

# REGIONE CAMPANIA

Acqua Campania S.p.A.

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

## PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICA ED ECONOMICA

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

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

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

I Progettisti



Coordinatore responsabile della  
Integrazione delle Prestazioni  
Specialistiche

Revisione	Data	Descrizione	Redatto	Controllato	Approvato
0	Febbraio 2022	Integrazioni richieste dal Comitato Speciale (DPCM 4/11/2021)	P. Fantini	G. Ragazzo	F. Rossi
TITOLO : <b>RELAZIONE TECNICA GALLERIA DI DERIVAZIONE E OPERE CONNESSE - ALLEGATO - ANALISI DI RISCHIO PER LA SCELTA DELLA MACCHINA, PRODUZIONI E PARAMETRI DI SCAVO</b>			Progettazione:  		
Allegato	<b>ED.02.7.1</b>		Revisione:	0	Scala: -

## INDICE

<b>1. INTRODUZIONE.....</b>	<b>3</b>
1.1 Inquadramento generale .....	3
1.2 Scopo del documento .....	5
<b>2. DOCUMENTI DI RIFERIMENTO .....</b>	<b>6</b>
2.1 Norme e raccomandazioni .....	6
2.2 Bibliografia .....	6
<b>3. IDONEITÀ DELLA SCELTA TBM.....</b>	<b>8</b>
3.1 Concetti generali .....	8
3.1.1 Panoramica sul metodo utilizzato.....	9
3.1.2 Definizione del rischio per quanto riguarda lo scavo di TBM.....	10
3.1.3 Definizione del "livello di rischio" .....	11
3.2 Analisi multicriteria .....	14
3.2.1 Funzionamento del modello statistico digitale .....	14
3.2.2 Gestione statistica delle variabili geomeccanica .....	15
<b>4. ASPETTI GEOMECCANICI DEL PROGETTO .....</b>	<b>18</b>
4.1 Contesto geomeccanico .....	18
4.2 Modello del comportamento dell'ammasso e rischi indotti .....	19
4.2.1 Convergenza del tunnel .....	20
4.2.2 Stabilità del fronte .....	23
4.2.3 Clogging.....	25
4.2.4 Swelling .....	27
4.2.5 Valutazione dei parametri di scavo - Campi di applicazione e criteri di selezione della macchina .....	28
<b>5. PARAMETRI DI SCAVO E LA RISPOSTA DELLA TBM .....</b>	<b>38</b>
5.1 Principi per la valutazione della penetrazione netta.....	40
5.2 Calcolo iterativo della penetrazione dei cutter.....	42
5.3 Coppia e spinta della TBM.....	44

5.3.1	Stima della spinta.....	45
5.3.2	Applicazione sovrascavo .....	46
5.3.3	Stima della coppia .....	47
5.4	Consumo dei cutter.....	49
5.5	Profilo pressioni .....	52
<b>6.</b>	<b>PRODUZIONI ATTESE .....</b>	<b>53</b>
6.1	Tempo di scavo.....	53
6.2	Ciclo di avanzamento & tempi elementari.....	54
6.3	Avanzamenti medi .....	56
6.3.1	Tempo impiegato per ogni operazione.....	56
6.3.2	Avanzamenti e prestazioni della TBM.....	56
6.3.3	Tempo di avanzamento cumulativo .....	57
<b>7.</b>	<b>CONCLUSIONI.....</b>	<b>59</b>

## **1. INTRODUZIONE**

Questo elaborato è realizzato nell'ambito delle attività di progetto di fattibilità tecnico economica (con riferimento allo schema di decreto ministeriale recante "definizione dei contenuti della progettazione nei tre livelli progettuali" ai sensi dell'articolo 23, comma 3 del decreto legislativo 18 aprile 2016, n. 50, capo 2), concernenti l'intervento di utilizzo idropotabile delle acque dell'invaso di Campolattaro.

### **1.1 INQUADRAMENTO GENERALE**

Le opere previste in progetto si inquadrano in un intervento generale denominato "Piano di interventi per il miglioramento del Sistema Idrico Regionale - Acquedotto Intercomunale ex CITL - Condotta Carditello – Castel Volturno" che mira alla risoluzione definitiva delle problematiche afferenti all'approvvigionamento idrico dell'area Domitia.

Le seguenti opere civili fanno parte dell'intervento di progettazione della galleria di derivazione sopra citato:

- ✓ Galleria di derivazione vera e propria, a partire dal pozzo di presa esistente in corrispondenza dello scarico di mezzofondo della diga fino al portale di imbocco completo di opere di attacco, galleria artificiale ed opere di sostegno;
- ✓ Camerone di collegamento tra il tronchetto predisposto in corrispondenza dello scarico di mezzofondo della diga esistente;
- ✓ Discenderia intermedia completa di opere di attacco, galleria artificiale e portale;
- ✓ Camerone di collegamento tra la galleria principale e la discenderia;
- ✓ Pozzo piezometrico in corrispondenza dell'inizio della condotta forzata;
- ✓ Pozzo di ventilazione ed evacuazione lato diga.

Relativamente alla galleria di derivazione la scelta è stata quella di realizzare una galleria porta-tubo che consenta di assorbire meglio eventuali problematiche legati ad azioni sismiche. Essa sarà realizzata con metodo meccanizzato ed avrà un diametro di scavo di 5,40 m.

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



**Fig. 1.1 – Planimetria di inquadramento**

## **1.2 SCOPO DEL DOCUMENTO**

La presente relazione intende analizzare l'attività di scavo meccanizzato previsto dal progetto secondo tecniche di analisi multicriteria (Multi-Criteria Decision Analysis - MCDA) con lo scopo di fornire una valutazione complessiva delle prestazioni e dei rischi per le tipologie di TBM previste dal progetto, comparandole tra loro.

L'approccio multicriteri fornisce una procedura sistematica per aiutare i decisori nella scelta tra le diverse alternative caratterizzate da variabili decisionali a volte diverse e non uniformi tra loro. L'obiettivo è quello di migliorare la qualità delle soluzioni proposte, facendo scelte più esplicite in maniera razionale ed efficace e fornendo ai decisori potenti funzionalità di analisi, esplorando e confrontando un insieme di alternative diverse tra loro.

In definitiva, l'obiettivo dell'analisi multicriteri che proponiamo in questo documento è quello di analizzare e valutare i tempi di scavo e i rischi per la TBM proposta, mostrando una previsione delle performance e delle tempistiche richieste.

Lo scopo di questo documento è, dunque, formulare un parere generale sulla scelta del tipo di TBM analizzando i seguenti punti:

- ✓ analisi multicriteri per valutare la scelta della TBM in relazione alle sue prestazioni in termini di minimizzazione del rischio e massimizzazione della velocità;
- ✓ analisi quantitativa del rischio per rafforzare le scelte fatte sulla base di un modello matematico;
- ✓ valutazione dei parametri della TBM (velocità di avanzamento, usura dei cutter, coppia, spinta, ecc.);
- ✓ proposte tecniche con miglioramenti da apportare durante la fase di produzione, così da trovare la migliore configurazione per lo scavo in relazione ai rischi del progetto.

## **2. DOCUMENTI DI RIFERIMENTO**

### **2.1 NORME E RACCOMANDEAZIONI**

- [1] AFTES Recommendation - GT32R2F1 [2012]: "Characterization of geological, hydrogeological and geotechnical uncertainties and risks".
- [2] AFTES Recommendation - GT4R3F1 [2000]: "Choice of mechanized excavation techniques".
- [3] DAUB recommendation, [2010]. "Recommendations for selecting and evaluating tunnel boring machines".
- [4] International Tunneling Association (ITA), 2004. "Guidelines for tunneling risk management: International Tunneling Association, Working Group No. 2"

### **2.2 BIBLIOGRAFIA**

- [5] Aydan O. [2017] : «Rock dynamics» ; ISRM - International Society for Rock Mechanics.
- [6] Hoek E., Marinos P. [2000] : «Predicting squeeze Tunnels & Tunnelling International».
- [7] Panet, M. [1995] : «Calcul des Tunnels par la Méthode de Convergence–Confinement». Presses de l'École Nationale des Ponts et Chaussées.
- [8] Vlachopoulos, N.; Diederichs, M.S. [2009] : "Improved longitudinal displacement profiles for convergence-confinement analysis of deep tunnels". Rock Mechanics and Rock Engineering.
- [9] Bieniawski, Z.T.; Celada, B.; Galera, J.M.; Taradàguila, I., [2008] : "New applications of the excavability index for selection of TBM types and predicting their performance", in: Proc. WTC 2008, pp. 1618-1629.
- [10] Bruland, A.; Eriksen, S.; Johannessen, O.; Myran, A., [1990] : "Drillability - Drilling Rate Index Catalogue. Project Report 13-90". The Norwegian Institute of Technology, Trondheim, Norway.
- [11] Concilia, M, [2003] : "Scavo meccanizzato a piena sezione di gallerie in ammassi rocciosi", Politecnico di Torino, Corso di "Costruzione di gallerie", Torino, Italy.
- [12] Cassinelli, F.; Cina, S.; Innaurato, N.; Mancini, R.; Sampaolo, A., [1982] : "Power consumption and metal wear in tunnel-boring machines: analysis of tunnel-boring operation in hard rock", in: Tunnelling '82, London, pp. 73-81.
- [13] Sapigni, M.; Berti, M; Bethaz, F.; Bustillo, A.; Cardone, G., [2002] : "TBM performance estimation using rock mass classifications". Int J Rock Mech Min Sci, 39, pp. 771.
- [14] Grandori, R.; Bieniawski, Z.T.; Vizzino, D.; Lizzadro, L.; Romualdi, P.; Busillo, A., [2011] : "Hard rock extreme conditions in the first 10 km of TBM driven Brenner Exploratory Tunnel", in: RETC Proceedings, Littleton (Colorado), pp. 667-685.
- [15] Dolcini, G.; Fuoco, S.; Ribacchi, R., [1996] : "Performance of TBMs in complex rock masses", in: North American Tunnelling '96, Balkema, Rotterdam.

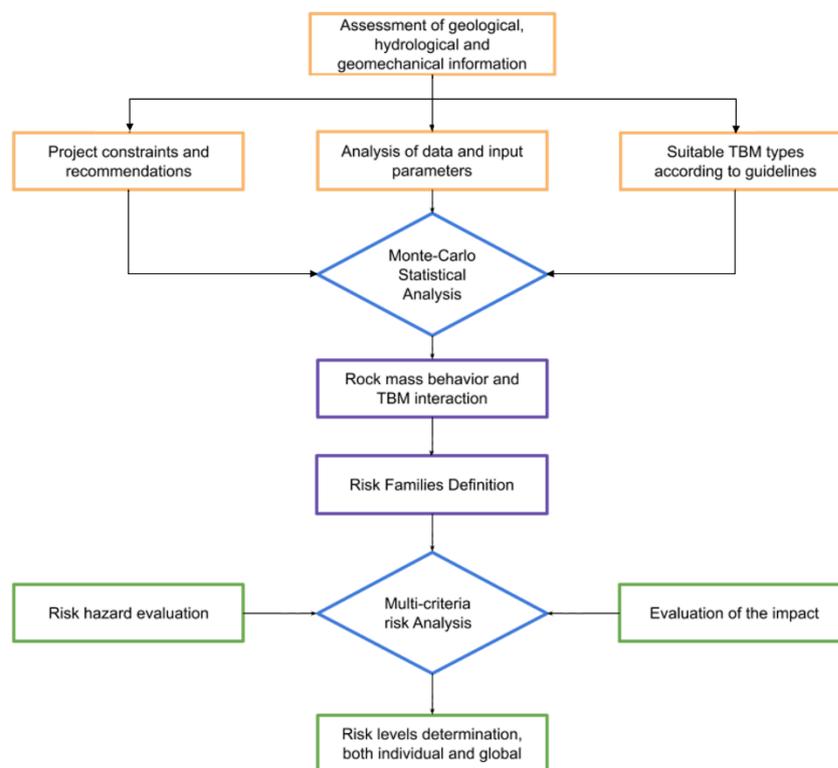
- [16] Innaurato, N.; Mancini, R.; Rondena, R.; Zaninelli, A., [1991] : “Forecasting and effective TBM performances in a rapid excavation of a tunnel in Italy”, in: Proceedings of the Seventh International Congress ISRM, Aachen, pp. 1009-1014.
- [17] Rostami J., et al. [2005] : « Review of issues related to Cerchar Abrasivity testing and their implications on geotechnical investigations and cutter cost estimates ».
- [18] Maidl U. and Comulada M., [2011] : “Prediction of epb shield performance in soils”, in Proceedings - Rapid Excavation and Tunneling Conference, January 2011

### 3. IDONEITÀ DELLA SCELTA TBM

#### 3.1 CONCETTI GENERALI

La valutazione del tipo di TBM da adottare è legata ad una serie di fattori interconnessi che sono presentati nelle raccomandazioni delle principali associazioni nel campo delle opere sotterranee. La metodologia di analisi che abbiamo adottato qui si aggiunge alle linee guida disponibili utilizzando un processo di analisi quantitativa del rischio associato ai modelli numerici di analisi statistica di dettaglio.

Per condurre tale approccio che contempla tutte le sfide (geometria, geotecnica, metodo di costruzione, sicurezza, costi, scadenze, ambiente, ecc.) e illustra le scelte di maggiore rilevanza, è necessario applicare i passaggi illustrati nel diagramma seguente.



**Fig. 3.1 – Processo di analisi per la scelta dei parametri e TBM in un contesto rock**

Più in dettaglio, la procedura proposta consiste nei seguenti passi:

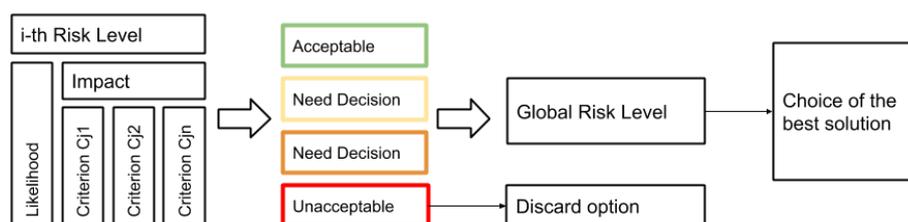
- ✓ Stabilire un modello di comportamento geomeccanico per la litologia presente e identificare attraverso analisi statistiche i potenziali rischi lungo l'allineamento, quest'ultimo discretizzato in un numero sufficiente di sezioni con le stesse caratteristiche meccaniche, fisiche e morfologiche,

- ✓ Identificare il tipo di macchine di scavo (TBM) che possono corrispondere alle esigenze del progetto e valutare i vari parametri della TBM che influenzano i vincoli dettati dal progetto,
- ✓ Definire i rischi potenziali e valutare la probabilità di occorrenza di ciascun rischio lungo l'allineamento,
- ✓ Stimare l'impatto di ogni tipo di TBM sul progetto in relazione alle questioni che possono essere direttamente interessate dallo scavo,
- ✓ Quantificare il livello iniziale di rischio e definire misure di mitigazione, ove necessario, per valutare il livello di rischio residuo,
- ✓ Quantificare per ogni TBM il livello di rischio complessivo legato ai pesi di ogni famiglia di rischio,
- ✓ Specificare in dettaglio le caratteristiche migliori della TBM da adottare per quanto riguarda i vincoli del progetto e definire le indagini necessarie per ridurre ulteriormente il livello di incertezza.

### 3.1.1 Panoramica sul metodo utilizzato

Le raccomandazioni AFTES e DAUB offrono parametri di scelta per le tecniche di scavo meccanizzate. Questi parametri sono stati integrati in un database digitale per la valutazione della gravità di ogni fonte di rischio, unitamente alle considerazioni circa le recenti evoluzioni delle TBM per scavo in roccia.

In tale approccio, qualora uno o più degli eventi analizzati presentasse un livello di rischio inaccettabile, tale da non può essere mitigato, l'opzione in questione verrebbe esclusa. La scelta tra soluzioni che presentano livelli accettabili di rischio viene effettuata in base ai punteggi di rischio ottenuti per ogni alternativa. A seguito dell'analisi dei rischi propri ad ogni famiglia di rischio, si può stimare un valore complessivo pari alla somma di tutti i valori del livello di rischio residuo per ogni famiglia, ottenuti dopo l'applicazione delle azioni correttive. La macchina più adatta sarà, quindi, quella che presenterà un valore inferiore del livello di rischio complessivo.



**Fig. 3.2 – Diagramma di flusso della procedura di analisi dei rischi per la selezione della TBM**

### 3.1.2 Definizione del rischio per quanto riguarda lo scavo di TBM

I rischi associati alla macchina per ogni famiglia di rischio sono caratterizzati da tre elementi:

- ✓ **Evento:** occorrenza o modifica di un particolare insieme di circostanze,
  - Un evento può essere univoco o riprodursi e può avere diverse cause,
  - Un evento può consistere in qualcosa che non accade,
  - Un evento può talvolta essere definito "incidente";
- ✓ **Causa o fonte di rischio:** qualsiasi elemento che, da solo o combinato con altri, presenti un potenziale intrinseco per generare un rischio,
- ✓ **Conseguenza:** effetto di un evento che influisce sugli obiettivi,
  - Un evento può generare una serie di conseguenze,
  - Una conseguenza può essere certa o incerta e può avere effetti positivi o negativi sul raggiungimento degli obiettivi,
  - Le conseguenze possono essere espresse qualitativamente o quantitativamente,
  - Le conseguenze iniziali possono innescare reazioni a catena.

L'identificazione dei rischi richiede, pertanto, l'analisi delle incertezze relative ai loro effetti sui risultati attesi. A prima vista tutte le incertezze costituiscono fonti di rischi, ma accade che alcune siano quasi senza effetto. Un esempio potrebbe essere l'incertezza relativa all'ubicazione del contatto tra due formazioni geologicamente distinte ma geotecnicamente simili, contatti che non richiedono pertanto alcuna modifica delle disposizioni costruttive e nessun impatto sul raggiungimento degli obiettivi.

La fase di identificazione del rischio per la scelta della macchina di scavo consiste quindi nel cercare, tra le incertezze individuate, quelle che potrebbero portare al verificarsi di eventi imprevisti. Questi sono eventi le cui conseguenze costituirebbero cambiamenti nelle circostanze rispetto a quelle prese in considerazione inizialmente nei modelli geologici/idrogeologici e nel profilo longitudinale geomeccanico selezionato.

Al fine di permettere un'adatta identificazione dei rischi associati al *tunnelling* risulta estremamente importante svolgere delle accurate ricerche:

- ✓ sulle raccomandazioni AFTES e DAUB per selezionare i parametri per i quali vengono forniti i campi di applicazione delle varie TBM,
- ✓ di bibliografia e letteratura scientifica sul feedback di opere simili costruite nelle

immediate vicinanze e / o in condizioni geotecniche e ambientali simili.

