali interessati dagli scavi, al fine di determinare le pressioni effettive che agiranno sullo scudo metallico.

Le analisi sono state condotte impiegando il codice di calcolo alle Differenze Finite FLAC, simulando l'apertura di uno scavo del diametro di 15.30 m in presenza dei materiali e dei ricoprimento riportati nella seguente tabella, ovvero delle situazioni già esaminate per la valutazione delle pressioni al fronte di scavo.

Calcolo	Materiale	Copertura	σ_v (kPa)	σ_h (kPa)
1	Unità 7	90,0 m	1890	945 - 2268
2	Unità 7a	70,0 m	1330	665 - 1596
3	Unità 6	40,0 m	800	400 - 960

Tabella 6: Analisi alle differenze finite e tensioni geostatiche

Operativamente si sono ridotte progressivamente le forze radiali al contorno del profilo di scavo, valutando la conseguente contrazione del profilo stesso (convergenza, o pre-convergenza in corrispondenza del fronte) costruendo le curve "pressione-convergenza". Sono curve del tutto simili a quelle ottenute con il Metodo delle Linee Caratteristiche (Lombardi, 1974), ma tengono conto di una condizione geostatica con distribuzione non necessariamente idrostatica (K_0 differente da 1). Nel caso in esame si è presa in considerazione l'ipotesi di $K_0 =$

$\sigma_h / \sigma_v = 0.5$ (situazione elastica) e $K_0 = 1.2$ (situazione di materiale sovra consolidato).

Nel seguito si riportano le curve ottenute dalle analisi condotte. Si riporta sia il grafico che riporta l'evoluzione della convergenza in funzione del progressivo rilassamento delle forze di scavo (espresso in termini percentuali), sia il grafico che mette in relazione la convergenza con le pressioni radiali al profilo di scavo.

