

POLITECNICO DI TORINO

DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA DELL'AMBIENTE, DEL TERRITORIO E DELLE
INFRASTRUTTURE

TESI DI LAUREA MAGISTRALE

GEOINGEGNERIA

Utilizzo di modelli previsionali analitici per le
prestazioni di macchine EPBS in terreni

Creazione di un programma di calcolo, in
collaborazione con SWS Engineering



Relatore:

Prof. Daniele PEILA

Candidato:

Tiziano SANDRI

A.A. 2017-2018

Ringraziamenti

Attraverso queste righe, vorrei far giungere i miei più sinceri ringraziamenti a tutti coloro che mi hanno sostenuto durante la stesura di questa Tesi, e a chi, in questi anni, ha saputo offrirmi l'appoggio necessario al raggiungimento di questo risultato.

In particolare, ringrazio il prof. Daniele Peila e l'Ing. Gabriele Eccher per la mai manchevole disponibilità, avendomi offerto la loro competenza per aiutarmi a superare gli ostacoli incontrati. Un ringraziamento particolare a SWS Engineering per l'ospitalità, e all'Ing. Andrea Ghensi, senza il cui supporto questo lavoro non sarebbe stato possibile.

Con affetto ringrazio coloro che mi hanno spinto e sorretto in questi anni di studio, a cominciare da mio fratello, che è il principale ispiratore di questa mia scelta, mia madre e mio padre. Ringrazio Alessandra per avermi sempre sostenuto e sopportato, facendosi in parte carico del peso di questa esperienza. Ringrazio e abbraccio i compagni di corso con cui ho condiviso difficoltà e successi, e sono grato all'Ing. Cesare Castiglia per i preziosi consigli.

In ultimo, ricordo Piero, Piera, Rosa e Beppe, la cui presenza è stata fondamentale per riuscire a concludere questo percorso.

Indice

1. Introduzione	1
2. Realizzazione di gallerie in terreni, tramite l'uso di TBM scudate	3
2.1 Criticità geotecniche relative allo scavo di gallerie in terreni	3
2.2 Frese meccaniche a piena sezione scudate	5
2.3 Vantaggi e svantaggi connessi all'uso di TBM scudate	7
2.4 L'importanza della previsione	10
3. Macchine EPBS: caratteristiche principali	12
3.1 Sistema di sostegno al fronte <i>Earth Pressure Balance</i>	12
3.2 TMB scudate di tipo EPB (EPBS)	17
3.2.1 La testa fresante	18
3.2.2 La camera di scavo	21
3.2.3 Il sistema di trasporto a coclea	25
3.2.4 Lo scudo	27
3.3 Utensili da terreno	29
3.3.1 Utensili utilizzati per indebolire il fronte di scavo	30
3.3.2 Gli <i>scrapers</i>	32
3.4 Principali parametri di scavo per la progettazione di macchine EPBS	35
3.4.1 Spinta e coppia massima	36
3.4.2 Velocità di avanzamento	37
3.4.3 Penetrazione e velocità di rotazione della testa di scavo	40
3.4.5 Rotazione della coclea	40
3.4.6 Energia specifica	41
4. Modelli analitici di previsione per macchine EPBS in terreni	42

4.1 Modelli di previsione per la spinta	43
4.1.1 Ates et al. (2013), in funzione del diametro di scavo	44
4.1.2 Krause (1987)	45
4.1.3 Szechy (1969)	47
4.1.4 Wittke et al. (2007)	47
4.1.5 JSCE (2007)	50
4.1.6 Maidl et al. (2012)	52
4.1.7 Wang et al. (2012)	56
4.1.8 Zhang et al. (2013), per fronte di scavo omogeneo	60
4.1.9 Zhang et al. (2013), per fronte di scavo stratificato	62
4.2 Modelli di previsione per la coppia	64
4.2.1 Ates et al. (2013)	64
4.2.2 Ates et al. (2013), in funzione della spinta massima	66
4.2.3 Maidl et al. (2012)	67
4.2.4 JSCE (2007)	68
4.2.5 Godinez et al. (2015)	70
4.2.6 Xiong et al. (2009)	72
4.2.7 Wang et al. (2012)	74
4.2.8 Zhang et al. (2013), per fronte di scavo omogeneo	76
4.2.9 Zhang et al. (2013), per fronte di scavo stratificato	78
4.3 Modelli di previsione per l'avanzamento	79
4.3.1 Burger (Herrenknecht AG) (2016)	80
4.3.2 Bilgin et al. (2014)	81
4.4 Modelli di previsione per la velocità di rotazione della testa di scavo	83
4.4.1 Bilgin et al. (2013)	83
4.4.2 Burger (Herrenknecht AG) (2016)	83