### 3.1.3 Definizione del "livello di rischio"

L'importanza di un rischio o di un'aggregazione di rischi, espressa come combinazione delle conseguenze e delle probabilità, definisce il livello di rischio. Una volta identificato il rischio, la valutazione del livello di quest'ultimo è un processo che comporta il seguente approccio:

- ✓ valutazione della "probabilità" che qualcosa accada: questa probabilità può essere misurata o determinata obiettivamente o soggettivamente, qualitativamente o quantitativamente. Nel progetto attuale si è tentato di stimarla in termini matematici (come una probabilità su un database o una frequenza in un determinato periodo).
- ✓ valutazione dell'"impatto" attraverso i criteri di rischio o i termini di riferimento rispetto ai quali viene valutata l'importanza del rischio. I criteri di rischio si basano sugli obiettivi dell'organizzazione e sui contesti esterno e interno. Questi criteri possono essere derivati da standard, leggi, criteri e altri requisiti. È infatti il committente, generalmente, a impostare i valori dei criteri da utilizzare per valutare l'accettabilità di un determinato rischio. Questi criteri e i valori di soglia selezionati sono normalmente specificati nel "Piano di gestione del rischio". In questo caso, sono stati scelti alcuni criteri che potrebbero esprimere le potenziali conseguenze di uno scavo meccanizzato in contesto alpino.

In sintesi, il livello di rischio è definito come segue:

$$R = \text{probabilità} * \text{Massimo impatto} \{ \text{costi di sicurezza, scadenze, ambiente, etc.} \}$$

I passi per l'analisi dei rischi comportano quindi quattro operazioni:

- ✓ la quantificazione della probabilità di un evento e/o delle sue conseguenze attraverso l'analisi dei dati geologici e geotecnici,
- ✓ la quantificazione delle conseguenze associate a un evento identificato come rischio, utilizzando le prescrizioni riportate nelle raccomandazioni DAUB e AFTES e la ricerca bibliografica sul feedback,
- ✓ determinazione del livello di rischio (importanza del rischio) combinando la probabilità e le conseguenze (impatti),
- ✓ determinazione del livello di rischio complessivo in base al peso (incidenza o importanza) di ogni famiglia di rischio.

### Matrice di rischio per l'analisi della scelta di TBM

La valutazione del rischio può essere presentata sotto forma di "matrice di rischio". Ovviamente, la matrice di rischio è specifica per ogni progetto e per ogni contratto. La matrice di rischio per la scelta della macchina di scavo presentata di seguito si basa sulla raccomandazione AFTES GT32R2F1:

**Tab. 3-1: Definizione dei livelli di rischio per l'analisi della scelta del TBM**

Probabilità	4	4	8	12	16	LIVELLO DI RISCHIO		
	3	3	6	9	12	$R \geq 12$	Non accettabile	Irrealizzabile
2	2	4	6	8	$12 > R > 12$	Revisione necessaria	Modifiche pesanti	
1	1	2	3	4	$5 \geq R > 1$	Revisione minore	Sono necessarie alcune correzioni	
R	1	2	3	4	$R \leq 1$	Accettabile	-	
	Impatto							

Il livello di rischio così definito è la combinazione di probabilità (probabilità di occorrenza) e impatto (conseguenza):

"R = P x C".

Mentre la probabilità di un evento a volte non è influenzata dal tipo di macchina, il suo impatto è sempre influenzato dal metodo di scavo utilizzato.

Quantificazione della probabilità

La probabilità è espressa come percentuale di probabilità che si verifichi un evento con conseguenze. Ciò può essere collegato alle caratteristiche del terreno incontrato o all'organizzazione del lavoro in tutti i suoi aspetti relativi agli impianti, o altro.

**Tab. 3-2: Definizione del livello di probabilità per l'analisi della scelta**

NOTAZIONE	PROBABILITÀ	INTERVALLO
4	Possibile	$20\% \leq P < 50\%$
3	Improbabile	$6\% \leq P < 20\%$
2	Molto improbabile	$2\% \leq P < 6\%$
1	Impossibile	$< 2\%$

Quantificazione del livello di impatto

Il livello di impatto qui analizzato è una variabile misurata in relazione allo scavo del tunnel; esclude qualsiasi altra operazione che non abbia alcun impatto sugli scavi meccanizzati. La

tabella seguente mostra un esempio di impatti per opere in sotterraneo, con valutazione qualitativa o quantitativa.

**Tab. 3-3: Definizione del livello di impatto**

NOTAZIONE	LIVELLO	INTERVALLO DI VALORI		
		C1 (LIMITE DI TEMPO)	C2 (COSTO)	C3 (SICUREZZA)
<b>4</b>	Molto alto	9 mesi ≤ t	c ≥ 20 M€	s = Morte (s)
<b>3</b>	Alto	3 mesi ≤ t < 9 mesi	5 M€ ≤ c < 20 M€	s = Diversi feriti gravi
<b>2</b>	Medio	1 mese ≤ t < 3 mesi	0,5 M€ ≤ c < 5 M€	s = Gravi ferite
<b>1</b>	Basso	t < 1 mese	c < 0,5 M€	s = Ferite minori

#### Quantificazione del livello di rischio complessivo

I rischi analizzati nel contesto del nostro studio sulla scelta della macchina di scavo appartengono a tre famiglie:

- ✓ **Famiglia G:** rischi della TBM legati a eventi geologici (instabilità del fronte di scavo, convergenza, *spalling*, *rockburst*, venute d'acqua, ecc.),
- ✓ **Famiglia P:** rischi della TBM legati alla produzione e all'avanzamento (produzione ordinaria, perforazione della testa, assemblaggio / smontaggio / movimenti della macchina, ecc.),
- ✓ **Famiglia V:** altri fattori (organizzazione, esperienza, gestione, investimenti, ecc.).

Al fine di determinare il livello di rischio complessivo per le possibili macchine considerate, è stato introdotto il concetto di "peso familiare" per tenere conto dell'incidenza di ogni famiglia in base a due fattori:

- ✓ Da un lato il numero "NR" degli eventi che costituiscono ogni famiglia,
- ✓ D'altra parte, la percentuale di rischi appartenenti ai tre livelli di rischio (accettabili, da decidere, da trattare).

Di conseguenza, il livello di rischio complessivo (NRG) è dato dai tre livelli di rischio complessivi legati alla TBM. La scelta finale della TBM mira, quindi, a minimizzare il livello di rischio complessivo.

$$NRF_j = n_{Rj} \cdot \sum NR_i$$

$$NRG_{acceptable} = [\% n(NR_i \leq 1)] \cdot \sum_{j=1}^3 NRF_j$$

$$NRG_{to\ approve} = [\% n(1 < NR_i \leq 5)] \cdot \sum_{j=1}^3 NRF_j$$

$$NRG_{to\ treat} = [\% n(5 < NR_i < 12)] \cdot \sum_{j=1}^3 NRF_j$$

## 3.2 ANALISI MULTICRITERIA

### 3.2.1 Funzionamento del modello statistico digitale

Nell'ambito dell'analisi *multi-criteria* è stata condotta un'analisi statistica numerica che consente la rapida elaborazione di un numero molto elevato di variabili memorizzate in un database a cui è possibile applicare algoritmi di calcolo analitico per la valutazione della probabilità / impatto e quindi il livello di rischio residuo lungo l'allineamento.

D'altra parte, lo sviluppo di questo modello di analisi fornisce uno strumento che può evolvere durante l'esecuzione del lavoro per migliorare l'accuratezza delle valutazioni dei rischi sulla base dei dati acquisiti direttamente in loco.

L'approccio operativo di questo tipo di analisi è descritto tramite l'esecuzione dei seguenti passaggi:

- ✓ Digitalizzazione del profilo geomeccanico e del profilo longitudinale, nonché dei parametri associati con un intervallo di valori. Il database contiene sia il valore di riferimento che le variabili quali: deviazione standard, valori massimi e minimi, tipo di distribuzione e così via.
- ✓ Discretizzazione del dominio dell'analisi. Si tratta di suddividere la progressiva lineare in segmenti (sezioni omogenee) di lunghezza uniforme (10 m nel caso esaminato) con le stesse caratteristiche meccaniche, morfologiche, ecc.
- ✓ Simulazione Monte-Carlo: il dominio dell'analisi presenta un gran numero di parametri eterogenei, in termini di dimensioni e variabilità delle proprietà, che richiedono l'elaborazione dell'iterazione con metodi statistici (non deterministici), al fine di prendere in considerazione l'intervallo di valori per calcolare la probabilità di ogni evento temuto appartenente alla famiglia di rischio geologico. Ad ogni iterazione, il sistema genera un set di parametri di input (ad esempio, il modulo elastico della roccia intatta, il valore RMR e così via) per ogni segmento in base al tipo di distribuzione statistica definito per ogni variabile considerata.
- ✓ Attivazione dell'algoritmo di calcolo analitico per definire il comportamento del terreno (risposta di sollecitazione e deformazione) per ogni insieme di parametri collegati a ciascun segmento.
- ✓ Integrazione delle caratteristiche dimensionali delle macchine (ipotesi prese sulla base delle macchine disponibili sul mercato) e attivazione dell'algoritmo di calcolo analitico per definire la risposta di ogni macchina in termini di parametri di scavo (coppia, spinta,

ruote di consumo, ecc.).

- ✓ Definizione della probabilità e dell'impatto sulla base di valutazioni precedenti.
- ✓ Calcolo del livello di rischio residuo per ogni evento temuto previsto in ciascuna delle sezioni omogenee analizzate. Al termine di questa analisi, il livello di rischio complessivo verrà calcolato per ogni TBM in base al peso di ogni famiglia di rischio.
- ✓ Registrazione dei risultati nel database digitale e monitoraggio automatico dei risultati.

### **3.2.2 Gestione statistica delle variabili geomeccanica**

Per condurre un'analisi secondo il metodo Monte-Carlo, è stato seguito l'approccio seguente:

- ✓ Creazione di un database digitale contenente tutte le variabili geomeccaniche e definizione del campo dei dati di input per una determinata distribuzione (deviazione standard del 20%).
- ✓ Definizione del campo dei possibili dati di input è stata ottenuta acquisendo, all'interno della banca dati, i parametri e la distribuzione spaziale delle diverse litologie incrociate. Il risultato è una sequenza di segmenti (sezioni omogenee) di lunghezza costante pari a 10 m o 100 m (a seconda della disponibilità dei dati), ciascuno caratterizzato dai parametri geo-meccanici disponibili nei Documenti di gara.
- ✓ Riferimento ad un database georeferenziato che permette di interrogare le caratteristiche geo-meccaniche del tracciato nel punto del chilometro desiderato, con una precisione che garantisce la restituzione di un valore ogni dieci metri.
- ✓ Generazione casuale di set di parametri per avviare calcoli analitici,
- ✓ La generazione di voci casuali è stata effettuata tramite *Object Oriented Programming (OOP)* utilizzando il linguaggio "Python" che consente funzioni di distribuzioni parametriche continue.
- ✓ Esecuzione di calcoli deterministici utilizzando i dati di input generati nel punto precedente,
- ✓ Sovrapposizione dei risultati dell'analisi analitica per trarre le conclusioni finali sul comportamento del terreno.
- ✓ Per quanto riguarda la distribuzione dei valori, sono stati utilizzati tre tipi di distribuzione matematica:
  - Distribuzione normale (o gaussiana), dove i parametri necessari e sufficienti per definirne la forma sono il valore medio e la deviazione standard.
  - Distribuzione normale troncata: distribuzione di probabilità di una normale variabile casuale il cui valore è tuttavia condizionato da un limite inferiore e da un limite superiore. Questi limiti sono generalmente imposti dalla natura stessa della variabile, quindi per esempio per alcuni parametri geomeccanici non è ragionevole superare determinati valori limite.

- Distribuzione triangolare: una distribuzione di probabilità continua la cui funzione densità di probabilità descrive un triangolo, vale a dire zero sui due valori estreme lineare tra di loro e un valore intermedio.

La tabella seguente mostra in quale forma le variabili intrinseche del progetto sono state distribuite nell'analisi statistica secondo il metodo Monte-Carlo:

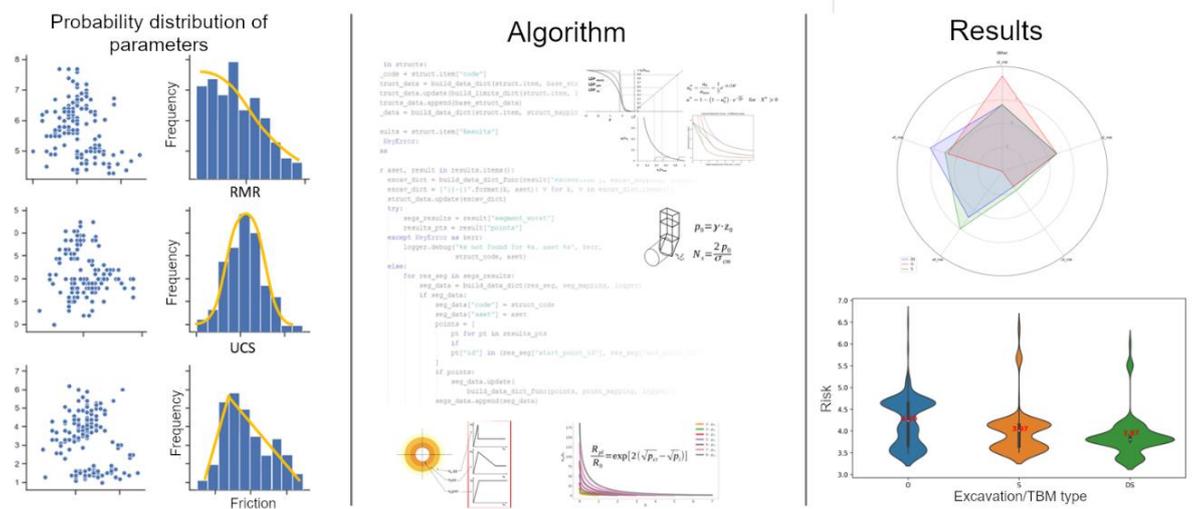
**Tab. 3-4: Esempio di modello statistico per alcune grandezze geomeccaniche nell'analisi statistica sviluppata**

GRANDEZZA	MODELLO PROBABILISTICO
Peso specifico - $\gamma$ [kN/m <sup>3</sup> ]	Gaussiano basato sulla deviazione media e standard
Forza compressiva unisiale della roccia intatta - UCS [MPa]	Gaussiano basato sulla deviazione media e standard
Parametro di rottura - $m_i$ [-]	Gaussiano basato sulla deviazione media e standard
Modulo di deformazione della roccia - $E_i$ [GPa]	Gaussiano basato sulla deviazione media e standard
Indice di qualità - RMR (Rock Mass Rating)	Distribuzione normale troncata sulla base della media, deviazione standard, limite inferiore uguale a 5 e limite superiore uguale a 100
Indice di forza geologica – GSI	Distribuzione normale troncata sulla base della media, deviazione standard, limite inferiore uguale a 5 e limite superiore uguale a 100
Coefficiente di attrito sullo scudo [-]	Distribuzione triangolare con estremo inferiore 0,1, intermedio 0,15, estremo superiore 0,35
Coefficiente di riduzione per angolo di attrito [-]	Distribuzione triangolare con estremo inferiore 0,35, intermedio 0,5, superiore 0,6

Per quanto riguarda i calcoli deterministici, abbiamo integrato nella programmazione orientata agli oggetti (OOP) le formulazioni analitiche descritte nei capitoli seguenti. Il processo viene svolto nelle iterazioni. Le funzioni scritte in Python permettono di leggere nel database i parametri geo-meccanici necessari per definire le distribuzioni parametriche che ad ogni iterazione generano input casuali per le funzioni analitiche specifiche.

Il risultato è l'aggregazione dei risultati in diverse forme, come diagrammi di violino, istogrammi e grafici radar.

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

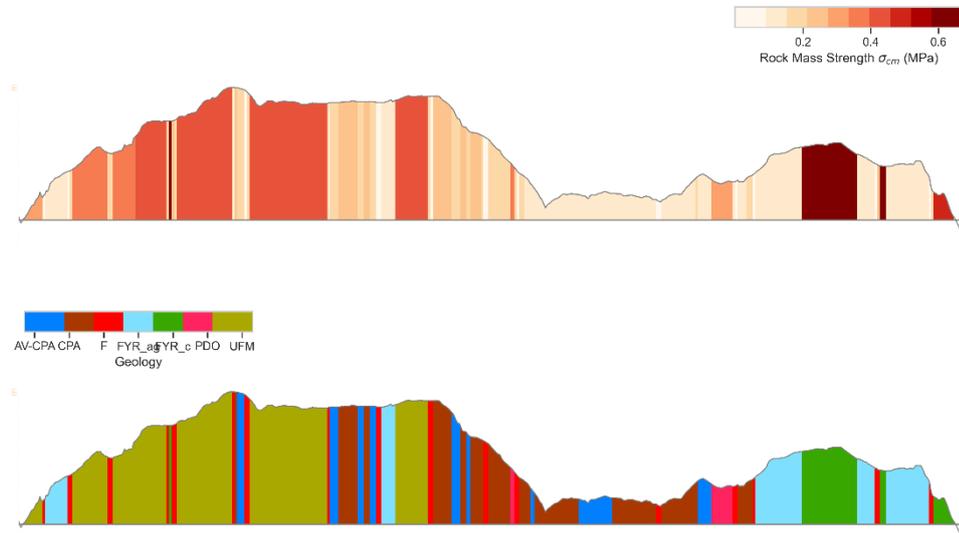


**Fig. 3.3 – Processo di analisi statistica secondo il metodo Monte-Carlo, per la scelta del TBM**

## 4. ASPETTI GEOMECCANICI DEL PROGETTO

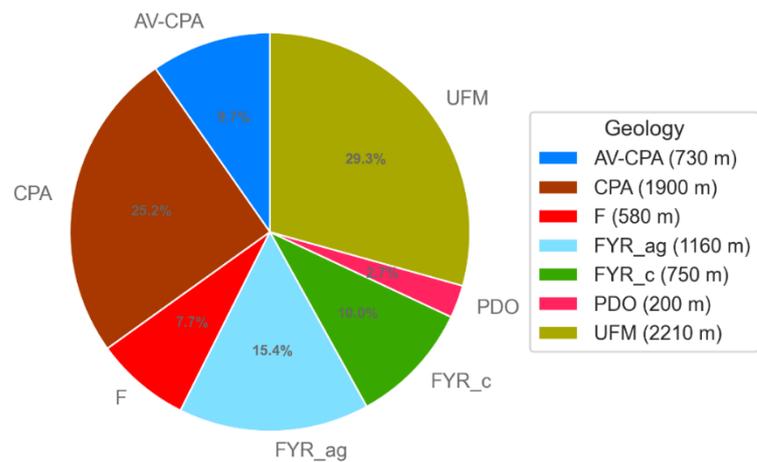
### 4.1 CONTESTO GEOMECCANICO

Nella figura seguente viene riportata una sintesi del profilo geologico a cui sono stati associati i valori di  $\sigma_{cm}$  in MPa.