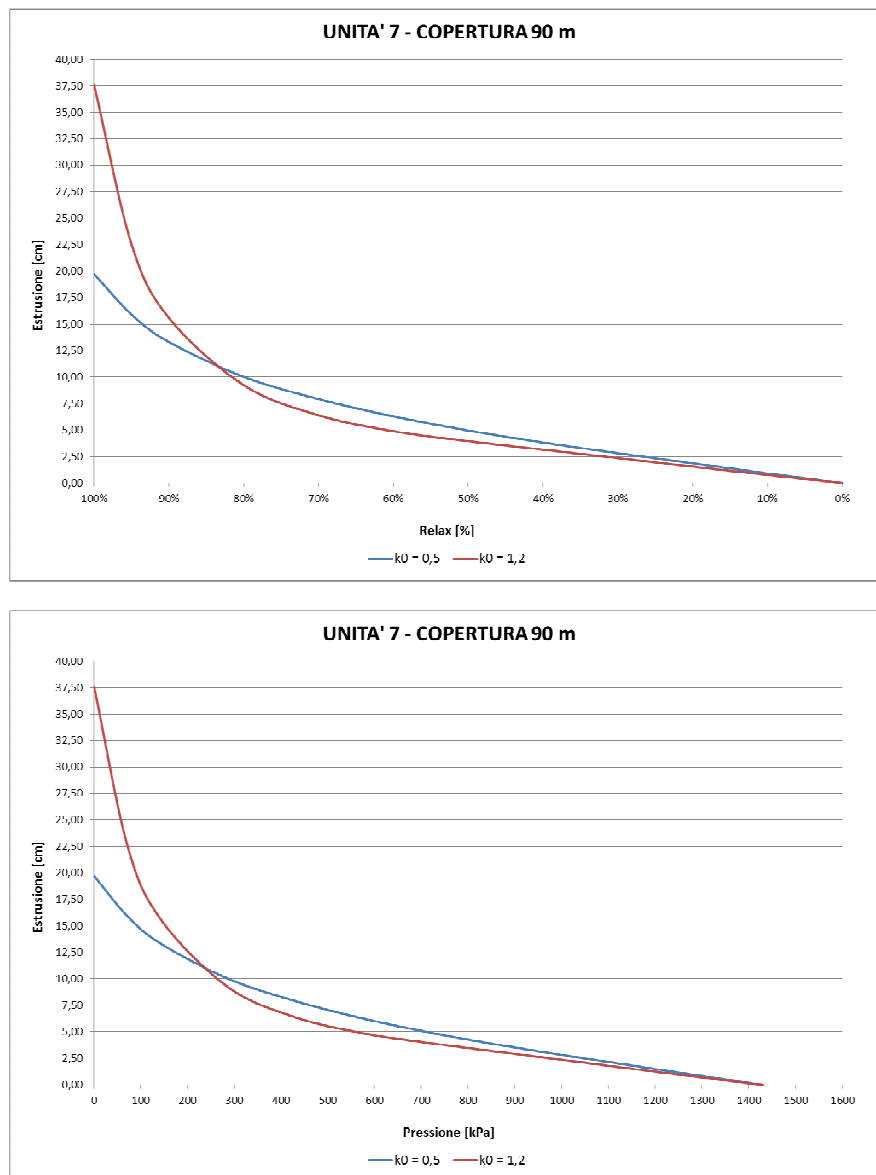


Figura 11: Unità 7 – Copertura 90 m – Curva pressione convergenza

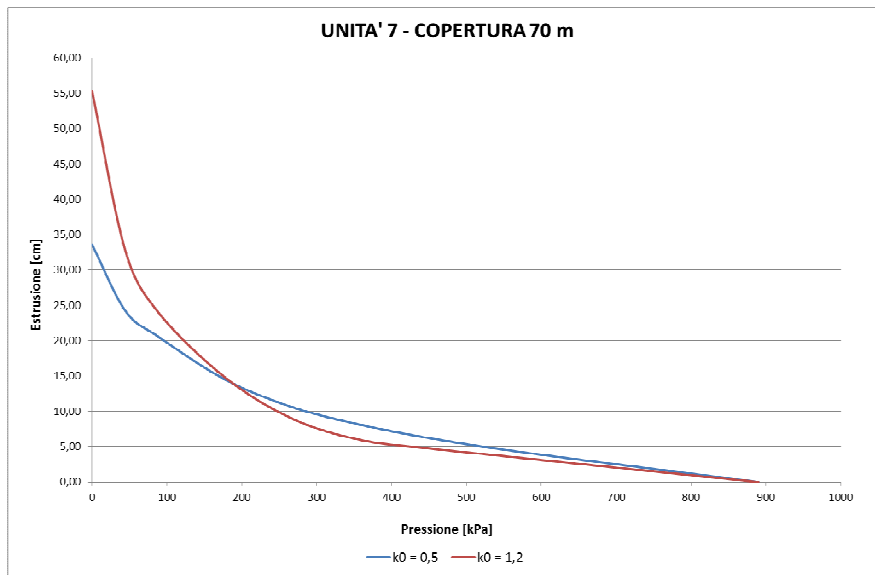
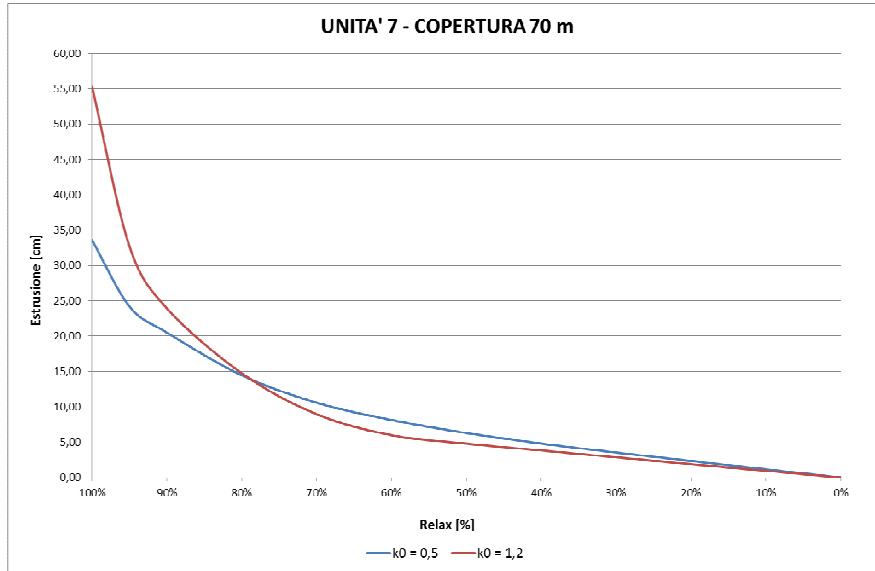