4.5	Modelli di previsione per la penetrazione	84
4.5.1	Bilgin et al. (2014), modello A	84
4.5.2	Bilgin et al. (2014), modello B	85
4.6	Modello di previsione per il sistema di trasporto a coclea	86
4.6.1	Li et al. (2014)	86
4.6.2	Merritt et al. (2008)	87
4.7	Modello di previsione per l'energia specifica	90
4.7.1	Cardu et al. (2011)	90
5.	Costruzione del programma di calcolo	92
5.1	Diagramma di flusso	92
5.1.1	Sequenza di esecuzione dei modelli implementati	95
5.1.2	Calcolo della spinta agente sul singolo utensile	97
5.2	Dati in ingresso	98
5.2.1	Parametri macchina	99
5.2.2	Parametri geotecnici e geometrici	101
5.2.3	Dati della coclea	103
5.2.4	Barre miscelatrici e supporti	104
5.2.5	Coefficienti di attrito	104
5.2.6	Utensili e parametri operativi	106
5.3	L'interfaccia di inserimento dati	107
5.4	L'interfaccia di stampa dei risultati	111
5.5	Calcolo dei parametri facoltativi, e supporto di SWS Engineering ...	111
6.	Analisi dei risultati e ottimizzazione del programma di calcolo	113
6.1	Verifica del codice e dei modelli implementati	113
6.1.1	Formazione geologica stratificata	118

6.1.2 Condizioni da rispettare per la validità del modello	120
6.2 Analisi dei risultati e confronto tra le diverse previsioni.....	120
6.2.1 Risultati in funzione del solo diametro di scavo.....	121
6.2.2 Analisi dei risultati per attraversamento di ghiaie sabbiose.....	125
6.2.3 Confronto tra i risultati per formazioni geologiche differenti ...	132
6.2.4 Scavo al di sotto della superficie piezometrica	138
6.2.5 Risultati per fronte di scavo stratificato	141
6.3 Trascurabilità dei dati in ingresso	145
6.3.1 Componenti poco significative per spinta e coppia	145
6.3.2 Analisi dei risultati variando i parametri iniziali	149
6.4 Definizione dei risultati complessivi del modello previsionale	161
6.4.1 Risultato di previsione per la spinta	162
6.4.2 Risultato di previsione per la coppia	164
6.4.3 Risultato di previsione per i restanti parametri di scavo	167
6.5 Definizione di pesi e fattori di sicurezza	169
7. Confronto dei risultati con dati storici.....	171
7.1 Dati di input.....	172
7.1.1 Galleria 1.....	172
7.1.2 Galleria 2.....	177
7.2 Analisi dei risultati per Galleria 1	181
7.3 Analisi dei risultati per Galleria 2	188
7.4 Applicabilità del modello	195
8. Conclusioni.....	198
Bibliografia.....	201

APPENDICI.....	205
1 – Risultati teorici in funzione del solo diametro di scavo	205
2 – Dati di input per 3 diverse formazioni geologiche.....	212
3 – Risultati teorici presentati per componenti.....	217
4 – Grafici di confronto riferiti al Capitolo 6.3.2.....	223
5 – Modelli geometrici relativi a Galleria 1 e Galleria 2	226
6 – Galleria 1: risultati con dati integrati	231
7 - Galleria 2: risultati con dati integrati	233
8 – Parte di codice del programma: modelli implementati per la previsione della spinta	235

1. Introduzione

Il globale aumento di interesse nei confronti della realizzazione di spazi e collegamenti sotterranei in aree urbanizzate ha portato ad un impiego crescente di frese meccaniche a piena sezione, adatte a scavare in strutture geologiche caratterizzate da scarsa, se non assente, capacità autoportante. Mosso da questa considerazione, lo studio presentato, in collaborazione con SWS Engineering, ha come scopo il tentativo di costruire un programma di calcolo analitico per la previsione dei principali parametri di scavo per frese meccaniche a piena sezione tipo EPBS (*Earth Pressure Balance Shields*), considerando il loro impiego attraverso formazioni superficiali generalmente definibili come terreni. Con questo termine si fa riferimento ad una qualsiasi struttura geologica di origine sedimentaria che non ha subito un processo di litificazione, ovvero priva di una coesione adatta a garantire una certa capacità autoportante.