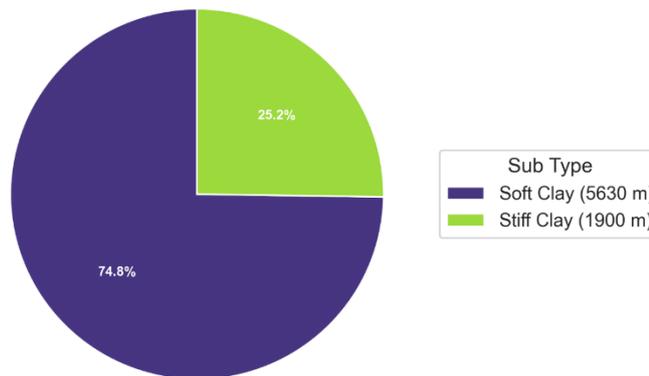


**Fig. 4.1 – Presentazione del profilo con le sezioni di  $\sigma_{cm}$  [MPa] e con le varie geologie.**

Il profilo è stato digitalizzato e le percentuali di formazioni geologiche attraversate vengono di seguito riportate.



**Fig. 4.2 – Distribuzione formazioni geologiche**



**Fig. 4.3 – Distribuzione categorie (Sub Types) di materiale scavato**

#### **4.2 MODELLO DEL COMPORTAMENTO DELL'AMMASSO E RISCHI INDOTTI**

Al fine di valutare la probabilità degli eventi critici per l'analisi di rischio della macchina, la prima fase di studio è l'analisi del comportamento intrinseco dell'ammasso. Questo costituisce l'elemento essenziale per il dimensionamento della struttura e la scelta delle tecniche e dei parametri di scavo.

La risposta sforzo-deformazione dell'ammasso in un mezzo continuo equivalente può essere classificata come segue:

- ✓ Comportamento elastico senza problemi di stabilità,
- ✓ Comportamento elasto-fragile con improvvisi problemi di rottura,
- ✓ Comportamento elasto-plastico con problemi di instabilità a medio-lungo termine,
- ✓ Comportamento in plastico e viscoplastico con problemi di instabilità severi e possibile comportamento ritardato a lungo termine.

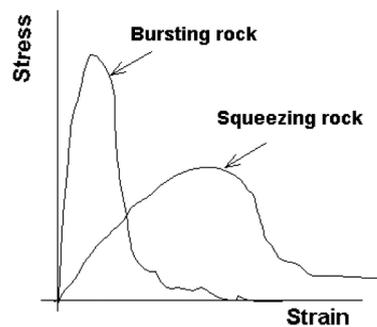


Fig. 4.4 – Curve tenso-deformative della roccia con comportamento fragile e duttile, Aydan et al. (2004)

#### 4.2.1 Convergenza del tunnel

L'analisi della deformazione della roccia/terreno rispetto alle sollecitazioni coinvolte fornisce il tipo di comportamento dell'ammasso attorno alla cavità/galleria. La risposta di deformazione a monte (estrusione-pre-convergenza) e a valle (convergenza) del fronte sono considerate.

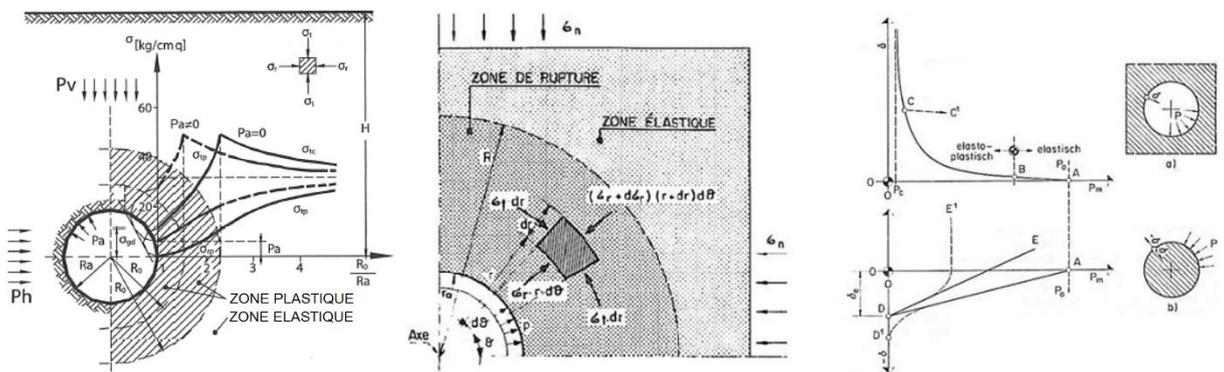
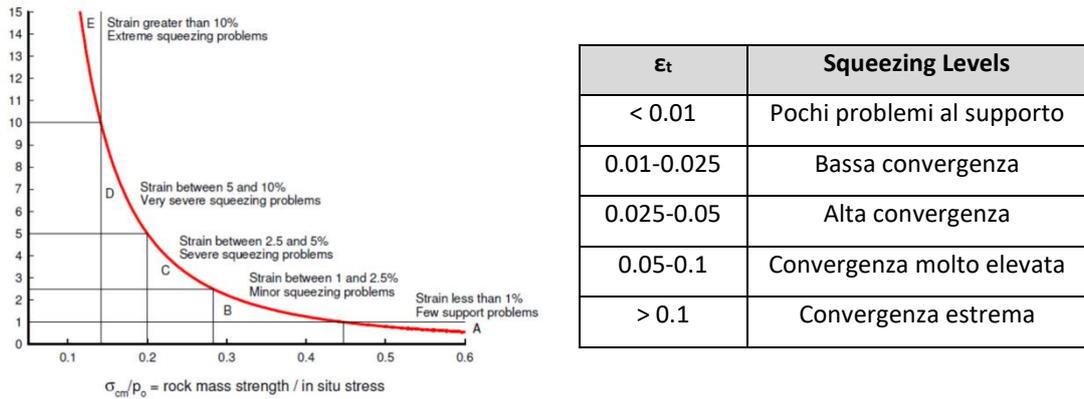


Fig. 4.5 – Diagramma del metodo analitico per il calcolo delle deformazioni della cavità

Come parte dell'analisi di deformazione di una cavità soggetta a stati di stress elevati, Hoek e Marinos hanno mostrato la validità della seguente equazione:

$$\epsilon = 0.2 \left( \frac{\sigma_{cm}}{P_0} \right)^{-2}$$

- ✓ Percentuale di convergenza definita da "Convergenza tunnel / Diametro tunnel x 100",
- ✓  $\sigma_{cm}$ : resistenza alla compressione monoassiale dell'ammasso,
- ✓  $P_0$ : tensione geostatica media.



**Fig. 4.6 – Rappresentazione dei livelli di convergenza e squeezing**

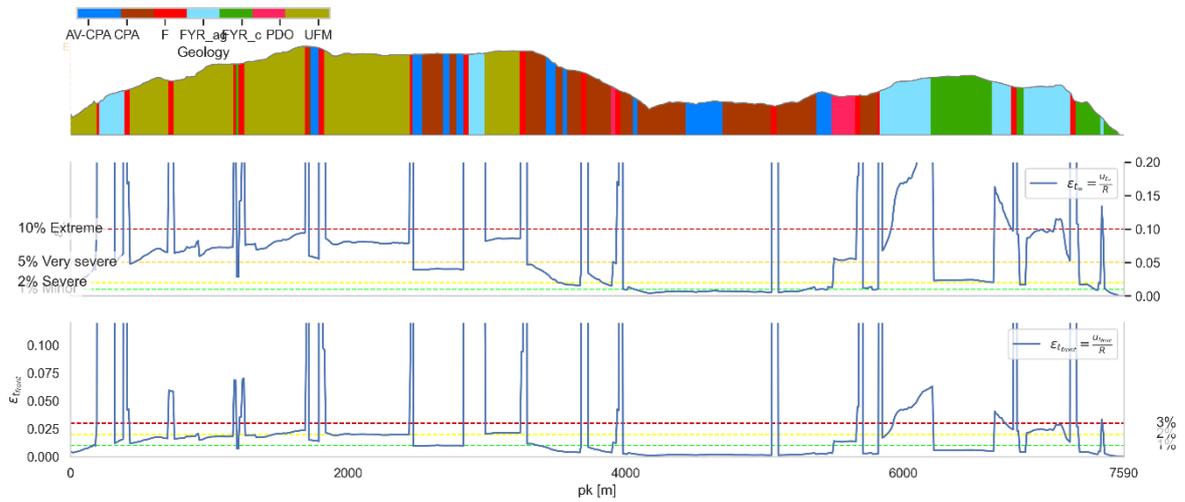
Allo stesso modo, Hoek e Marinos hanno definito l'estensione della zona di plastica e quindi il rapporto tra il raggio della zona plastica ( $R_{pl}$ ) e il raggio di scavo ( $R_0$ ):

$$\frac{R_{pl}}{R_0} = 1.25 \left( \frac{\sigma_{cm}}{P_0} \right)^{-0.57}$$

Nella maggior parte dei casi, in virtù della tipologia di materiale attraversato, è più probabile aspettarsi dei fenomeni deformativi, anche importanti, di tipo gravitativo come nel caso di *caving* severo piuttosto che di tipo spingente.

Tuttavia, da quel che si evince dalla figura seguente, il calcolo evidenzia dei rischi di alte convergenze in corrispondenza delle sezioni di faglia (rosso) e in tutti quei tratti in cui la copertura supera i 100m. Dal momento che il comportamento di *squeezing* è sovente legato ad una viscosità reologica del materiale, la tempo-dipendenza nell'attraversamento di zone ad alta convergenza gioca un ruolo fondamentale. Nel progetto in questione, la limitata estensione delle zone identificate e lo scavo meccanizzato permettono un avanzamento sufficientemente rapido per evitare di incorrere in problemi di bloccaggio della macchina. Si ricorda, infine, che l'analisi condotta definisce un profilo deformativo del cavo in condizioni intrinseche ed in assenza di pressioni di confinamento.

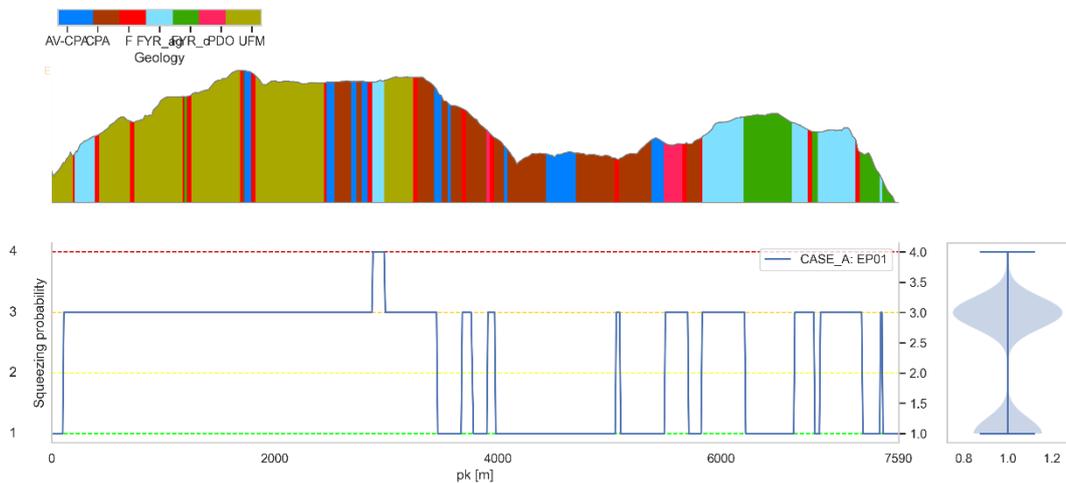
Prediction of squeezing behaviour of the Tunnel - Strain  $\epsilon_{L_c}$  vs  $\epsilon_{L_{front}}$



**Fig. 4.7 – Analisi del potenziale rischio di alte convergenze e/o comportamento spingente**

Per completare l'analisi effettuata, la curva di convergenza radiale lungo il tunnel ad una certa distanza dal fronte di scavo è stata definita in funzione della lunghezza di uno scudo tipico ( $\approx 11\text{m}$ ) facendo riferimento alla formulazione di Panet (1995).

Nella figura seguente si mostra il rischio di convergenza diviso in 4 livelli di probabilità, secondo quanto stabilito dall'AFTES [1].



**Fig. 4.8 – Valutazione della probabilità di instabilità del cavo ( $P_T$ ) per alte convergenze secondo AFTES**

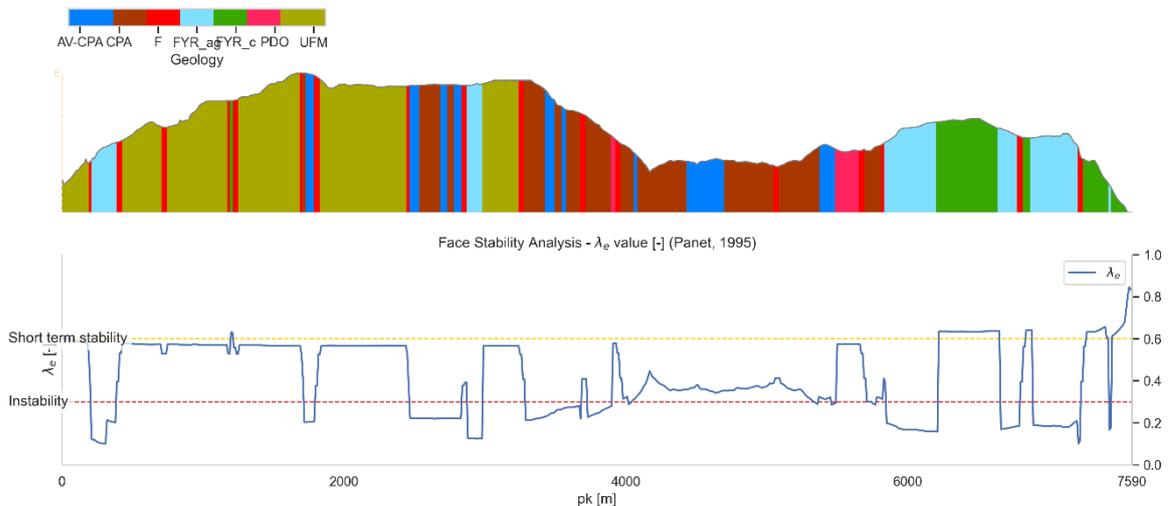
#### 4.2.2 Stabilità del fronte

La stabilità del fronte viene valutata in base al criterio di Panet [2] che definisce in particolare il coefficiente  $\lambda_e$ , in base allo stato delle sollecitazioni geostatiche e alla resistenza di compressione non contenuta dell'ammasso. Il coefficiente  $\lambda_e$ , infatti, rappresenta il tasso di resistenza sollecitata nell'ammasso durante lo scavo. Si tratta di un rapporto che definisce il tasso di sollecitazione della resistenza complessiva della roccia come rapporto tra la sollecitazione tangenziale ( $\sigma_t \sim 2P_0$ ) e la resistenza di compressione monoassiale dell'ammasso  $\sigma_{cm}$ :

$$P_0 = \frac{\gamma z_0}{1000} \quad N_s = \frac{2P_0}{\sigma_{cm}} \quad \lambda_e = \frac{K_P - 1 + 2/N_s}{K_P + 1}$$

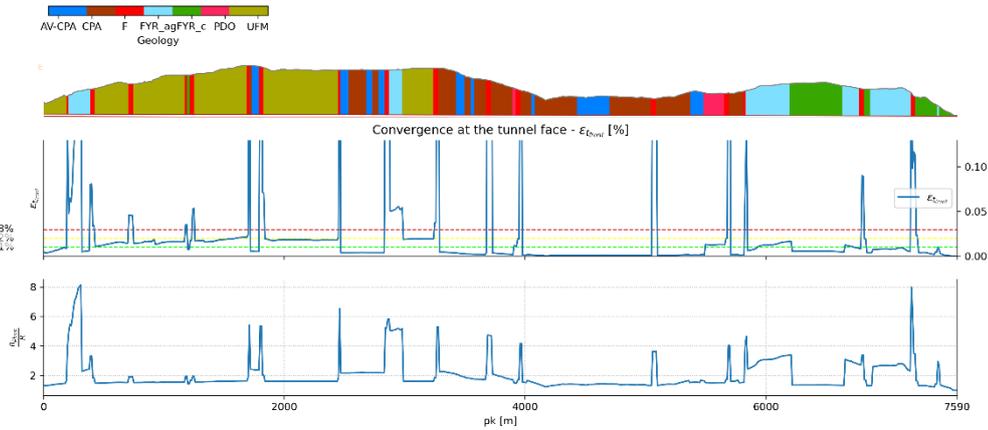
In Fig. 4.9 vengono mostrati i risultati della stabilità del fronte, con i limiti di riferimento definiti come:

- ✓  $\lambda_e > 0.6 \Rightarrow$  Stabilità
- ✓  $0.3 < \lambda_e < 0.6 \Rightarrow$  Stabilità temporanea (a breve termine)
- ✓  $\lambda_e < 0.3 \Rightarrow$  Instabile



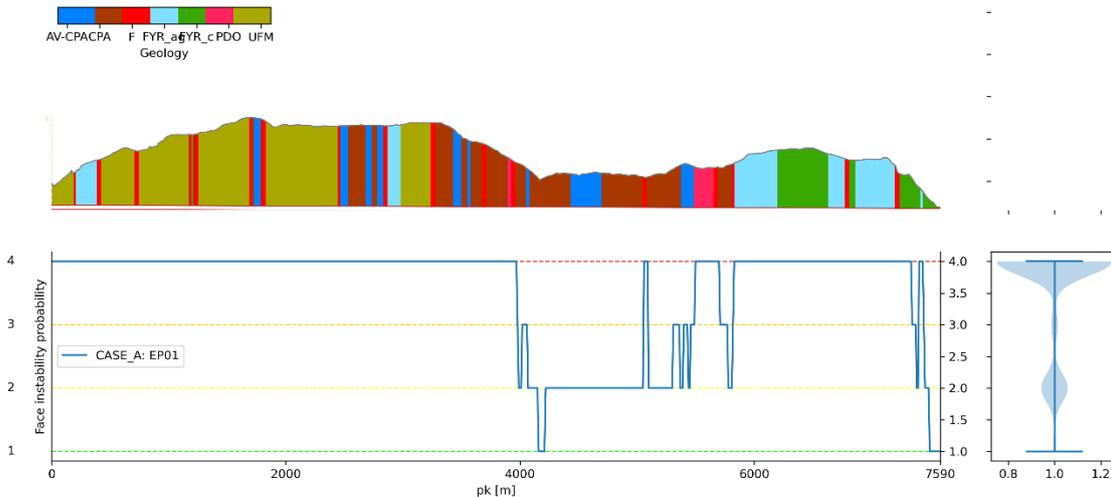
**Fig. 4.9 – Valore  $\lambda_e$**

Di seguito si mostrano, altresì, la percentuale ( $\epsilon_f$  [%]) di estrusione del fronte di scavo rispetto al raggio e la relativa pressione necessaria per stabilizzare l'instabilità al di sotto del 3%.