Figura 12: Unità 7a – Copertura 70 m – Curva pressione convergenza

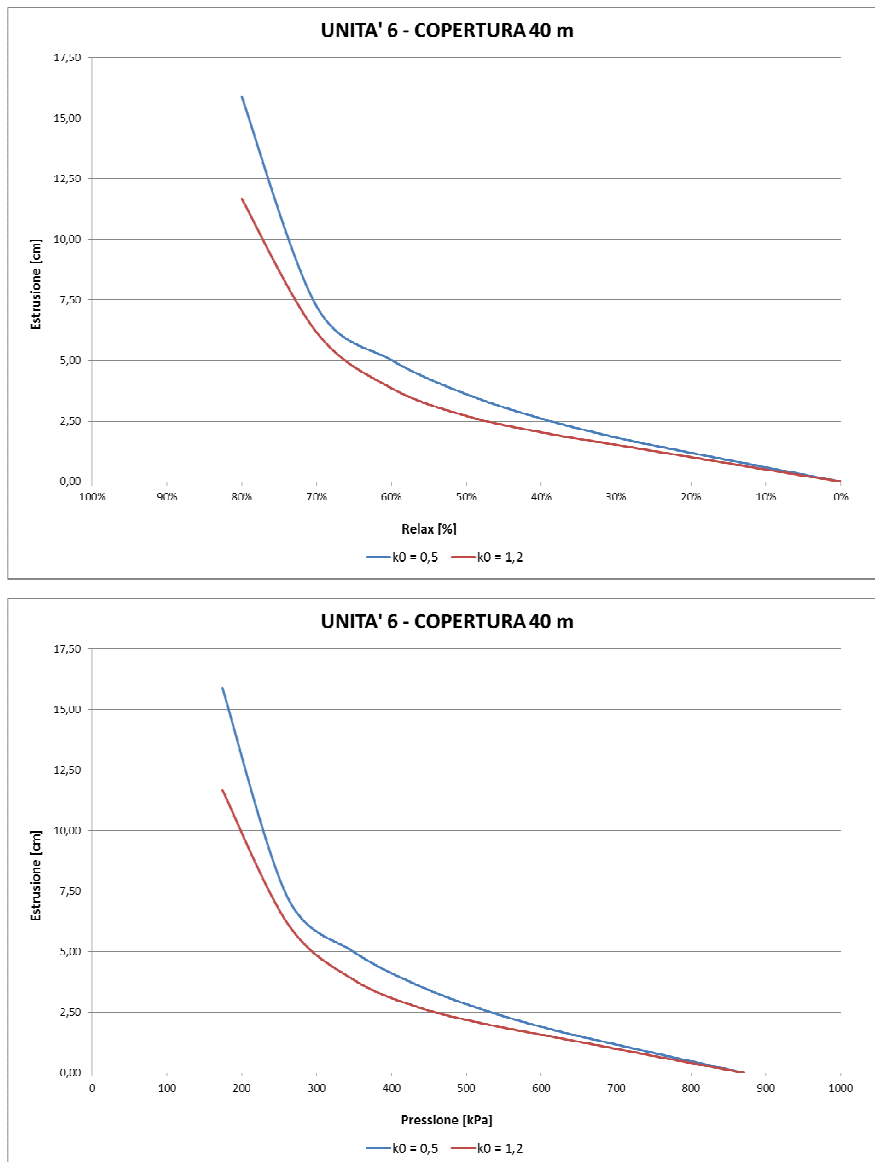


Figura 13: Unità 6 – Copertura 40 m – Curva pressione convergenza

Dall'esame dei grafici è possibile notare come all'aumentare del rilassamento delle forze di scavo (ovvero riducendo la pressione di confinamento) aumenti di conseguenza la convergenza del cavo; nella tabella sottostante si riportano le pressioni agenti al contorno del profilo di scavo in presenza di convergenze radiale pari a 5 cm, valore generalmente associabile alla "conicità" dello scudo, ovvero alla riduzione del diametro tra testa di scavo e coda dello scudo.