Sebbene la creazione di nuovi spazi in sottoterraneo sia una valida soluzione per poter garantire alcuni dei servizi necessari ad un'elevata qualità di vita in ambito urbano, la realizzazione a poca profondità di tali opere al di sotto di aree densamente popolate comporta complessità legate al possibile sviluppo di cedimenti in superficie, con conseguenze gravi ed economicamente dispendiose. Al fine di evitare tali complicazioni, la necessità di affidarsi alle più idonee modalità di scavo ha portato ad una crescente domanda sul mercato internazionale di frese meccaniche a piena sezione EPBS, essendo in grado di limitare i cedimenti entro gli spostamenti concessi.

Per poter utilizzare tali macchine in modo efficiente e sicuro, è estremamente importante fare affidamento su modelli previsionali in grado di

fornire i parametri progettuali più idonei relativi a ciascuna fase di scavo. Poiché le formazioni geologiche generalmente sottostanti alle aree urbane hanno origine alluvionale, esse sono caratterizzate da incertezze geotecniche e strutturali che obbligano i progettisti ad affidarsi a modellazioni numeriche, ad oggi miglior metodo per poter progettare uno scavo in simili ambienti.

Tuttavia, la complessità di preparazione di tali modelli e la quantità di dati coinvolti comportano tempi di inizializzazione e calcolo relativamente lunghi, non adatti a fornire risultati utilizzabili in situazioni che richiedono una certa rapidità decisionale. L'interesse nei confronti di modelli previsionali in grado di fornire risultati in tempi rapidi ha motivato il lavoro descritto in questa tesi, ovvero il tentativo di costruire un programma di calcolo implementando formulazioni previsionali analitiche, per analizzarne i risultati e discuterne l'eventuale applicabilità. Va comunque tenuto in considerazione che le limitazioni dovute alla necessità di definire condizioni a contorno e approssimazioni rendono impossibile concepire la definizione di un modello analitico che possa del tutto sostituire quello numerico.

Per poter arrivare ad un risultato, sono state raccolte e valutate diverse formulazioni analitiche ed empiriche appartenenti alla letteratura tecnica internazionale, relative allo scavo in formazioni sciolte e argille, per mezzo di frese meccaniche EPBS. Tramite il linguaggio di programmazione Python, le formule individuate sono state implementate in un unico programma di calcolo, in grado di fornire il valore dei principali parametri di scavo, necessari a prevedere il funzionamento di una macchina EPBS attraverso formazioni geologiche aventi le caratteristiche precedentemente indicate. L'esecuzione del programma è stata possibile grazie all'utilizzo di dati in ingresso in parte reali e in parte teorici, che hanno permesso di verificarne la correttezza. La sua applicabilità è stata discussa anche sulla base di un confronto tra i risultati ottenuti e i valori reali riferiti a due diversi casi storici, evidenziando la necessità di un ulteriore approfondimento, sulla base di dati reali più numerosi di quelli avuti a disposizione per questa trattazione.

2. Realizzazione di gallerie in terreni, tramite l'utilizzo di TBM scudate

2.1 Criticità geotecniche relative allo scavo di gallerie in terreni

La realizzazione di gallerie attraverso strutture geologiche non consolidate obbliga i progettisti ad adottare metodi in grado di affrontare complessità diverse da quelle riscontrabili negli scavi che coinvolgono formazioni compatte. Non potendo contare sulla capacità autoportante del materiale, la stabilità del vuoto sotterraneo va garantita utilizzando idonee tecniche di supporto, in modo da evitare collassi del fronte di scavo ed elevati spostamenti radiali convergenti, indotti dal rilascio tensionale. In una simile configurazione, tali perturbazioni del terreno comporterebbero lo sviluppo di cedimenti in superficie che potrebbero arrecare gravi danni a strutture e persone, rischio che i costruttori sono obbligati a mantenere al di sotto di limiti severi.

La subsidenza non è l'unica problematica legata allo scavo in formazioni sciolte o dotate di scarsa coesione. Sebbene l'incertezza del modello geologico sia una caratteristica comune ad ogni attività di scavo, l'eterogeneità tipica dei terreni, in particolar modo se di origine alluvionale, fa sì che il ritrovarsi a dover interagire con trovanti, o strutture di diverse caratteristiche geotecniche rispetto a quelle previste, non sia un'eventualità ma una certezza. Le difficoltà interpretative legate al modello geologico obbligano all'utilizzo di metodi in grado di effettuare lo scavo evitando il più possibile l'interruzione dei lavori a

causa di impossibilità tecniche, garantendo in ogni momento l'accettabilità dei cedimenti superficiali.