**Fig. 4.10 – Convergenza al fronte**

Nella figura seguente il rischio di instabilità è convertito da un valore continuo (analitico) alla suddivisione in quattro categorie di probabilità secondo AFTES.

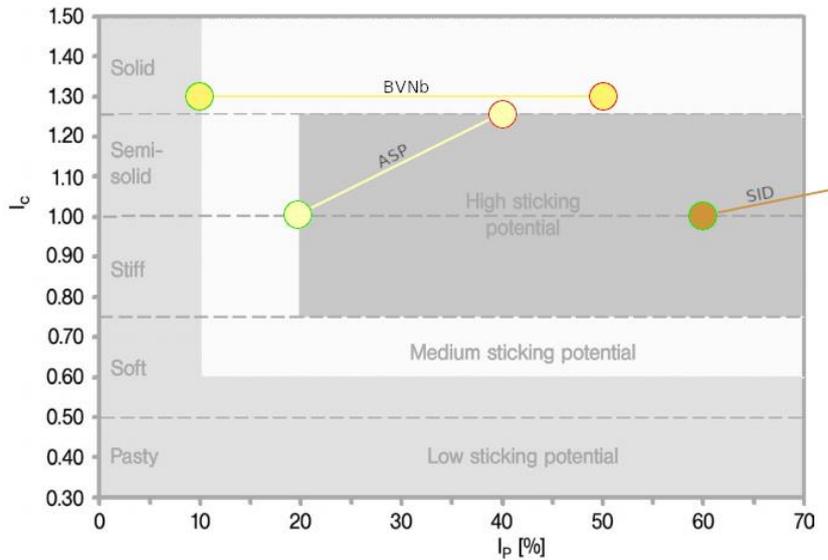


**Fig. 4.11 – valutazione della probabilità di instabilità al fronte ( $P_F$ ) secondo AFTES**

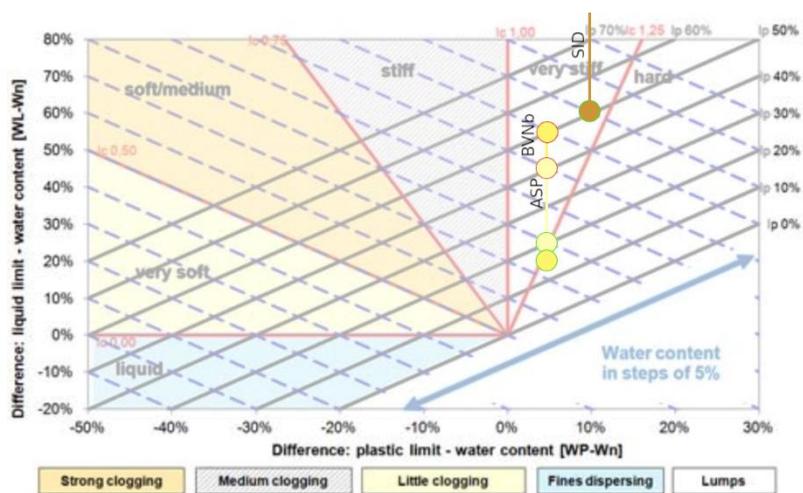
La figura precedente evidenzia un rischio di instabilità piuttosto diffuso lungo il tracciato, in particolare in corrispondenza di ammassi rocciosi di tipo arenaceo / lapideo di scarsa qualità. La modalità di scavo con sostegno del fronte è, dunque, fortemente consigliato.

### 4.2.3 Clogging

Il rischio di *clogging* è stato analizzato usando due approcci: il primo ricava il potenziale di *clogging* dall'indice di plasticità e consistenza (diagramma di Thewes 1999), il secondo si basa sulla variazione del contenuto d'acqua (diagramma di Thewes 2013) e, dunque, consente la stima dei cambi di consistenza dei suoli a grana più fine con diverse condizioni al contorno (quantità d'acqua disponibile). Anche in questo caso, il rischio è stato poi rappresentato lungo il profilo della galleria.

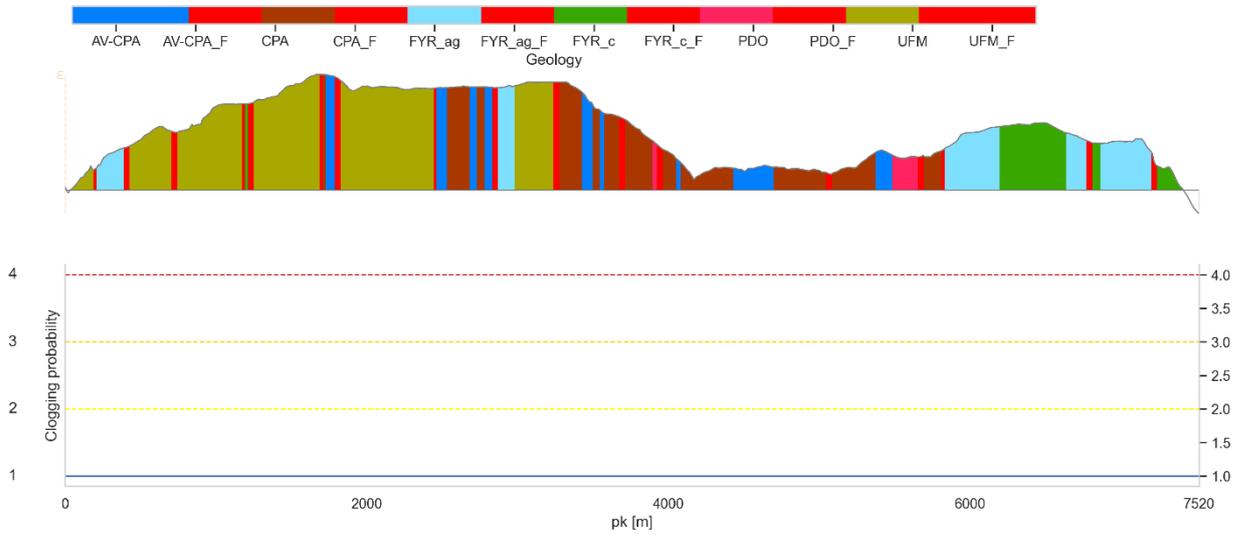


**Fig. 4.12 – Stima del potenziale di adesione secondo Thewes (1999)**



**Fig. 4.13 – Nuovo approccio alla tendenza di ostruzione secondo Thewes (2013)**

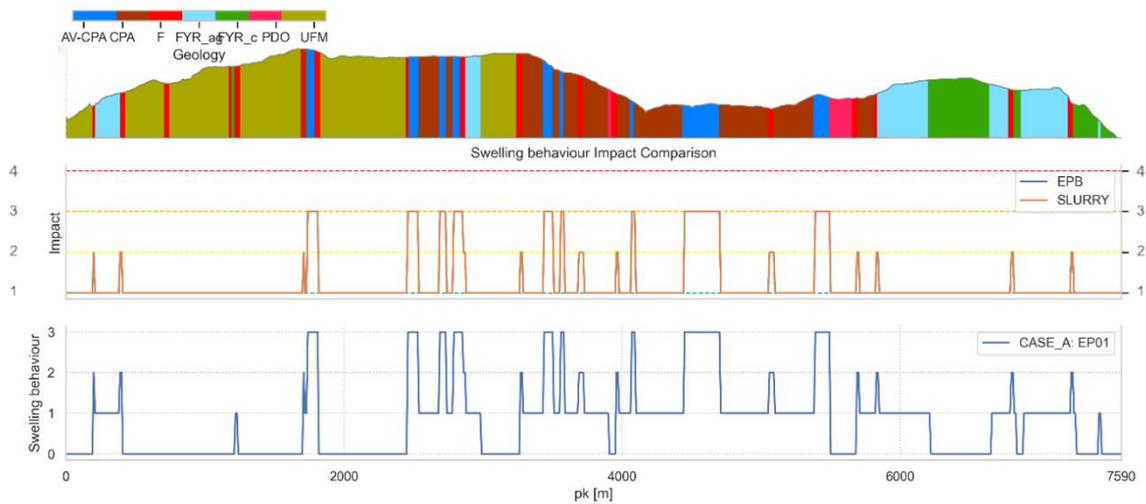
**Regione Campania – Acqua Campania S.p.a.**  
*UTILIZZO IDROPOTABILE DELLE ACQUE DELL'INVASO DI CAMPOLATTARO  
E POTENZIAMENTO DELL'ALIMENTAZIONE POTABILE PER L'AREA BENEVENTANA  
PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICO ECONOMICA*



**Fig. 4.14 – Probabilità (AFTES) della tendenza di clogging secondo Thewes (2013)**

#### 4.2.4 Swelling

Il fenomeno di *swelling* (rigonfiamento) è stato calcolato e mostrato nella figura seguente. Nuovamente, si riscontra una zona con valore elevato ma con valori di probabilità sempre al di sotto del valore critico.



**Fig. 4.15 – Probabilità secondo AFTES della possibilità di swelling lungo il profilo geologico.**

#### 4.2.5 Valutazione dei parametri di scavo - Campi di applicazione e criteri di selezione della macchina

Secondo quanto mostrato precedentemente, la macchina di scavo scelta dovrà permettere il sostegno del fronte tramite l'applicazione di una pressione. In questo caso, dunque, restringiamo il campo a due tipologie di macchine: EPB (Earth Pressure Balance) e di tipo Slurry.

Al fine di determinare la tipologia di macchina più adeguata si effettua, quindi, un confronto parametrico in base alle informazioni sulla geologia attraversata. Per ciascun parametro, in base al tipo di macchina, si esegue una valutazione dell'impatto lungo il profilo della galleria.

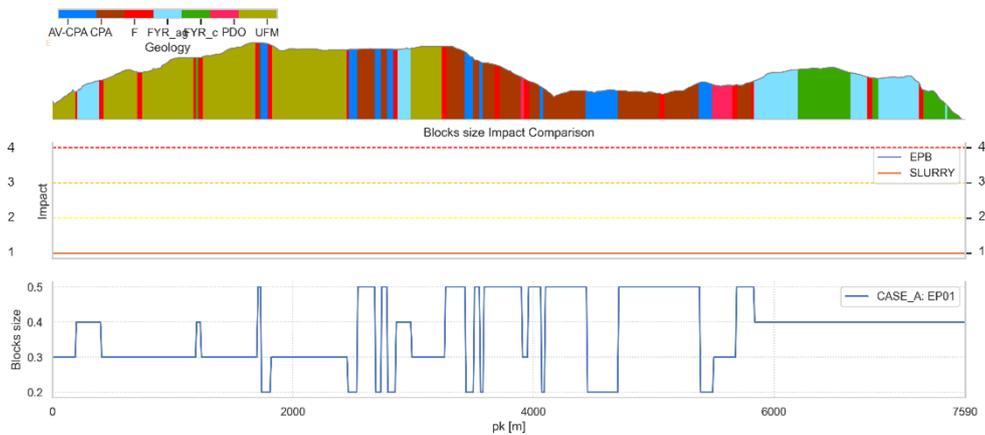


Fig. 4.16 – Dimensione dei blocchi

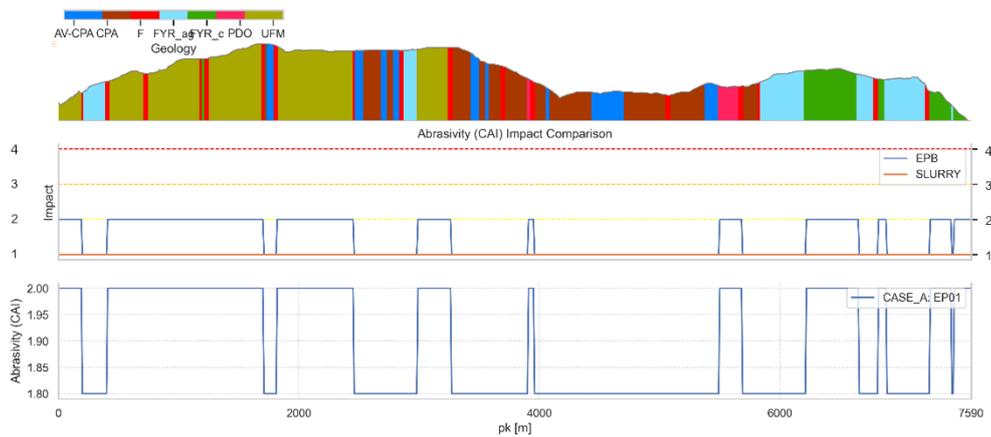
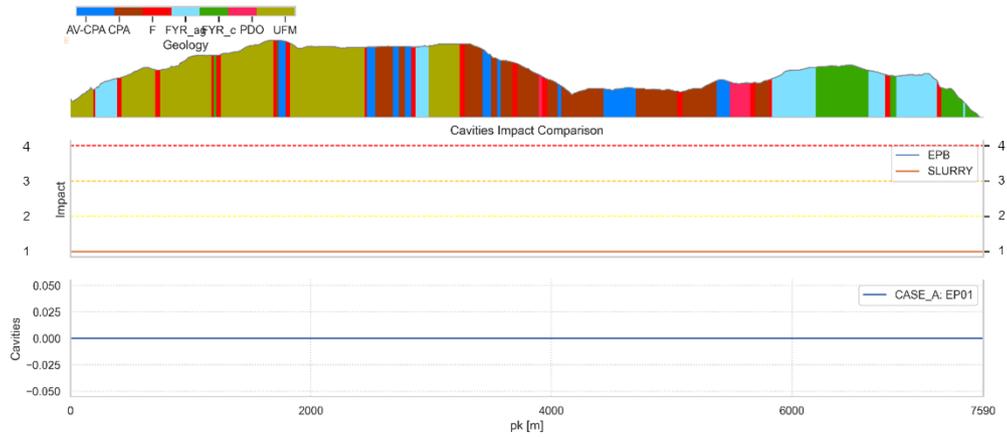
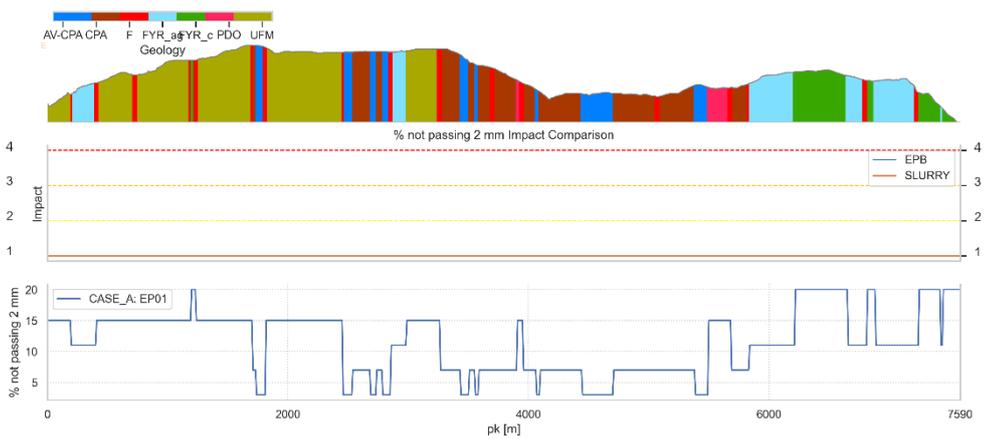