Formazione	Pressione efficace al contorno con una convergenza di 5 cm
<i>Unità 7</i>	710 KPa
<i>Unità 7a</i>	515 KPa
<i>Unità 6</i>	350 KPa

Tabella 7: Pressioni al contorno del cavo

3.2. SPINTA PER L'AVANZAMENTO DELLA TBM

Le considerazioni dei paragrafi precedenti sulla relazione “convergenza-forza di scavo”, in relazione anche al valore di conicità della TBM preso in esame, hanno permesso di esaminare l’entità delle pressioni che si produrranno al contorno dello scudo tendendo ad ostacolare l’avanzamento della macchina in virtù dell’attrito scudo-ammasso al contorno. Ad essa sono poi da aggiungere una serie di altre componenti, legate al peso proprio della TBM, alla pressione da operare al fronte di scavo, alle forze necessarie per la frantumazione dell’ammasso al fronte, quali le forze connesse ai cutters, ai picchi ed al contorno della testa fresante.

Nel seguito si riportano le formulazioni adottate per la valutazione della spinta complessiva per il dimensionamento della TBM (si è fatto riferimento alle formulazioni proposte in “Mechanised Shield Tunneling” B. Miadl, M. Herrenknecht, L. Anheuser). Va inoltre considerato, un fattore di sicurezza per tenere conto di aspetti non quantificabili (ad esempio le sovraspinte in curva...).

Nel dettaglio la spinta complessiva deve tenere conto di quattro singoli termini:

$$\Sigma W = W_{sh} + W_{sk} + W_{exc} + W_{sup}$$



W_{sk} Forza dovuta all'attrito macchina-terreno

W_{sup} Forza di pressione da applicare al fronte

W_{exc} Forza necessaria allo scavo

W_{sh} Forza dovuta alla presenza delle spazzole e del cutting edge

In particolare la forza dovuta all'attrito macchina terreno è data dalla formula:

$$W_{sk} = \mu [2\pi \cdot R \cdot L (\sigma_{media}) + F_{sh}]$$

Dove:

μ è il coefficiente di attrito metallo/terreno, pari a 0,35

R è il raggio di scavo, pari a 7,65 m

L è la lunghezza dello scudo, assunta pari a 12m

σ_{media} è la pressione del terreno sul rivestimento

F_{sh} è il peso della macchina, pari a 30.000 kN

La forza di pressione da applicare al fronte è data da:

$$W_{sup} = A_{exc} \cdot P_{fronte}$$

dove:

P_{fronte} è la pressione applicata al fronte

A_{exc} è l'area di scavo pari a 183,9 m²

La forza necessaria allo scavo è data da:

$$W_{exc} = n^{\circ}Cutter \cdot P_{cutter}$$

dove:

$n^{\circ}Cutter = 100$

P_{cutter} è la forza sviluppata da ciascun cutter, assunta pari a 200 kN/cutter

mentre la forza data dalla presenza delle spazzole e del cutting edge (rappresentati in dettaglio nelle figure seguenti) è data da:

$$W_{sh} = 2\pi \cdot R \cdot (p_{sh} \cdot t + p_{sp})$$

dove:

p_{sh} è la forza sul cutting edge, pari a 10 kN/m²

t è lo spessore del cutting edge, ipotizzato pari a 1.2 m

p_{sp} è la forza dovuta alle spazzole, pari a 1 kN/m

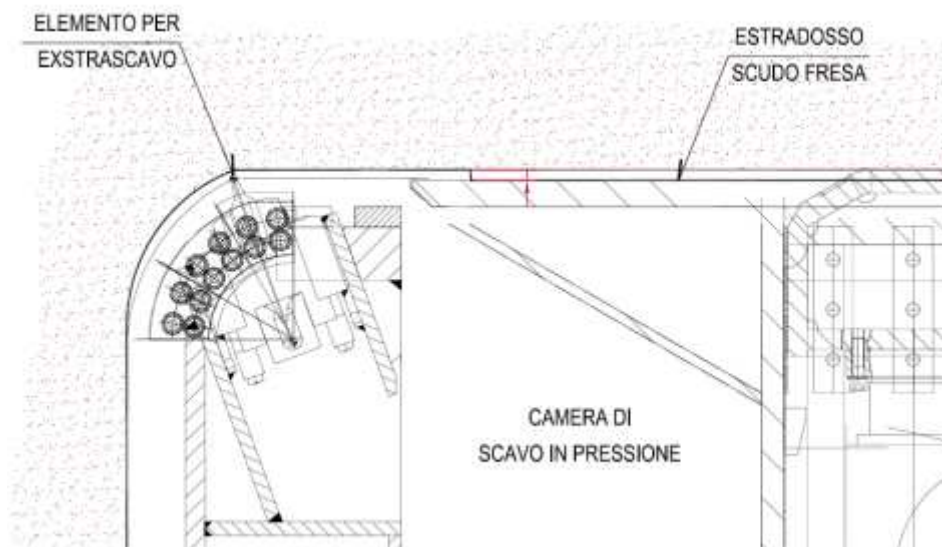


Figura 14: Particolare cutting edge

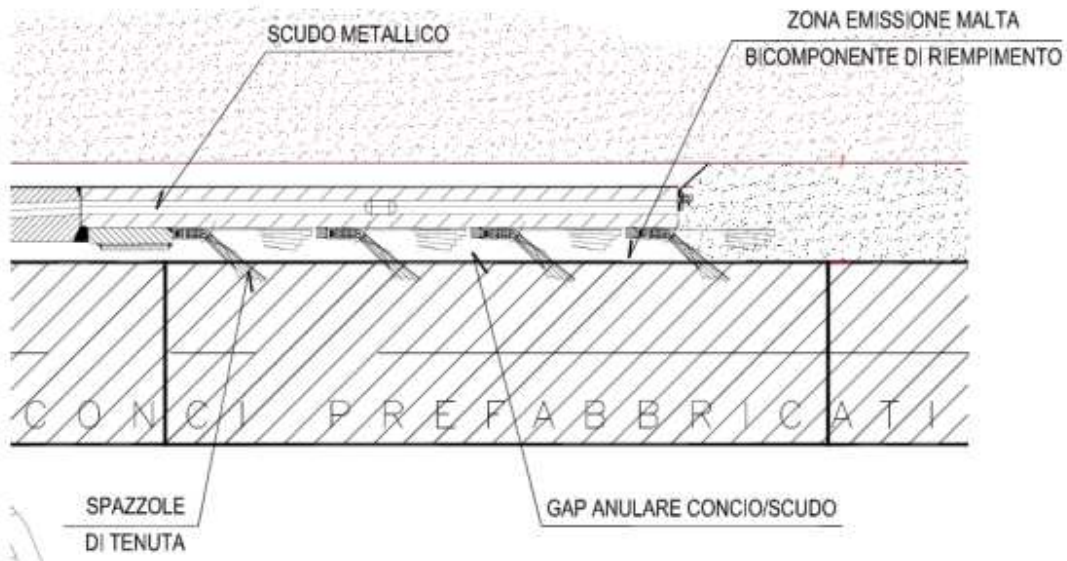


Figura 15: Particolare spazzole

Si osserva che l'assunzione di un coefficiente di attrito pari a 0.35 risulta prudente; confronti tecnici con la casa produttrice Herrenknecht per scavi in contesti simili hanno infatti evidenziato la possibilità di ridurre tale valore adottando speciali lubrificanti al contorno dello scudo metallico finalizzati a ridurre l'attrito rispetto al profilo di scavo, fino a valori pari a 0.15-0.18.

Nella tabella seguente si riportano le spinte totali da considerare per il dimensionamento della macchina. Circa le pressioni al contorno del cavo sono state considerate quelle correlate ad una convergenza del cavo di 5 cm (trascurando, a favore di sicurezza, la possibilità di operare extra-scavi mediante cutter estraibili sul contorno del profilo di scavo, in genere pari ad ulteriori 5 cm). Si è inoltre considerata una pressione al fronte media di 5 bar. Nella valutazione della spinta di progetto si è infine considerato un fattore di sicurezza pari a 1.1 (anche alla luce del fatto che si ha un possibile margine sul coefficiente di attrito reale).



Formazione	Σ Spinte [KN]	Spinta di Progetto [KN]
Unità 7 – H = 90 m	266410	293050
Unità 7a – H = 70 m	227045	249750
Unità 6 – H = 40 m	193735	213110

Tabella 8: Valutazione delle spinte necessarie all'avanzamento della TBM

Sulla base di queste valutazioni, nei profili geomeccanici di previsione, già richiamati, si sono riportati, per le singole tratte di galleria a comportamento omogeneo, i parametri operativi per la macchina, in termini di pressione al fronte, spinta massima e pressione per l'iniezione della malta bicomponente di riempimento a tergo dei conci.