La permeabilità dei terreni è un ulteriore parametro che può portare a complicazioni dovute alla presenza di una falda acquifera, situazione che sovente si riscontra durante gli scavi attraverso tali formazioni. Per quanto le tecniche in grado di affrontare questa problematica siano molteplici e caratterizzate da diversi approcci, è importante considerare che la perturbazione della quota piezometrica può portare ad una movimentazione di acqua e grani solidi, in grado di accentuare i cedimenti superficiali. Per questo motivo, può risultare estremamente importante procedere con l'impermeabilizzazione del cantiere sotterraneo, evitando di drenare l'acqua altrimenti convogliata dal vuoto che si sta realizzando.

Anche l'attraversamento di terreni formati da grani dotati di un'elevata libertà di movimento è un'eventualità riscontrabile, e le attività di scavo potrebbero comportare un disturbo tale da causare il fenomeno della liquefazione, con presenza o meno di acqua interstiziale. Questa problematica va affrontata valutando anticipatamente l'effetto che le vibrazioni indotte dalle operazioni di realizzazione della galleria potrebbero avere sulla geologia attraversata, e utilizzando metodi e tecniche in grado di limitare ogni possibile perturbazione critica. In ultimo, anche la presenza di fini all'interno della massa scavata e, in particolare, di minerali argillosi può portare a complessità dovute all'adesività del materiale scavato, causa importante di complicazioni sia per le operazioni di scavo che per quelle di smarino.

Considerando tutte le problematiche descritte, risulta evidente come una previsione accurata dei parametri di scavo attraverso terreni sia di fondamentale importanza. In particolare, qualora la metodologia scelta dal progettista implichi l'utilizzo di frese meccaniche a piena sezione, la presenza dello scudo, la capacità di offrire un idoneo sostegno al fronte e l'azione di scavo della testa rotante richiederebbero di conoscere le caratteristiche operative

della macchina maggiormente adatte ad affrontare le situazioni di lavoro più critiche, per poter garantire l'ottimale avanzamento della macchina e la realizzazione della galleria. Qualora durante lo scavo la previsione effettuata in fase di progetto non risultasse a favore di sicurezza, si rischierebbero problematiche in grado di complicare estremamente il proseguire dei lavori, con il rischio di perturbazioni dannose per le strutture superficiali e l'estensione del periodo di svolgimento delle operazioni.

2.2 Frese meccaniche a piena sezione scudate

Le complessità tipiche della realizzazione di gallerie attraverso formazioni non consolidate impongono scelte progettuali e operative adatte a garantire la sicurezza del cantiere e dell'ambiente circostante. Per quanto lo scavo convenzionale abbia a disposizione tecniche in grado di permettere la costruzione sicura di un'opera in simili condizioni, l'attuale tendenza alla realizzazione di gallerie di lunghezza sempre maggiore sposta la convenienza economica verso lo scavo meccanizzato a piena sezione. Questa metodologia non è priva di svantaggi, a cominciare dai costi d'investimento iniziali e dai tempi di attesa per l'inizio dei lavori legati alla costruzione della macchina stessa, ma le spese complessive risultano vantaggiose quando la lunghezza di scavo è superiore a circa 1500 m. Inoltre, la maggiore rapidità di avanzamento può essere preferibile in determinate situazioni, così come il migliore controllo dei cedimenti in caso di operazioni al di sotto di aree urbane.

Secondo la classificazione suggerita da ITA (*International Tunnelling and Underground Space Association*) Working Group N.14 "*Mechanized Tunneling*" nell'anno 2000, una qualsiasi fresa meccanica dotata di una testa di scavo rotante a piena sezione può essere comunemente definita TBM (*Tunnel Boring Machine*). Per quanto la definizione utilizzata dalla *German Tunnelling*

Committee (DAUB) riferisca il termine alle sole macchine per lo scavo attraverso masse rocciose compatte, oggigiorno l'utilizzazione di tale acronimo in riferimento a tutte le frese meccaniche a piena sezione per la realizzazione di gallerie è globalmente accettata (Guglielmetti et al., 2007). La netta distinzione cui si fa più comunemente riferimento riguarda la differenza tra le macchine adatte a scavare in formazioni con una certa capacità autoportante e quelle con caratteristiche tali da permettere lo scavo attraverso strutture cedevoli, garantendo la sicurezza del cantiere e limitando i cedimenti superficiali.