Fig. 4.17 – Abrasività della roccia

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

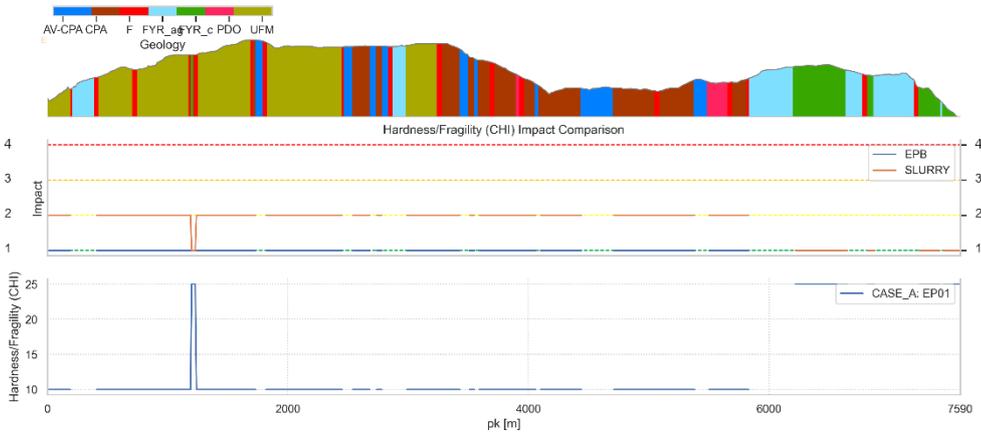


**Fig. 4.18 – Presenza di cavità**

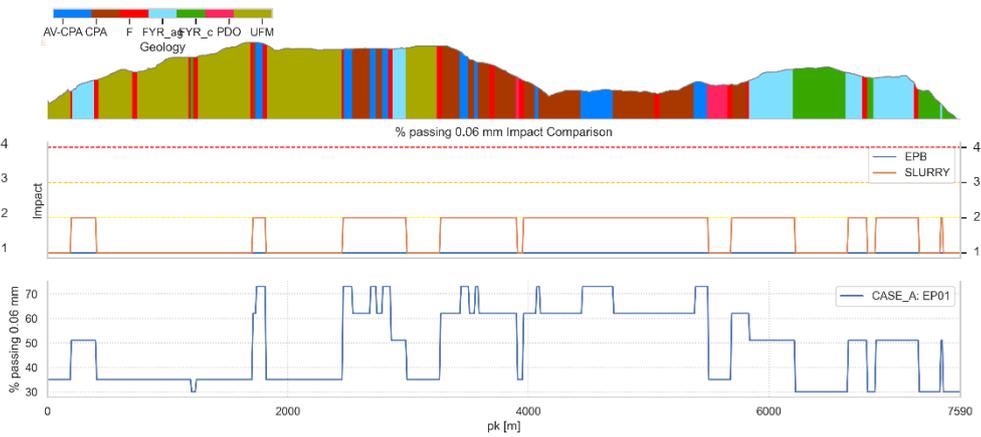


**Fig. 4.19 – Percentuale del materiale non passante a 2 mm**

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

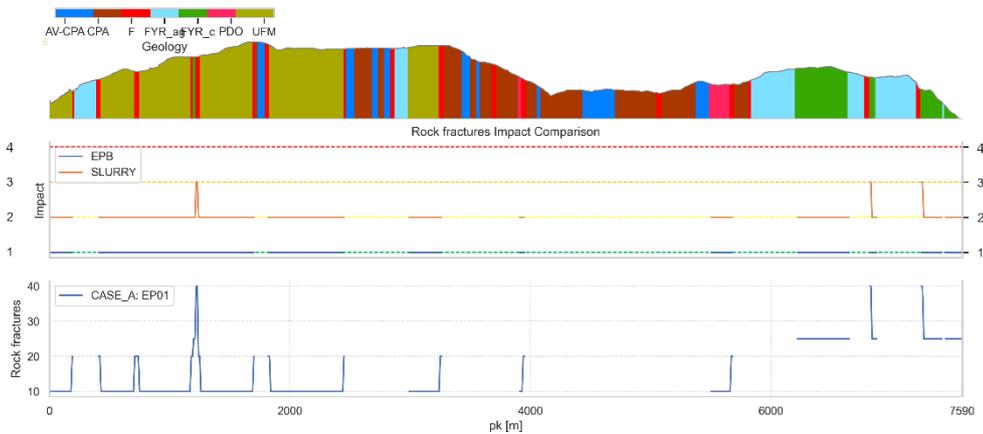


**Fig. 4.20 – Indice di durezza della roccia**

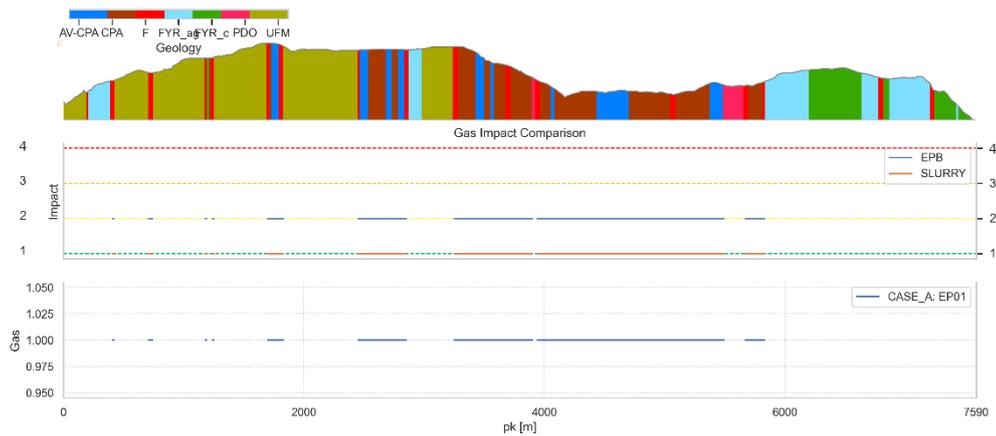


**Fig. 4.21 – Percentuale del passante ai 0,06 mm**

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

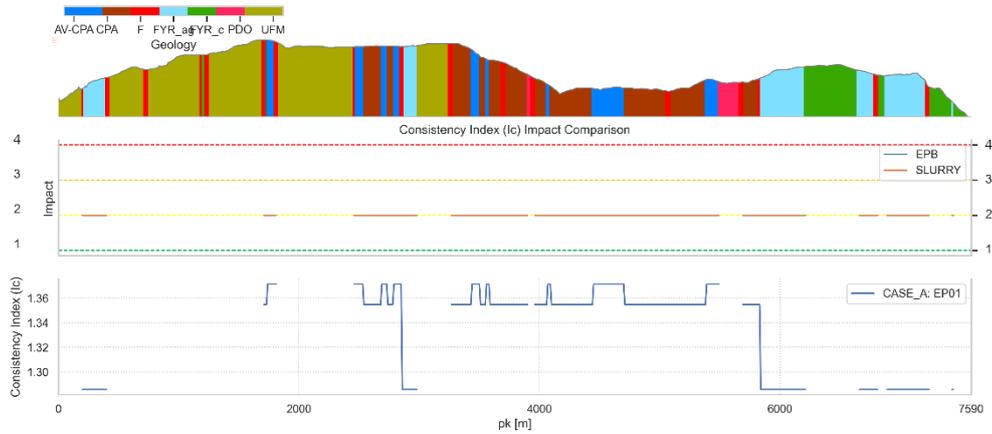


**Fig. 4.22 – Presenza di fratture/discontinuità nell'ammasso roccioso**

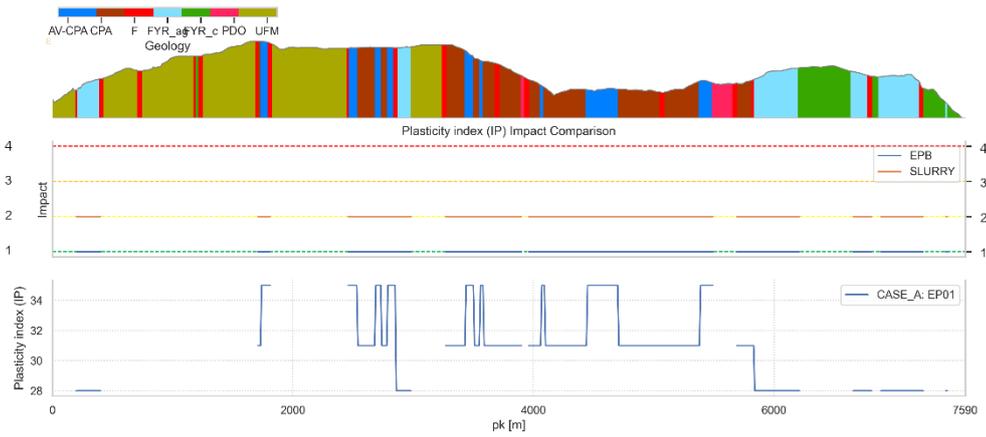


**Fig. 4.23 – Presenza di gas esplosivi e/o pericolosi**

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



**Fig. 4.24 – Indice di consistenza dei terreni attraversati**



**Fig. 4.25 – Indice di plasticità dei terreni attraversati**

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

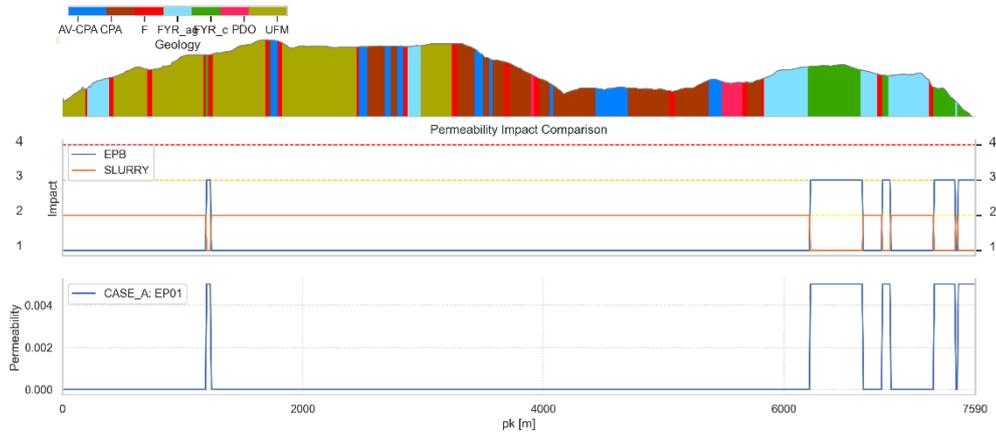


Fig. 4.26 – Permeabilità dei materiali attraversati

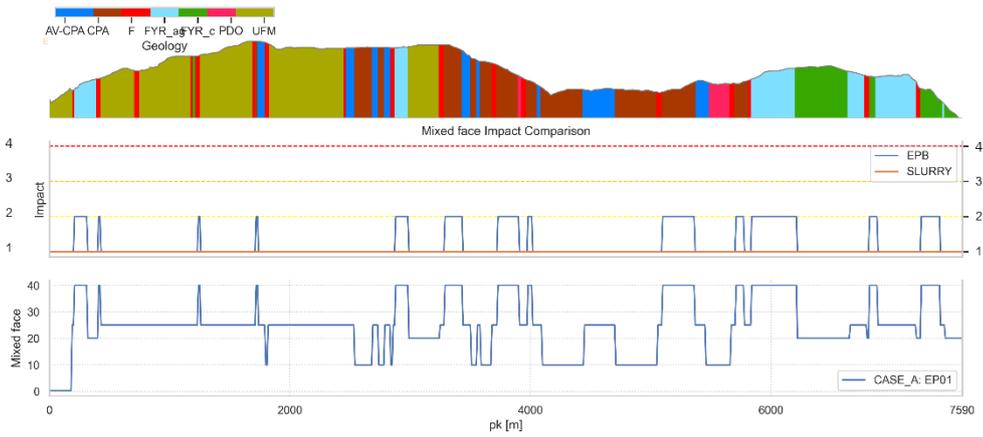
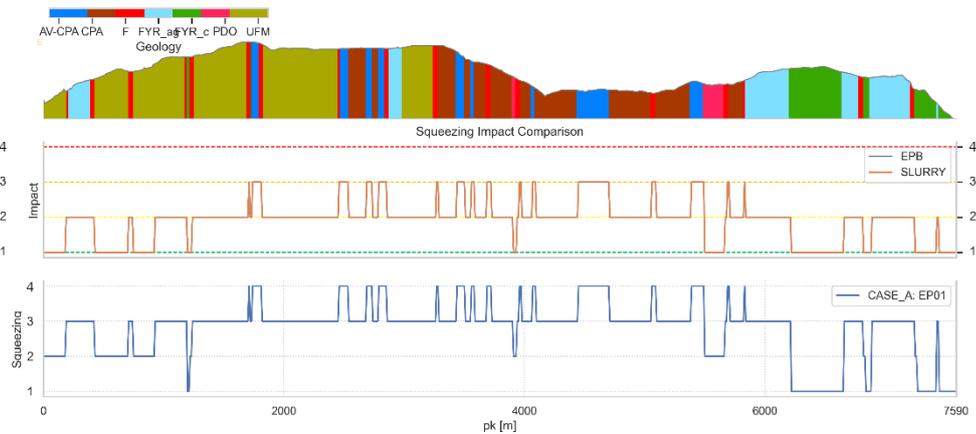
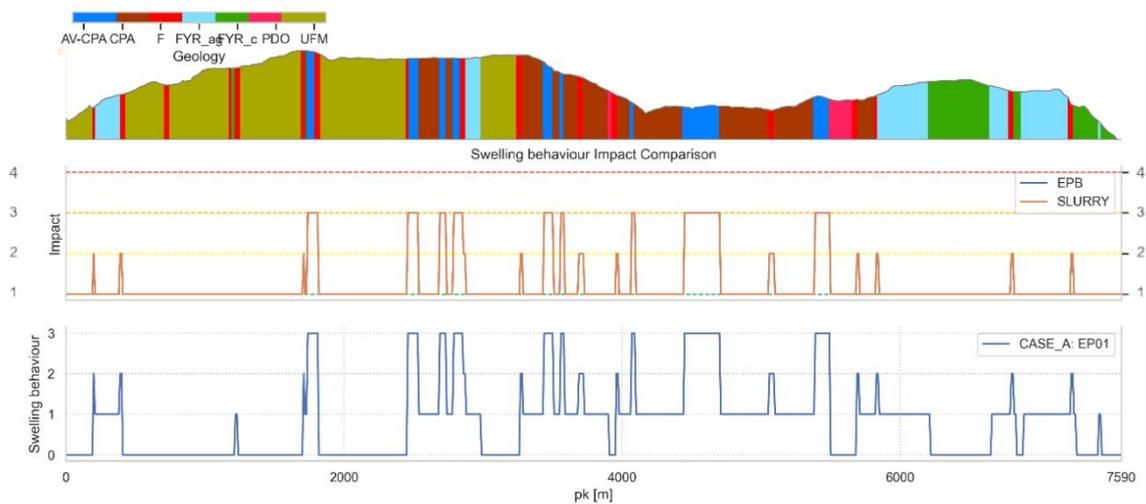


Fig. 4.27 – Condizioni di fronte misto

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

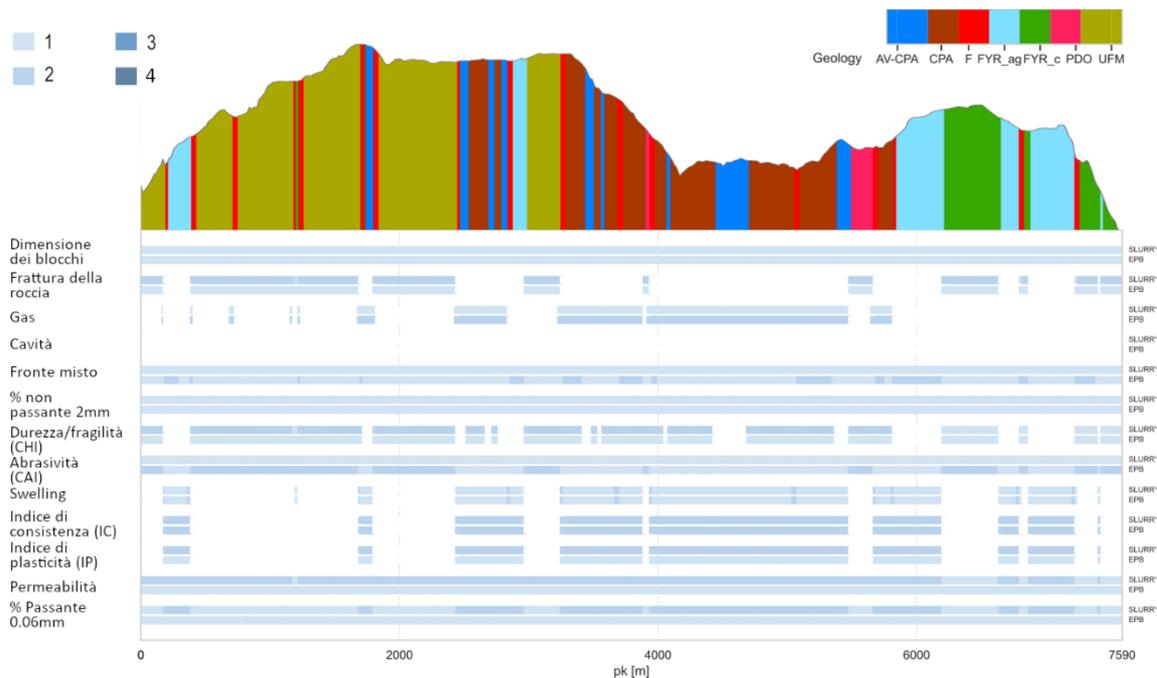


**Fig. 4.28 – Condizioni di comportamento spingente o con grandi deformazioni**



**Fig. 4.29 – Condizioni di comportamento rigonfiante**

In seguito alle analisi realizzate e agli impatti valutati e graficamente rappresentati nelle figure precedenti, è stato possibile definire una valutazione specifica dei parametri per le due tipologie di macchine sopra menzionate.



**Fig. 4.30 – Profilo di valutazione dei parametri delle macchine di scavo**

I parametri sono stati classificati per tonalità di azzurro partendo da un valore 1 (azzurro chiaro) che esprime un impatto ridotto sull'applicabilità della macchina di scavo sino ad arrivare ad un valore 4 (azzurro scuro) che corrisponde, invece, ad un impatto alto.

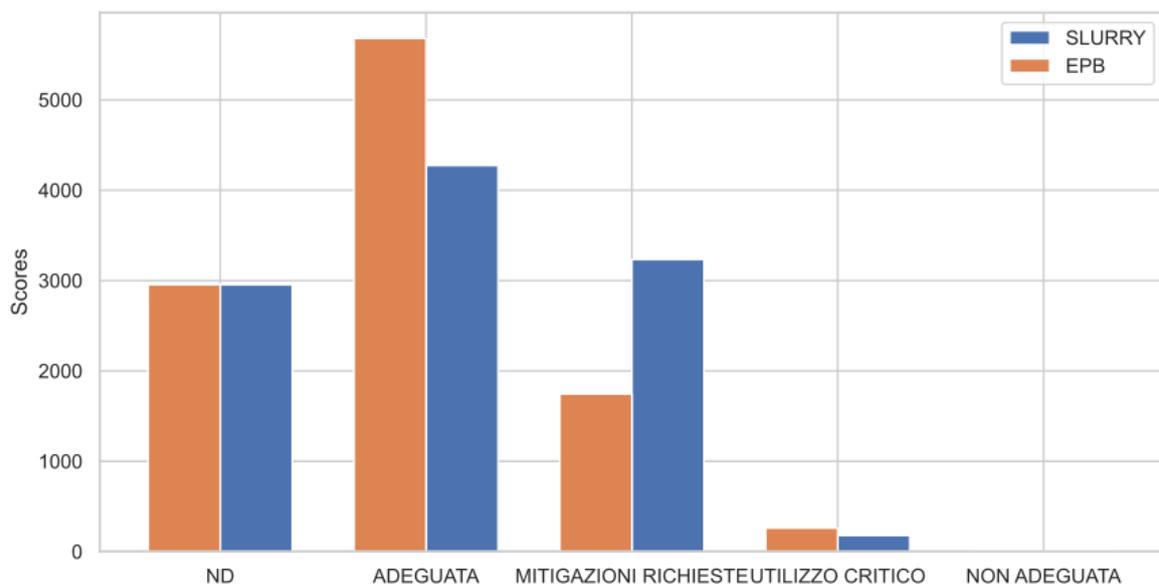
Tali parametri, inoltre, sono stati pesati per calcolare il valore di sintesi sull'efficienza delle macchine secondo i valori in % riportati nella seguente tabella.