Questi parametri saranno più in dettaglio definiti in corso d'opera, anche a seguito di quanto osservato nei primi tratti di scavo della galleria, sia in termini di funzionamento della TBM sia di risposta deformativa rilevata dal sistema di monitoraggio predisposto.



4. PRINCIPALI CARATTERISTICHE DELLA MACCHINA

Nella tabella seguente si riporta una sintesi delle principali caratteristiche della TBM in oggetto. Si tratta di valutazioni di massima che dovranno essere più in dettaglio approfondite in sede di progettazione costruttiva della TBM

Elemento	Specifica
<i>Diametro scavo</i>	15,300 m
<i>Conicità scudo</i>	5,0 cm
<i>Extra scavo</i>	5,0 cm
<i>Lunghezza scudo</i>	12,0 m
<i>Peso macchina</i>	30000,0 KN
<i>Spinta massima per avanzamento</i>	295000,0 KN
<i>Pressione massima al fronte (media)</i>	5,0 bar
<i>Possibilità di eseguire perforazioni geognostiche al contorno dello scudo ed al fronte, da impiegare anche per iniezioni</i>	20 posizioni

Tabella 9: Sintesi delle principali caratteristiche della macchina



5. PARAMETRI OPERATIVI DELLA MACCHINA E DATI DI SCAVO

Le moderne macchine di scavo del tipo EPB-S hanno componenti meccaniche ed elettroniche assai complesse, che permettono di eseguire scavi con estrema precisione lungo tracciati plano-altimetrici predefiniti, in contesti geotecnica difficili, attraverso la definizione ed il successivo controllo di “parametri guida”, remotizzati in centrali di controllo.

Senza volere, in questa sede, entrare nel dettaglio dei parametri guida e delle caratteristiche della macchina che verrà impiegata per la realizzazione delle gallerie in oggetto, si è ritenuto utile evidenziare alcuni “parametri operativi” e “dati di scavo” da tenere sotto controllo durante gli avanzamenti, per le ripercussioni che possono avere sulla definizione dei risentimenti in superficie.

Si ritiene inoltre opportuno predisporre un programma informatico di gestione dei parametri chiave, così da disporre di tabelle e grafici di semplice ed immediata comprensione, da correlare, tra l'altro, con i risultati del sistema di monitoraggio predisposto.

5.1. DATI SULLE CARATTERISTICHE DEI TERRENI

Il terreno scavato viene estratto dalla camera al fronte mediante la coclea e trasportato all'esterno mediante nastro trasportatore. Può essere pertanto attentamente visionato, al fine di verificarne, seppur qualitativamente, le sue caratteristiche geotecniche, con particolare riferimento alla granulometria. La percentuale di materiale fine acquista un ruolo fondamentale sulla tipologia e sulle caratteristiche del condizionamento del materiale in camera di scavo, dalle quale dipende il raggiungimento delle proprietà necessarie, in termini di plasticità e fluidità del mezzo, per il mantenimento della pressione di bilanciamento. Allo scopo dovranno essere condotte prove di laboratorio.



Queste ultime risultano necessarie anche per la determinazione del peso di volume del materiale estratto, γ_{nat} ; questo parametro è fondamentale per la definizione del volume di materiale scavato a partire dal peso dello stesso, come verrà discusso nel seguito.

Per analizzare le caratteristiche di consistenza del terreno è possibile inoltre utilizzare due parametri individuati dal rapporto tra “Forza di spinta” (F) e “Velocità di avanzamento” (v), rapporto denominato “Indice di qualità diretta del terreno (D.Q.I.)”, e tra “Momento torcente della testa” e “Penetrazione” (p), denominato “Indice di Qualità Indiretta del terreno (I.Q.I.)”.

Il D.Q.I ha le dimensioni di una forza diviso una velocità e corrisponde ad una “resistenza meccanica”, mentre I.Q.I. ha le dimensioni di una forza moltiplicata una velocità angolare e corrisponde concettualmente alla potenza necessaria per ruotare la testa all'interno del terreno.

Questi indici rappresentano un buon modo di valutare oltre alle caratteristiche del terreno anche la riuscita del condizionamento. Nel caso del primo rapporto tanto più è maggiore tanto migliore è la qualità meccanica del terreno. Anche nel secondo caso concettualmente è possibile giungere alle medesime conclusioni, ma poiché il torque della macchina è grandemente influenzato da fenomeni attritivi tra muck e cutterhead la correlazione con le caratteristiche del terreno è più incerta.

5.2. DATI SULLA PRODUZIONE

Al fine di analizzare il ciclo di produzione previsto per l'avanzamento, soprattutto durante i primi mesi di scavo, appare opportuno registrare i tempi necessari allo svolgimento delle singole attività previste, ed in particolare:

- Durata della fase di scavo
- Durata delle fase di installazione dell'anello di rivestimento



- Registrazione di eventuali fermi macchina, per manutenzioni ordinarie o straordinarie

Il rapporto tra il tempo di scavo e di posa dell'anello di rivestimento permette di condurre valutazioni sul livello di sistematica dell'avanzamento. Il rapporto tra fermi e ciclo di avanzamento permette di evidenziare il "livello di efficienza" del sistema e di verificare le eventuali connessioni tra fermi macchina, detensionamento del fronte di scavo e cedimenti in superficie.

5.3. DATI DI SCAVO – VOLUMI DI SCAVO E RIEMPIMENTO

Al fine di effettuare un indispensabile equilibrio tra volumi scavati, volume della galleria e volume della miscela cementizia di riempimento a tergo dell'anello, appare necessario procedere alla registrazione in continuo di:

- Peso del materiale scavato ad ogni stroke di avanzamento; attraverso la conoscenza del peso di volume del materiale condizionato (per il quale, come detto, occorrono sistematiche prove di laboratorio), è possibile determinare il volume del materiale estratto
- Velocità di rotazione della coclea
- Volume della miscela iniettata dalla coda dello scudo
- Pressione di iniezione della miscela cementizia (per ogni iniettore)

Noto il volume teorico di scavo ed il volume della galleria, compreso dello spessore di rivestimento, è così possibile individuare, a partire dal volume di materiale scavato durante ogni step di avanzamento, l'eventuale prodursi di sovrascavi o vuoti al contorno del profilo di scavo, così da predisporre il corretto quantitativo di miscela e malta cementizia di riempimento.

Il rapporto tra volume di materiale scavato e volume di malta cementizia iniettata, quest'ultimo determinato attraverso il numero di pompate noto il quantitativo di ciascuna pompata, deve pertanto essere il più possibile costante e deve essere attentamente tenuto sotto controllo.



La pressione di iniezione della miscela di riempimento permette di valutare l'affidabilità della riuscita del riempimento, nonché stimare eventuali convergenze aggiuntive dovute alla pressione esterna del terreno e dell'acqua.

5.4. DATI DI SCAVO – PARAMETRI DELLA MACCHINA

Oltre ai dati di scavo in termine di volume di quantità in gioco, appare utile registrare anche i parametri di avanzamento della macchina, ovvero:

- Forza di spinta totale (valore medio del ciclo di avanzamento), espressa in KN
- Momento torcente della testa (valore medio del ciclo di avanzamento), espresso in MNm
- Velocità di avanzamento medio, espressa in mm/min
- Corsa dei pistoni, espressa in mm
- Pressione dei singoli martinetti

I suddetti parametri consentono di stimare in modo indiretto le proprietà meccaniche del materiale e forniscono, in particolare modo il valore di spinta, una prima stima della pressione di confinamento del fronte di scavo, ovvero da un lato della difficoltà/facilità di avanzamento (quest'ultimo dato si riscontra anche esaminando la velocità di avanzamento – penetrazione) e dall'alto delle possibili ripercussioni in superficie in rapporto alla spinta globale esercitata dal terreno e dall'acqua sulla macchina.

I dati relativi ai singoli martinetti, corsa e pressione locale, permettono di esaminare la distribuzione delle pressioni in sezione ed eventuale anomalie di spinta (dissimmetrie rispetto all'asse verticale).