<b>Codice</b>	<b>Descrizione</b>	<b>Peso</b>
fgf	% passante 0.06 mm	11.1%
k	Permeabilità	11.1%
ip	Indice di plasticità (IP)	11.1%
ic	Indice di consistenza (IC)	11.1%
swelling_class	Swelling	11.1%
cai	Abrasività (CAI)	4.8%

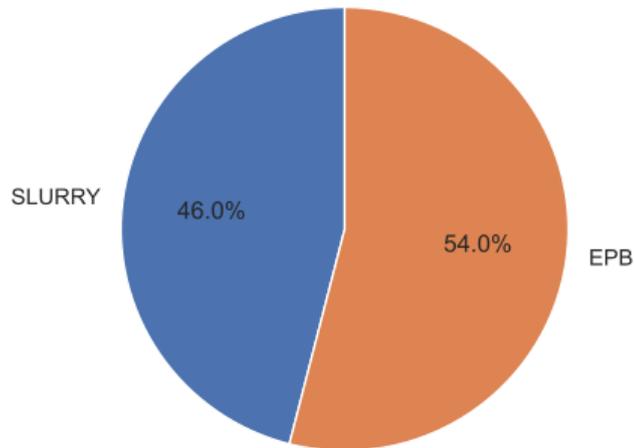
chi	Durezza/Fragilità (CHI)	4.8%
cgf	% non passante 2mm	4.8%
mixed_face_probability	Fronte misto	4.8%
cavity_class	Cavità	4.8%
gas_lcl	Gas	11.1%
frac_rate	Frattura della roccia	4.8%
block_size	Dimensione die blocchi	4.8%
	<b>TOT.</b>	<b>100%</b>

Di seguito un istogramma che mostra per ogni tipologia di macchina lo *score* ottenuto progressiva per progressiva, uguale al numero di pk (ogni 10m) che ricadono in ognuna delle 4 classi di adeguatezza (da 1 a 4).

Un certo numero di pk non ha valori associati ai parametri di riferimento e, quindi, risulta non classificato (ND).



**Fig. 4.31 – Istogramma di sintesi sull'efficienza delle macchine di scavo in funzione dei parametri geologici**



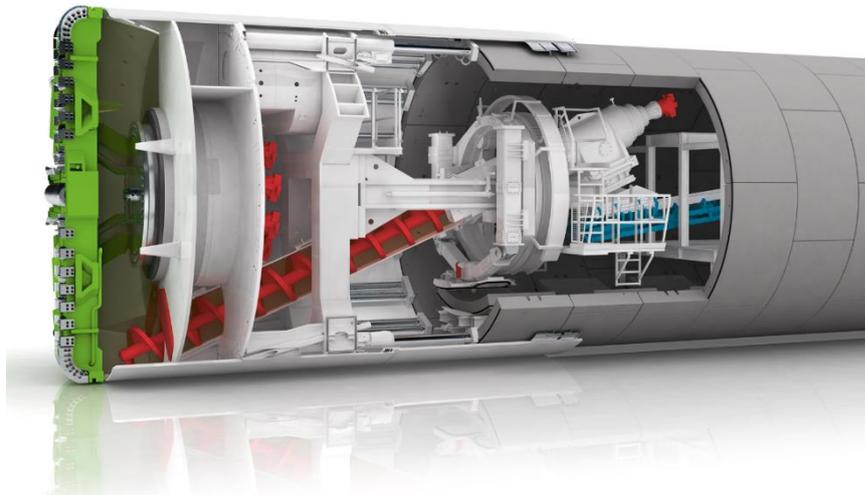
**Fig. 4.32 – Scelta della macchina di scavo in funzione dei parametri geologici**

Come si evince dal grafico a torta sopra riportato, l'analisi comparativa mostra una prevalenza, seppur ridotta al solo 54%, per l'utilizzo di una macchina di scavo a pressione di terra (EPB).

## 5. PARAMETRI DI SCAVO E LA RISPOSTA DELLA TBM

Al fine di simulare la risposta delle TBM al verificarsi di potenziali rischi, sono stati sviluppati una serie di modelli analitici che considerano le caratteristiche della TBM e permettono di stimare i parametri di dimensionamento migliori per lo scavo del tunnel.

Per quanto riguarda le ipotesi iniziali sui parametri dimensionali della TBM, è stato fatto riferimento alle caratteristiche fornite dal produttore di modelli disponibili sul mercato.



**Fig. 5.1 – Rappresentazione TBM di tipo EPB**

Nel caso oggetto di studio, le caratteristiche della TBM di tipo EPB (Fig. 5.1) sono elencate nella tabella seguente.

**Tab. 5-1: caratteristiche e parametri operativi della EPB**

SPECIFICHE	EPB	NOTES
Diametro di scavo [m]	5.4	
Massimo sovrascavo sul diametro [cm]	5.0	5400 mm
Lunghezza dello scudo [m]	11.0	
Diametro dello scudo di testa [m]	5.35	
Diametro dello scudo di coda [m]	5.29	
Conicità dello scudo [cm]	6	
Spessore dello scudo [cm]	6	
Pressione di progetto dello scudo [MPa]	0.6	
Fori di iniezione attraverso lo scudo [pezzi]	3 x 12	Scudo intermedio: Parzialmente condivisi con i fori per l'idrodemolizione
Numero di cutters [-]	30	
Cutters Load [kN/pcs]	255	
Diametro dei Cutters [pollici]	17	
Spaziatura dei Cutters [cm]	0.09	
Velocità di rotazione [rotazioni/min]	3	
Coppia nominale [kNm]	4000	
Coppia eccezionale [kNm]	5000	
Spinta normale [kN]	47400	
Nominal thrust ratio [-]	0.1	
Spinta eccezionale [kN]	74000	Considerando Enerpack 500 bar
Percentuale di apertura della testa [%]	35	A meno di modifiche del layout dei cutters
Peso dello scudo [t]	2750	
Peso del back-up [t]	500	
Coefficiente d'attrito $\mu$ [-]	0.40-0.50	Attrito statico
Spessore concio [cm]	40	
Diametro estradosso conci [m]	5	
Diametro intradosso conci [m]	4.2	
Lunghezza concio [m]	1.5	
Tipo di anello [-]	6+0	

### 5.1 PRINCIPI PER LA VALUTAZIONE DELLA PENETRAZIONE NETTA

I parametri TBM sono stimati dallo studio di dati sperimentali, dove diversi test hanno permesso di stimare la penetrazione netta della testa della TBM all'interno del materiale scavato. Il modello CSM da noi utilizzato in questo studio si basa, tra gli altri modelli, sulla divisione delle forze che agiscono sui cutter della fresa, da cui è possibile valutare la spinta, la coppia e i requisiti di performance della TBM. Una rappresentazione schematica dell'interazione con i cutter è mostrata in Fig. 5.2.

Secondo il modello proposto da Rostami [24], la distribuzione della pressione lungo cutter ha due dimensioni. L'angolo formato al contatto "cutter - roccia" è dato da:

$$\varphi = \cos^{-1} \left( \frac{R - p}{R} \right)$$

- ✓ R: è il raggio del cutter in [mm],
- ✓ p: è la penetrazione per rivoluzione del cutter sulla cutterhead della TBM [mm / rivoluzione].

La pressione che agisce su ogni disco è definita dalla seguente equazione:

$$P = P' \cdot \left( 1 - \frac{\theta}{\varphi} \right)^\Psi$$

- ✓  $\theta$ : è l'angolo della verticale,
- ✓  $\Psi$ : è la forma della distribuzione della pressione che varia tra 0 (pressione uniforme) e 1 (distribuzione lineare)
- ✓  $P'$ : è la pressione alla base definita come segue:

$$P' = 2,12 \cdot \sqrt[3]{\frac{S \cdot \sigma_c^2 \cdot \sigma_t}{\varphi \cdot (R \cdot T)^{0,5}}}$$

- ✓ S: è la spaziatura tra i cutter [mm],
- ✓  $\sigma_c$ : è la resistenza alla compressione monoassiale della roccia intatta [MPa],
- ✓  $\sigma_t$ : è la forza di tensione della roccia intatta [MPa],
- ✓ T: è lo spessore del cutter [mm],

Infine, la forza totale che agisce su ogni cutter è data dalla seguente equazione:

$$F_{tot,thumbwheel} = 2,12 \cdot R \cdot T \cdot \varphi \cdot \sqrt[3]{\frac{S \cdot \sigma_c^2 \cdot \sigma_t}{\varphi \cdot (R \cdot T)^{0,5}}}$$

La forza totale e' scomponibile in due componenti:

$$F_n = F_{tot,cutter} \cdot \cos\left(\frac{\varphi}{2}\right);$$

$$F_r = F_{tot,cutte} \cdot \sin\left(\frac{\varphi}{2}\right)$$

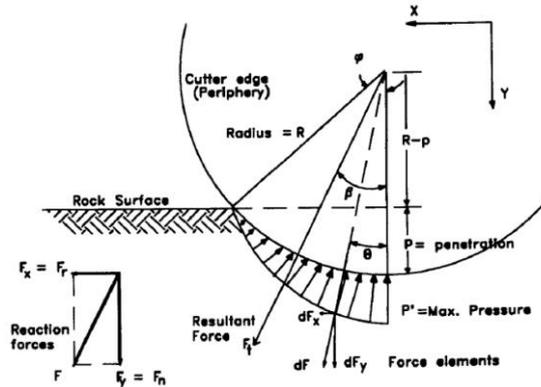


Fig. 5.2 – Modello di calcolo per stimare la forza da esercitare per la penetrazione dei cutter (Colorado School of Mines)

## **5.2 CALCOLO ITERATIVO DELLA PENETRAZIONE DEI CUTTER**

Le prestazioni del TBM in termini di scavo per metro lineare sono definite attraverso la velocità di scavo o il tasso di penetrazione (Rate of Penetration, ROP) della TBM, espresso in [mm / min] o [m / h].

Questa velocità di scavo dipende dalla capacità di penetrazione netta ad ogni rivoluzione della testa di taglio [mm / rev], e dalla velocità di rotazione [rivoluzione / min] della testa.

$$ROP = p \cdot v_{rot} \cdot \frac{60}{1000}$$

L'approccio di calcolo sviluppato secondo il modello CSM prevede i seguenti passaggi:

- ✓ Assunzione di un valore iniziale del  $ROP_T$  (un valore teorico dal feedback dell'esperienza) e della velocità di rotazione, per stimare la penetrazione ad ogni giro,
- ✓ Valutazione della forza che agisce sui cutter,
- ✓ Confronto della forza calcolata con la forza disponibile data dal valore della pressione di ciascun cutter;
- ✓ Se la forza calcolata è inferiore a quella disponibile, manteniamo questa forza come quella esercitata dai cutter sulla fronte,
- ✓ Se la forza calcolata è maggiore di quella disponibile, prendiamo la forza disponibile e, per retro-analisi, stimiamo il valore della penetrazione netta e quindi il valore finale del ROP (valore netto)
- ✓ Registrazione dei valori ottenuti in termini di angolo di contatto ( $\phi$ ), forza di azione sui cutter ( $F_{tot}$ ) e tasso di penetrazione netto (ROP)

La penetrazione netta per rivoluzione della testa ( $p$ ) è indipendente dal tipo di TBM, perché è principalmente derivato dall'interazione tra gli strumenti di scavo e l'ammasso incontrato.

Per un ammasso roccioso consideriamo le seguenti relazioni tra la penetrazione netta e UCS, mentre per terreni consideriamo la tabella di Maidl [18] che mette in relazione il sotto-tipo di suolo con i dati di penetrazione netta e velocità di rotazione media.

**Tab. 5-2: relazione tra penetrazione e UCS**

UCS <sup>i</sup> (MPa)	Penetrazione netta p <sup>i</sup> (mm/rev)	ROP <sup>i</sup> <sub>T</sub>
30	19.4	✓ Velocità di rotazione della cutterhead RPM <sub>T</sub> = 2.88 [giri / min] per la TBM in roccia ✓ Velocità di rotazione della cutterhead RPM <sub>T</sub> = 1.85 [giri / min] per la TBM in argilla consolidata ✓ Velocità di rotazione della cutterhead RPM <sub>T</sub> = 1.85 [giri / min] per la TBM in argilla soffice  Il tasso di penetrazione della TBM per metro lineare (ROP <sub>T</sub> ) dipende da p <sup>i</sup> e RPM <sub>T</sub> , può essere calcolato con $ROP^i_T = p^i * RPM_T$
35	19.4	
50	15.2	
70	9.5	
140	6.5	

**Tab. 5-3: penetrazione netta e velocità di rotazione per diversi sottotipi di suolo.**

Sottotipo di suolo	Penetrazione netta (mm/giro)	Velocità di rotazione netta (rpm)
Sabbia	0.015-0.029	1.2–2.0
Ghiaia e ghiaia sabbiosa	0.010-0.021	1.2–2.0
Argilla compatta	0.015-0.029	1.2–2.0
Argilla consolidata	0.013-0.036	1.2–2.5
Argilla soffice	0.013-0.036	2.0–3.0
— massi o rocce ulteriori	0.010-0.015	1.2–2.0

### 5.3 COPPIA E SPINTA DELLA TBM

Il sistema di coppia / spinta del TBM deve essere progettato in modo che una forza maggiore o uguale della forza richiesta per lo scavo in condizioni ordinarie sia sempre disponibile. Inoltre, il sistema deve essere progettato in modo da poter fornire ulteriore forza in necessaria per lo sblocco.

I valori di coppia e spinta sono illustrati nella figura seguente, i valori di spinta e coppia nominali sono indicati (linea tratteggiata verde) come anche il valore massimo esercitabile (linea orizzontale rossa).

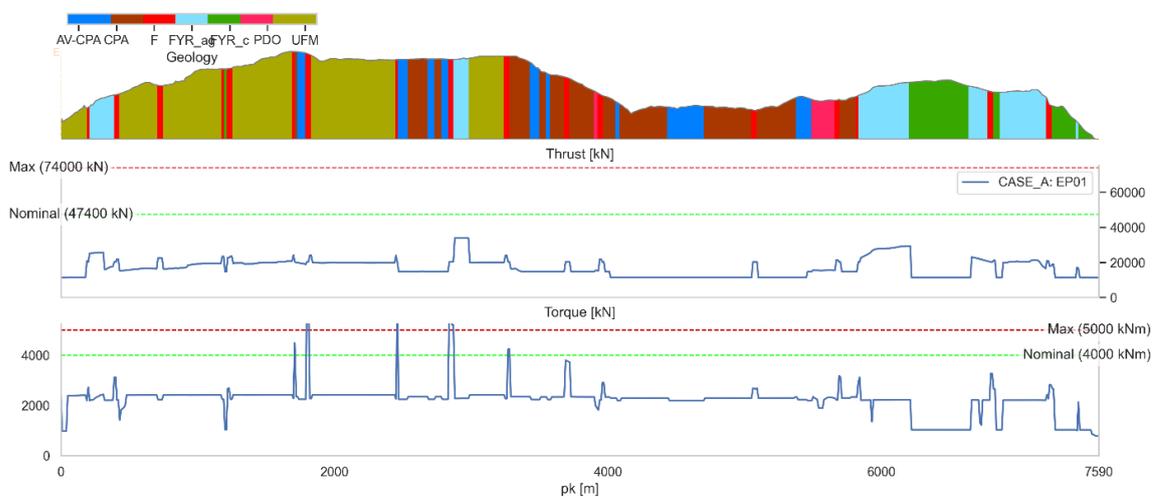


Fig. 5.3 – Valori di coppia e spinta, valutati lungo l'allineamento

### 5.3.1 Stima della spinta

La spinta totale della TBM "P" è definita come la somma di diverse componenti

$$P = \sum P = P_1 + P_2 + P_3 + P_4 + P_5 + P_6$$

P1 – Attrito scudo-terreno: è la spinta richiesta per superare l'attrito (adesione) tra lo scudo della TBM e il terreno dovuto dalla pressione della terra/roccia

$$P_1 = \mu \cdot [\pi D_b \cdot L_b \cdot \sigma + W_b]$$

P2 – Pressione al fronte: la spinta necessaria per contrastare la pressione che agisce sulla testa.

$$P_2 = p \cdot \frac{\pi D^2}{4}$$

P3 – Forza motrice (*Drive force*): spinta necessaria per imporre modifiche di direzione. In caso di galleria rettilinea (curvatura = 0), P3 può essere considerate 0

$$P_3 = \mu_1 \cdot D \cdot \frac{L_s}{2} \cdot \frac{q}{2}$$

P4 – Attrito segmenti-*tail seals*: spinta richiesta per contrastare la forza d'attrito tra i segmenti e le spazzole (solo nel caso di terreni)

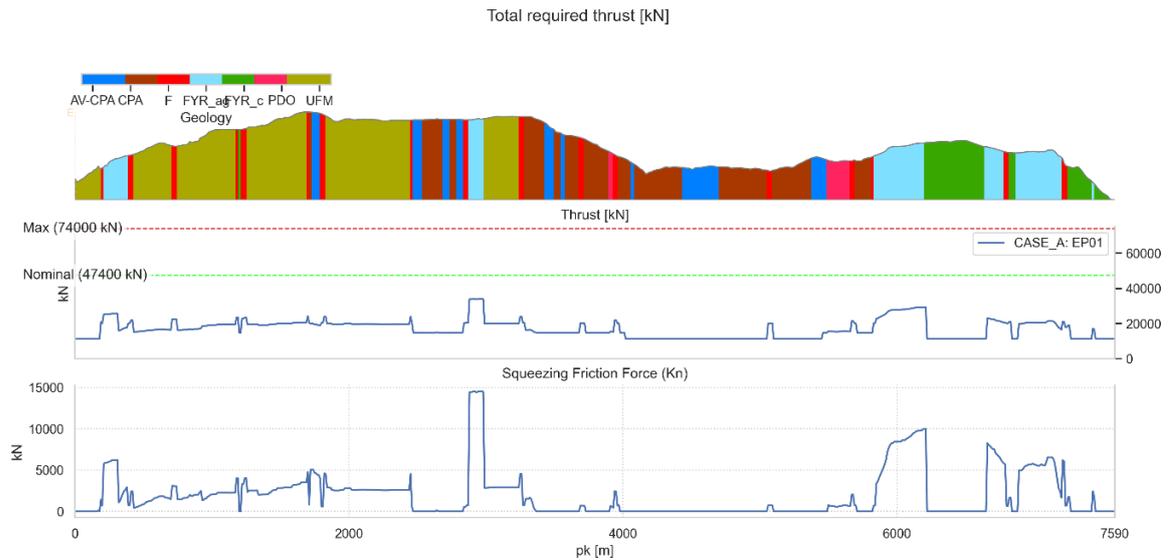
$$P_4 = \mu_3 \cdot [\pi \cdot D_o \cdot L_{s-t} \cdot \sigma]$$

P5 - *Back-up*: spinta richiesta per trascinare il treno di back-up

$$P_5 = \mu_3 \cdot P_{ts}$$

P6 – Forza di penetrazione: spinta necessaria ai cutter per scavare

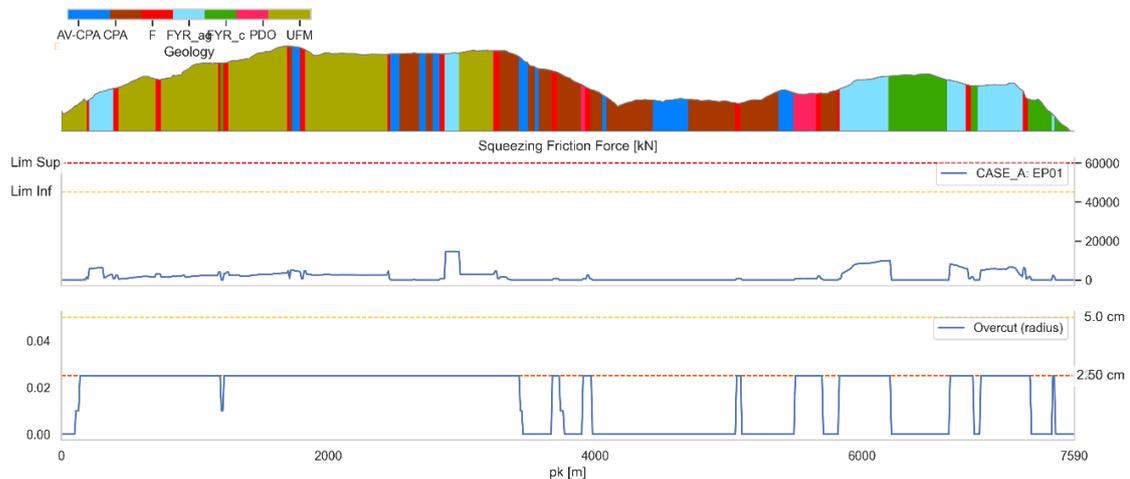
$$P_6 = N_C \cdot F_n$$



**Fig. 5.4 – Spinta totale (sopra) comparata alla forza d’attrito sullo scudo (*squeezing*) causata dal contatto con il suolo (sotto), calcolate lungo il tracciato.**

### 5.3.2 Applicazione sovrascavo

Per evitare il rischio di blocco dovuto alla convergenza sullo scudo è stato considerato un limite del 30% della spinta netta disponibile oltre il quale è richiesta l’applicazione del sovrascavo (formazioni SID e TPC).