5.5. PARAMETRI DI PRESSIONE IN CAMERA DI SCAVO

Il dato che più facilmente può essere confrontato con le ipotesi di calcolo progettuali è la pressione agente in camera di scavo e la sua distribuzione sull'altezza del fronte. Allo scopo la macchina, in corrispondenza del bulkhead, dispone di sensori disposti sui due lati della circonferenza macchina e su tre altezze. Appare fondamentale procedere alla registrazione:

- Pressione della camera di scavo, misurata in bar, in corrispondenza della calotta della macchina (average top pressure)
- Pressione della camera di scavo, misurata in bar, in corrispondenza del piano dei centri (average middle pressure)
- Pressione della camera di scavo, misurata in bar, in corrispondenza dell'arco rovescio (average bottom pressure)
- Rapporto delle suddette pressioni fra l'inizio e la fine del ciclo di lavoro
- Registrazione delle perdite di pressione

L'esame dell'andamento della pressione durante il ciclo di lavoro permette di evidenziare se il confinamento del fronte risulta continuo nel tempo e quindi tale da evitare periodi in cui avviene un decadimento del valore di pressione in camera di scavo al quale può essere associato il detensionamento del nucleo al fronte ed il prodursi di perdite di volume (ad esempio nella fase in cui i martinetti vengono ritratti per la posa di un nuovo anello di rivestimento).

Le perdite di pressione devono essere accuratamente registrate allo scopo di correlarle ai dati di monitoraggio in superficie.

5.6. GRAFICI DI CONTROLLO

Quale proposta per l'utilizzo dei dati da gestire in fase di esecuzione dei lavori si propone la predisposizione sistematica dei seguenti grafici, riportanti in ascissa il numero di anello ovvero le progressive lungo il tracciato delle gallerie:



- Peso di volume – Numero anello
- D.Q.I. e I.Q.I – Numero di anello
- Durata fase di scavo – Numero di anello
- Durata installazione anello – Numero anello
- Rapporto fermi/ciclo di avanzamento – Numero di anello
- Peso (Volume) di materiale scavato – Numero di anello
- Volume di miscela iniettata – Numero di anello
- Rapporto Volume di materiale scavato/Volume di miscela – Numero di anello
- Velocità di rotazione della coclea – Numero di anello
- Pressione di iniezione della miscela di riempimento – Numero di anello
- Forza di Spinta media – Numero di anello
- Momento torcente della testa (medio) – Numero di anello
- Velocità di rotazione della testa – Numero di anello
- Velocità di avanzamento – Numero di anello
- Corsa dei cilindri – Numero di anello
- Pressione del martinetto n° - Numero di anello
- Pressioni al fronte (medio) – Numero di anello
- Rapporto pressione al fronte inizio/fine ciclo – Numero di anello
- Perdite di pressione – Numero di anello
- Grafico con l'andamento delle pressioni lungo l'altezza della camera di scavo

Analoghi grafici dovranno essere predisposti anche con riferimento al tempo (disposto in ascissa) con intervalli di lettura pari a 5-10 secondi.



Appare inoltre predisporre alcuni grafici di sintesi che riportano i principali parametri di scavo e li correlano ai dati derivati dal programma di monitoraggio.

Al riguardo si fa presente che è stato predisposto un programma di monitoraggio che permette di misurare:

- Cedimenti/sollevamenti in superficie (reticolo di controllo topografico)
- Cedimenti differenziali in corrispondenza di edifici ed eventuali rotazioni di edifici alti
- Andamento della quota di falda (piezometri PZ)
- Stato tensionale dell'anello di rivestimento e valori ricavati dalle stazioni speciali predisposte in sotterraneo.

I principali grafici di sintesi risultano:

- Pressioni al fronte, Cedimenti – Numero di anello
- Rapporto Volume di materiale scavato/Volume di miscela, Cedimenti – Numero di anello
- Perdite di pressione, Rapporto fermi/ciclo di avanzamento – Numero di anello
- Distribuzione delle pressioni sul fronte – Altezza camera di scavo
- Velocità di rotazione testa / Velocità di rotazione della coclea – Cedimenti – Numero di anello



6. CONSIDERAZIONI CONCLUSIVE

Oggetto della presente relazione sono state le modalità di scavo mediante TBM del tipo EPB della galleria naturale “Verduno”, opera facente parte del Lotto 6, Tronco 2 del collegamento autostradale A6-A21 (Asti-Cuneo).

Nel dettaglio si sono esaminate, per le principali Formazioni geologiche interessate, le pressioni al fronte da utilizzare nel corso degli scavi e le spinte necessarie per consentire l'avanzamento della macchina. Si sono infine considerati i principali “parametri operativi” e “dati di scavo” da tenere sotto controllo durante gli avanzamenti.