**Fig. 5.5 – Segmenti di applicazione del sovrascavo e componente della spinta riferita ai fenomeni di convergenza sullo scudo.**

### 5.3.3 Stima della coppia

La coppia totale della TBM può essere similmente interpretata come la somma di diverse componenti:

$$T = \sum T = T_1 + T_2 + T_3 + T_4 + T_5 + T_6$$

T1: Coppia per l'attrito con la superficie frontale della testa di scavo

$$T_1 = \frac{\pi D^3}{12} \cdot \mu \cdot \sigma \cdot (1 - \eta)$$

T2: Coppia per l'attrito sulla superficie circolare della testa di scavo

$$T_2 = \frac{\pi D^2}{4} \cdot \mu \cdot 2 \cdot \sigma \cdot L_t$$

T3: Coppia d'attrito sulla superficie posteriore della testa di scavo (solo per macchina in pressione)

$$T_3 = \frac{\pi D^3}{12} \cdot \mu \cdot \sigma \cdot (1 - \eta) \frac{p}{\sigma_c}$$

T4: Coppia richiesta per superare la resistenza tra cutters e materiale scavato (sia roccia che terreno)

$$T_4 = 0,3 (D + 2 O_c) \cdot N_c \cdot F_r$$

T5: Coppia di taglio sulle aperture della camera della testa di scavo (camera piena anche per i tratti in roccia)

$$T_5 = 0,35 \frac{\pi D^3}{12} \cdot \mu \cdot \sigma \cdot \eta$$

T6: Coppia necessaria per superare la resistenza del rimescolamento del materiale scavato (sia roccia che terreno)

$$T_6 = \mu \cdot p \cdot [n_b \cdot (L_b \cdot D_b) \cdot R_b + n_p \cdot (L_p \cdot D_p) \cdot R_p]$$

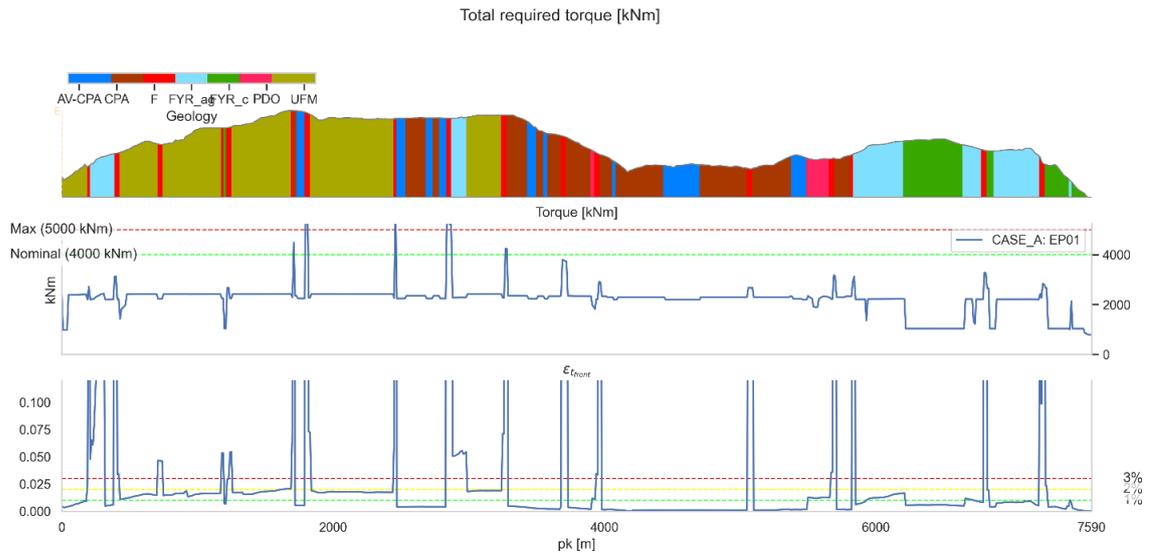
$D$ : diametro di scavo,

$N_c$ : numero di cutter sulla testa della TBM,

$F_r$ : forza radiale esercitata dai cutter per garantire la penetrazione desiderata,

$\mu$ : coefficienti d'attrito (0.35 – 0.5),

- $\eta$  : è il tasso di apertura della testa,
- $\sigma$ : pressione del terreno sullo scudo,
- $\sigma_c$ : pressione del terreno sulla camera,
- Lt : spessore (lunghezza) della testa,
- O<sub>c</sub>: valore di overcut applicato,
- p: pressione al fronte applicata dalla EPB nei tratti in terreno.



**Fig. 5.6 – Coppia totale vs convergenza del fronte (tasso in %)**

#### 5.4 CONSUMO DEI CUTTER

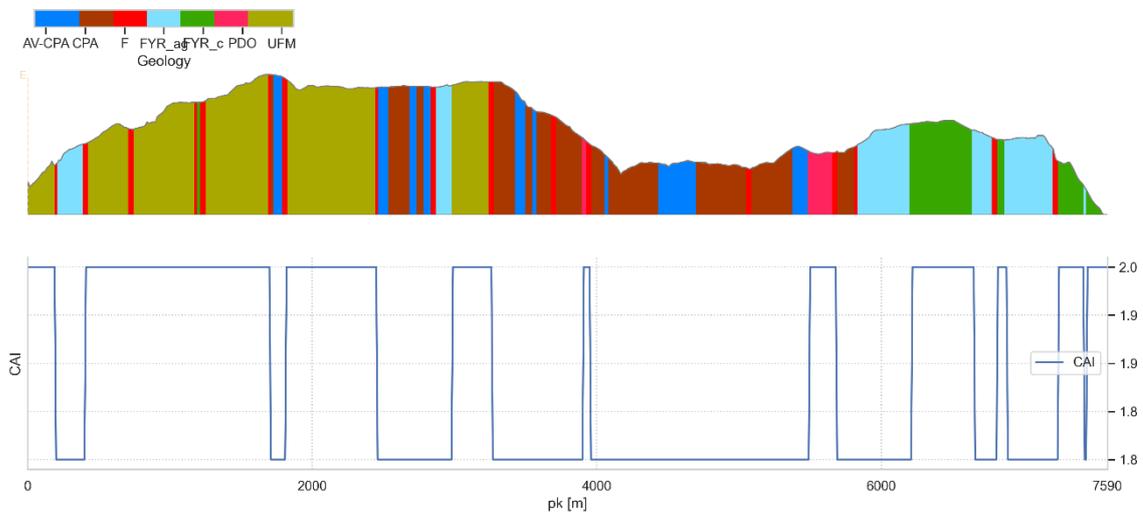
In generale, lo scavo di materiali abrasivi porta una serie di problemi legati all'usura degli strumenti di taglio (cutter) e della testa di taglio (cutterhead), che possono portare a effetti collaterali:

- ✓ Necessità di soste più frequenti della TBM per la manutenzione e/o la sostituzione di utensili, con difficoltà legate alla sicurezza dei lavoratori e al rimettere in moto la macchina dopo la sosta,
- ✓ Riduzione della velocità di avanzamento della TBM.

Per quanto riferimento alla qualità abrasiva delle litologie attraversate dal lavoro, abbiamo identificato i valori del CAI (Cherchar Abrasion Index) in base ai dati geotecnici disponibili, in questo caso come mostrato di seguito.

**Tab. 5-4: Valori CAI per la classificazione dell'abrasività delle rocce/terreni**

LITOTIPO	CAI
Terreno	1.8
Roccia	2



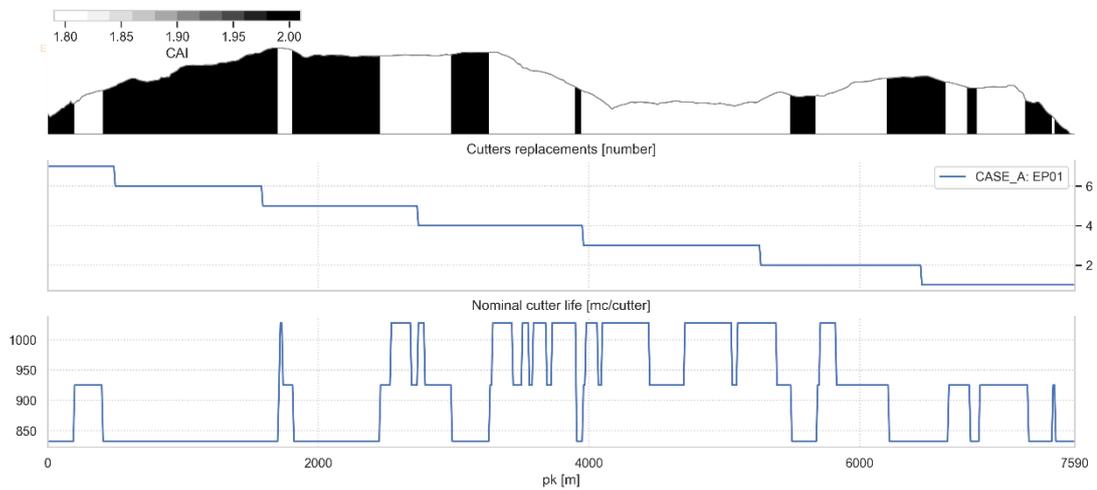
**Fig. 5.7 – Distribuzione CAI lungo il profilo**

Sulla base dei valori indicati e del modello proposto da Rostami, abbiamo stimato il tasso di usura dei cutter installate sulla testa di taglio come un valore di metri cubi (scavati) per singolo cutter:

$$\left[ \frac{m^3}{cutters} \right] = \frac{P \cdot U_c}{N} \cdot (0,25 \pi D^2) \quad ; \quad U_c = 0,67 \frac{2057 \phi_{disc} / 432 CAI}{0,6 \pi D}$$

- ✓ P : Penetrazione [mm]
- ✓ N : Numero di cutter
- ✓  $\phi_{disc}$  : Diametro di ogni cutter
- ✓ D : Diametro di scavo

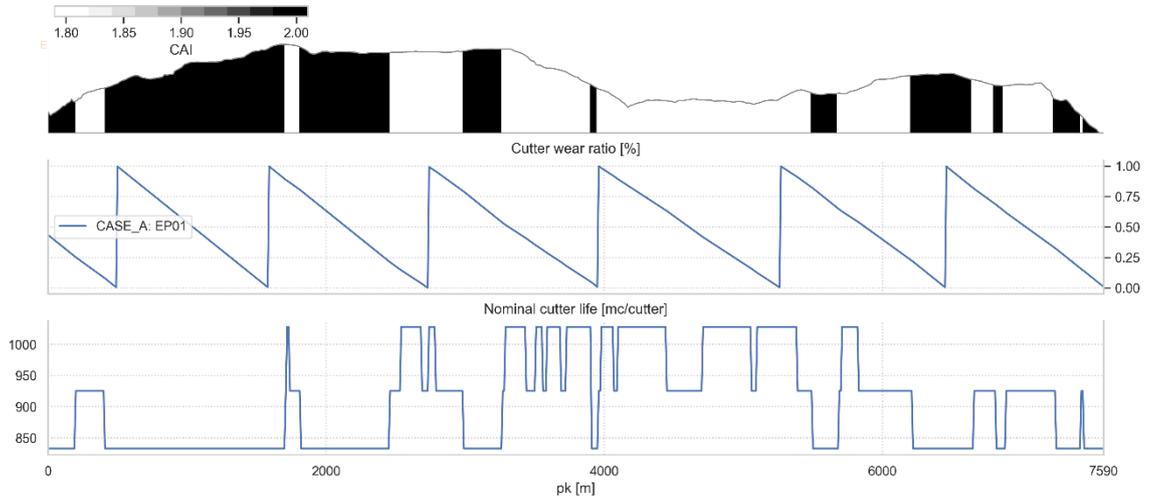
Osservand ola figura seguente, si evince un'usura abbastanza costante dei cutter con una vita media che va dai 1400 m<sup>3</sup> (per le zone con minor abrasività) a poco meno di 1000 m<sup>3</sup> nelle zone con CAI più elevato.



**Fig. 5.8 – Consumo dei cutter: somma cumulativa della sostituzione (sopra) e vita media (sotto) espressa in metri cubi scavati per cutter**

Di seguito si riporta, inoltre, l'usura dei cutter. Il valore di abrasività non varia molto da zona a zona, implicando anche un consumo quasi costante dei cutter lungo l'allineamento.

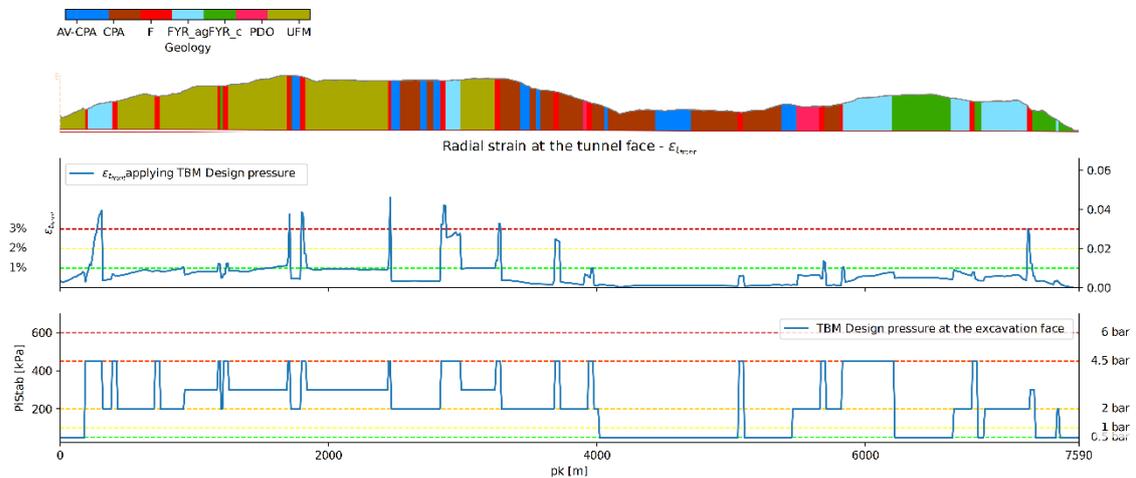
Regione Campania – Acqua Campania S.p.a.  
UTILIZZO IDROPOTABILE DELLE ACQUE DELL'INVASO DI CAMPOLATTARO  
E POTENZIAMENTO DELL'ALIMENTAZIONE POTABILE PER L'AREA BENEVENTANA  
PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICO ECONOMICA



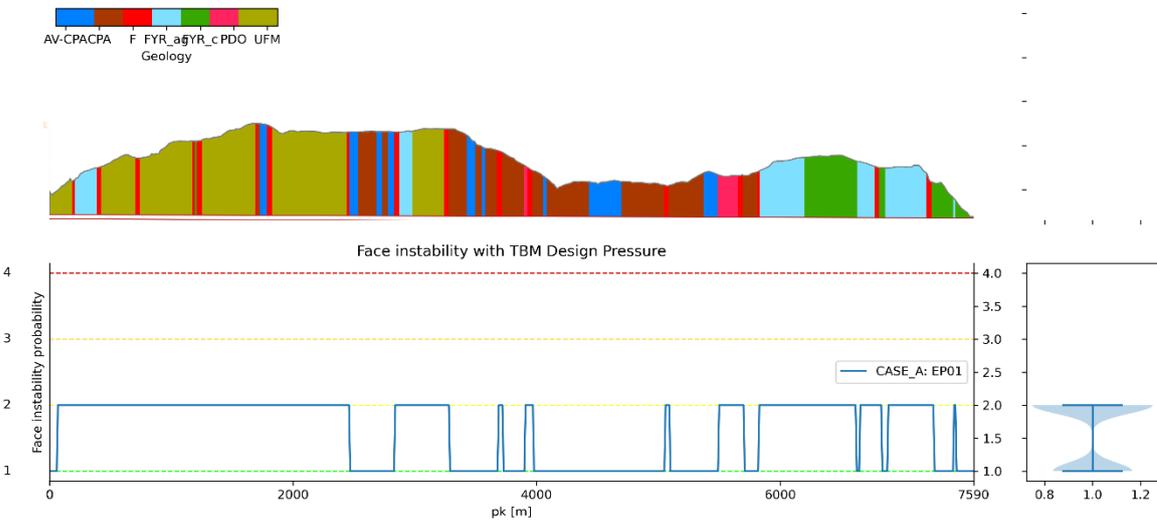
**Fig. 5.9 – Tasso di usura dei cutter (sopra) e durata nominale del cutter (sotto) in funzione della  $pk$ .**

## 5.5 PROFILO PRESSIONI

Nella figura seguente si riporta il profilo di pressioni necessarie per permettere lo scavo in condizioni di stabilità del fronte e limitare gli spostamenti del cavo.



**Fig. 5.10 – Profilo delle pressioni da applicare per garantire la stabilità del fronte e limitare gli spostamenti del cavo**



**Fig. 5.11 – valutazione della probabilità di instabilità al fronte ( $P_f$ ) secondo AFTES considerando la pressione di stabilizzazione TBM**

## 6. PRODUZIONI ATTESE

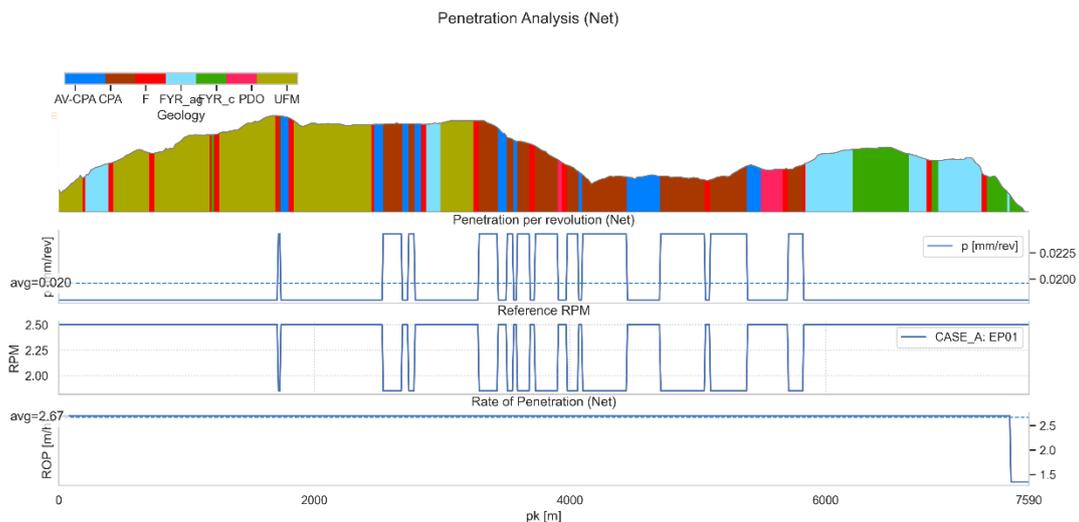
Le produzioni TBM, in altre parole la "velocità di scavo", è un parametro che dipende da un lato dalla velocità di scavo (ROP) e dall'altro da una serie di fattori come le operazioni di manutenzione, le fermate TBM, ecc. In sintesi, l'approccio completo per stimare la velocità TBM è il seguente:

- ✓ Valutazione del tempo di scavo in funzione dei valori stimati di ROP (Net Penetration Rate [m / h]) nelle diverse classi di terreno/roccia.
- ✓ Definizione dei tempi di base, a seconda del tipo di TBM, per ogni operazione nel ciclo di avanzamento che può rallentare o interrompere l'operazione di scavo,
- ✓ Definizione delle posizioni e del numero di cicli di avanzamento,
- ✓ Produzione media stimata di tunneling.

### 6.1 TEMPO DI SCAVO

Il tempo di scavo dipende dal tasso di penetrazione netto per lo scavo di una distanza specifica:

$$\text{Tempo di scavo} = \text{distanza di avanzamento} / \text{ROP}$$



**Fig. 6.1 – Calcolo del ROP lungo il tracciato. In arancione il valore medio per le grandezze analizzate.**

Usando le esperienze di scavo pregresse, è stato possibile stabilire il rapporto tra il tempo trascorso per lo scavo e il tempo trascorso per tutte le operazioni di tunneling. Questo rapporto, definito come "fattore di utilizzo" (UF), è un indicatore di prestazioni la macchina. Può essere utilizzato come ipotesi di base per la definizione temporale degli altri

componenti di avanzamento, come *regripping*, manutenzione, estensione dei servizi, sondaggi in avanzamento, ecc.

L'avanzamento TBM o "Advancement Rate - AR", può essere ottenuto dal prodotto del tasso di penetrazione moltiplicato per il fattore di utilizzo:

$$AR = ROP \cdot UF$$

## 6.2 CICLO DI AVANZAMENTO & TEMPI ELEMENTARI

Le ipotesi relative alla durata e al numero di cicli sono le seguenti:

- ✓ Giorni lavorativi all'anno: 335 giorni (supponendo 25 giorni di ferie all'anno)
- ✓ Giorni lavorativi alla settimana: 7 giorni alla settimana
- ✓ Ore di lavoro al giorno: 24 ore al giorno
- ✓ Durata di un ciclo: 24h

Per la definizione del ciclo di avanzamento, vengono identificati i principali componenti di avanzamento: scavo, *regripping* (e / o installazione dell'anello di copertura), manutenzione, estensione delle reti e altri.

Tra le componenti che possono interrompere la continuità del ciclo, possiamo menzionare le situazioni di arresto dovute alla manutenzione straordinaria o le situazioni di arresto legate al sistema di scavo, all'esecuzione di indagini, a interventi specifici, ecc.

La valutazione temporale dei principali componenti del ciclo di avanzamento si basa sui dati dei feedback disponibili nella letteratura. Questi valori sono riportati nella tabella seguente.

**Tab. 6-1: Parametri per il calcolo del tasso di utilizzo per una TBM di tipo EPB**

FUNZIONAMENTO TBM	TIPO	IPOTESI EPB (HK)
TASSO DI BASE DI PENETRAZIONE	Costante	<b>Roccia:</b> relativo all'UCS <b>Terreno:</b> correlati al sub-tipo come in Maidl
RPM	Costante Diretto	<b>Roccia:</b> 2.8 RPM <b>Terreno:</b> correlati al sub-tipo come in Maidl
INSTALLAZIONE ANELLO	Costante Diretto	<b>Roccia</b> 20 min (rocce deboli) e 30 min (Faglia) <b>Terreno</b> 35 min come in Maidl
ESTENSIONE DEI SERVIZI	Costante Diretto	6 min per anello

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

FUNZIONAMENTO TBM	TIPO	IPOTESI EPB (HK)
FERMI ESTERNI	Variabile Diretto	25% del ciclo di scavo (scavo+ anello + servizi.)
MANUTENZIONE ORDINARIA	Costante Indiretto	4 h/giorno
FERMO TBM MANUTENZIONE STRAORDINARIA	Variabile Indiretto	15% (Classe IV) 20% (Classe V)
EVACUAZIONE MATERIALE MANUTENZIONE STRAORDINARIA	Variabile Indiretto	5% del tempo operativo
POSSIBILI SONDAGGI/ DRENAGGI	Costante Indiretto	Drenaggio acque per n segmenti lungo il profilo (6 ore nette ogni 10m, in parte simultaneo alla manutenzione)
OPERAZIONI SPECIALI	Costante Indiretto	Vedi EPB Mode
SCAVI LATERALI	Costante Indiretto	Nessuno
LEARNING CURVE	Variabile Indiretto	50% del ROP I primi 100 anelli
LIMITI DI SMARINO	Costante Indiretto	900 ton/h - trenino
MODALITÀ EPB	Variabile Diretto	Dipende dal tipo di terreno

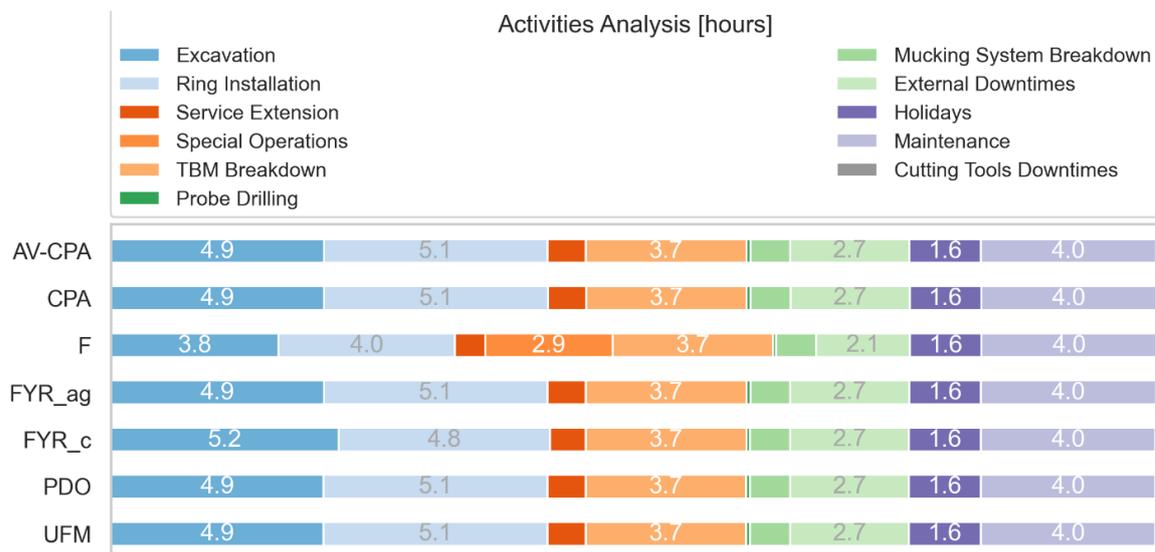
### 6.3 AVANZAMENTI MEDI

Nei capitoli seguenti si presentano i risultati dei calcoli analitici in termini di:

- ✓ tempo impiegato per ogni operazione durante un ciclo di 24 ore,
- ✓ indicatori di performance e il valore medio giornaliero di produzione per ogni classe di terreno.

#### 6.3.1 Tempo impiegato per ogni operazione

Nella figura seguente è illustrato il diagramma che rappresenta la distribuzione nel corso della giornata (24h) dei principali fattori che contribuiscono alla valutazione dell'avanzamento medio del TBM, divisi per tipologia di roccia/terreno incontrato.



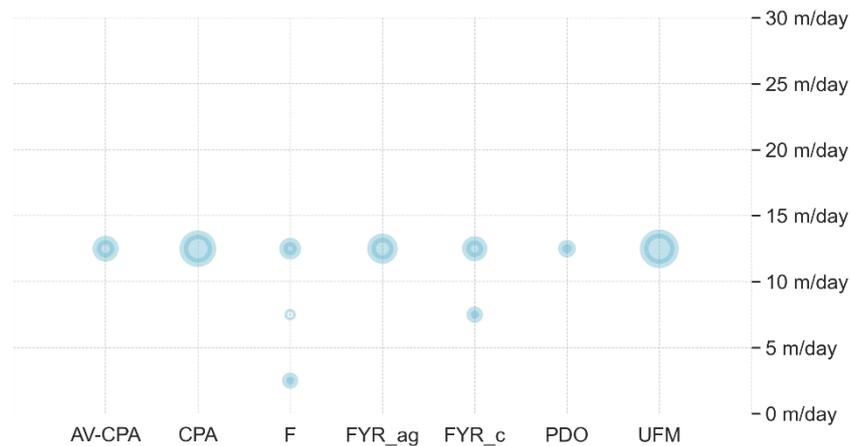
**Fig. 6.2 – Tempo trascorso per ogni operazione in 24 ore, a seconda della classe del terreno**

A titolo di promemoria, la distribuzione geomeccanica tra le classi del terreno fornisce il 4.2% per le faglie, il 42.8% in argilla e il 53% in roccia scadente.

#### 6.3.2 Avanzamenti e prestazioni della TBM

Il diagramma in Fig. 6.3 mostra gli avanzamenti medi giornalieri in base alla tipologia di roccia/terreno. La dimensione delle bolle è proporzionale al numero di segmenti scavati. Riepilogo degli indicatori è in Tab. 6-2.

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



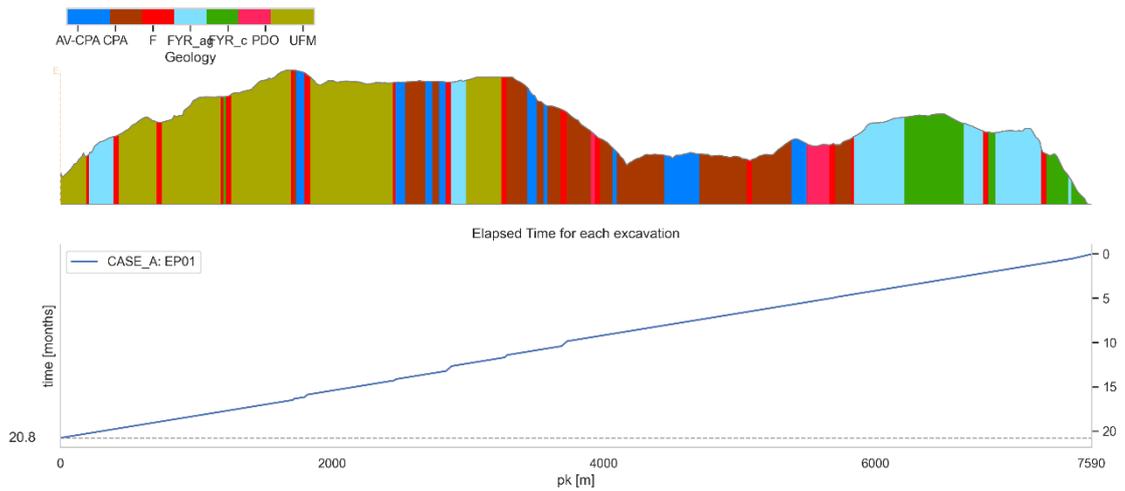
**Fig. 6.3 – Avanzamenti medi giornalieri sulla base del sottotipo di materiale scavato**

**Tab. 6-2: indicatori prestazionali dell'attività di scavo**

	AV-CPA	CPA	F	FYR_ag	FYR_c	PDO	UFM	TOT
ROP	2.70 m/h	2.70 m/h	2.70 m/h	2.70 m/h	2.45 m/h	2.70 m/h	2.70 m/h	<b>1.38 m/h</b>
UF	20.32%	20.33%	16.00%	20.32%	21.74%	20.31%	20.31%	
DAR	13.2 m/g	13.2 m/g	6.2 m/g	13.2 m/g	12.2 m/g	13.2 m/g	13.2 m/g	<b>12.0 m/g</b>
Anelli/die	9	9	4	9	8	9	9	<b>8</b>
Lunghezza	730 m	1900 m	580 m	1160 m	820 m	200 m	2210 m	<b>7600 m</b>
Giorni	55 g	144 g	94 g	88 g	67 g	15 g	168 g	<b>632 g</b>

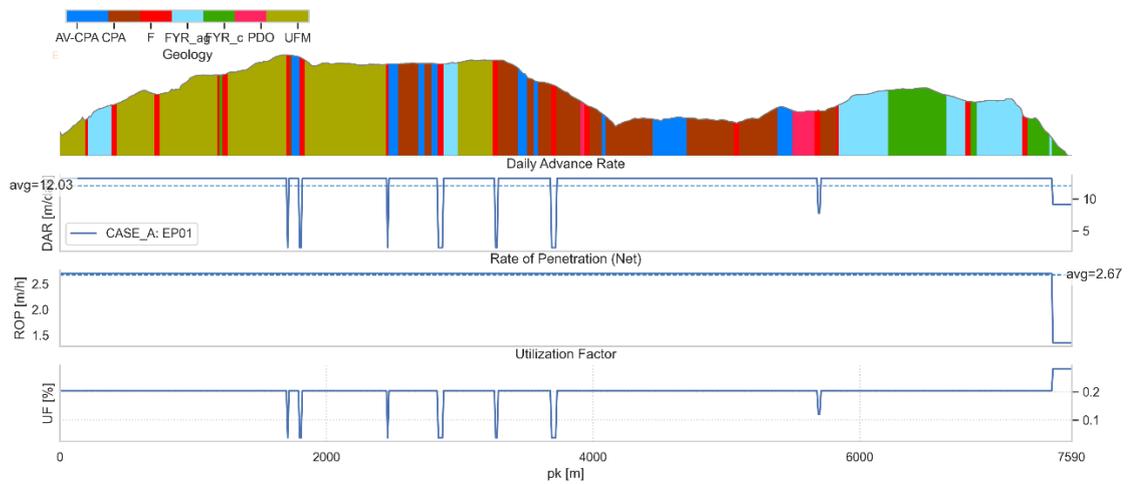
### 6.3.3 Tempo di avanzamento cumulativo

Nella Fig. 6.4 la progressione cumulativa del tempo di scavo (in mesi). Il tempo complessivo richiesto sarebbe di circa 21.9 mesi (Tab. 6-2). L'avanzamento giornaliero e il fattore di utilizzo (Utilization Factor) sono comparati con ROP (tasso di penetrazione) in Fig. 6.5.



**Fig. 6.4 – Stima dei mesi per lo scavo del tunnel**

Si calcolano circa 20,8 mesi necessari per la realizzazione della galleria di derivazione. Questa stima è relativa ai soli lavori di scavo e non considera i tempi relativi all'ordine della macchina di scavo e al suo assemblaggio/smontaggio.



**Fig. 6.5 – Comparazione dell'avanzamento medio giornaliero e del tasso di utilizzo con il tasso di penetrazione (ROP).**

## **7. CONCLUSIONI**

Questo documento rappresenta l'analisi svolta per la scelta della macchina di scavo. A questo scopo, sono state seguiti approcci multi-criteria (Multi-Criteria Decision Analysis - MCDA) al fine di fornire una valutazione globale e obiettiva delle prestazioni e dei rischi per la TBM di progetto.

L'approccio multicriteria fornisce una procedura sistematica per aiutare a scegliere tra le diverse alternative caratterizzate da variabili decisionali a volte diverse e non uniformi. L'obiettivo è quello di migliorare la qualità delle soluzioni offerte, facendo scelte in modo razionale ed efficiente, fornendo la possibilità di esplorare e confrontare una serie di alternative diverse.

Più specificamente in questa relazione sono stati sviluppati i seguenti punti:

- ✓ Analisi statistica di tipo Monte-Carlo per definire gli input geologico/geomeccanici del progetto,
- ✓ Valutazione analitica del comportamento del suolo interessato dallo scavo meccanizzato,
- ✓ Analisi iterativa per valutare la risposta della TBM nell'attraversare le diverse formazioni geologiche,
- ✓ Valutare l'interazione tra Tunnel / TBM per calcolare la probabilità di ogni evento di rischio con una granularità del tracciato pari a 10 m,
- ✓ Analisi multicriteria per la valutazione del livello di rischio residuo e la valutazione del livello di rischio complessivo.

In sintesi, l'obiettivo di tutte le analisi effettuate era quello di valutare i tempi di scavo, le prestazioni richieste in termini di spinta e coppia e i rischi per la TBM di progetto.