Questo secondo tipo di TBM è caratterizzato dalla presenza di uno scudo circolare in acciaio, in grado di opporsi alla convergenza radiale del terreno causata dal rilascio tensionale del terreno cedevole. In questo modo, la macchina stessa può fornire il supporto temporaneo necessario per proteggere il cantiere e permettere l'installazione del rivestimento finale della galleria, limitando il rischio di cedimenti superficiali dannosi. Oltre a ciò, alcune TBM scudate sono in grado di operare in modalità "chiusa", ovvero controbilanciando la spinta attiva del fronte di scavo con una pressione sufficiente ad evitarne il collasso e ad impermeabilizzare il cantiere, qualora le operazioni avvenissero al di sotto della quota piezometrica. Questa tipologia di macchine richiede una sintonia di operazioni tra l'avanzamento e la costruzione degli anelli di conci prefabbricati che formano il rivestimento finale della galleria, poiché proprio su questi conci appoggiano i martinetti di spinta che forzano la testa di scavo contro il terreno.

Sebbene i campi di applicazione relativi a TBM aperte e TBM scudate si intersechino, nel caso della realizzazione di gallerie attraverso formazioni non consolidate è obbligatorio fare riferimento a questa seconda tipologia, dando per scontato l'utilizzo della macchina in modalità "chiusa" per poter sostenere anche il fronte di scavo, con l'obiettivo di evitare la creazione di fornelli e il drenaggio dell'eventuale falda acquifera. È bene tener presente che la scelta della macchina più idonea per lo scavo da realizzare è strettamente connessa alle proprietà del terreno da attraversare e alle caratteristiche dell'ambiente

superficiale: un'attenta valutazione e gestione dei rischi deve accompagnare ogni scelta progettuale, sulla base di previsioni in grado di suggerire quali potrebbero essere le condizioni peggiori in cui la TBM utilizzata potrebbe ritrovarsi a dover operare.

2.3 Vantaggi e svantaggi connessi all'utilizzo di TBM scudate

Le tecniche di scavo a disposizione dei progettisti per la realizzazione di gallerie vengono comunemente suddivise all'interno di due macro-categorie: lo scavo convenzionale e lo scavo meccanizzato a piena sezione. Le principali differenze che giustificano questa distinzione sono dovute alle modalità con cui le diverse fasi di scavo coesistono all'interno del cantiere. Nel caso del metodo convenzionale, la realizzazione della galleria avviene tramite un processo fortemente ciclico, generalmente caratterizzato da una netta separazione temporale tra le operazioni di attacco, di smarino, di installazione delle prime strutture di sostegno e di costruzione del rivestimento finale. In particolare, vi è l'esigenza di definire la lunghezza del passo di avanzamento in funzione della capacità temporanea di autosostegno della formazione geologica attraversata, essendo necessaria l'installazione di centine per proseguire con lo scavo in condizioni di sicurezza per i lavoratori e per l'opera stessa. Per quanto riguarda lo scavo meccanizzato a piena sezione, la separazione temporale tra le diverse operazioni all'interno del cantiere è meno netta o, in alcuni casi, del tutto assente. La lunghezza del passo di scavo, inoltre, non è condizionata dalla capacità autoportante della formazione attraversata, che nei casi più critici viene continuamente sorretta grazie alla presenza dello scudo, al di sotto del quale si provvede con l'installazione del rivestimento finale.

Lo scavo di gallerie non implica mai un'unica possibilità valida nella scelta del metodo corretto, e le decisioni del progettista sono fortemente condizionate dall'analisi dei rischi e dalla previsione dei costi di realizzazione dell'opera. Per questo motivo, la scelta del metodo di scavo non dipende solamente dagli aspetti geologici, ma va soprattutto compiuta in funzione dei costi di cantierizzazione e di esecuzione. Sebbene la realizzazione di una galleria attraverso terreni presenti criticità elevate in termini di stabilità, l'utilizzo di una TBM scudata va comunque considerato come un'alternativa tecnologicamente funzionale al metodo convenzionale, e non come una scelta obbligata. Tuttavia, la realizzazione di gallerie di lunghezza elevata, la necessità di limitare fortemente i cedimenti superficiali, e l'eventuale richiesta di un rapido avanzamento possono far protendere committenti e progettisti verso tale soluzione. L'evoluzione tecnologica degli ultimi 40 anni ha portato ad un crescente utilizzo in abito internazionale dello scavo meccanizzato a piena sezione, soprattutto quando la costruzione di gallerie interessa aree urbane.

I vantaggi legati alla scelta di tale metodo di scavo sono elencati da Guglielmetti et al. (2007), considerando l'eventualità di utilizzare TBM scudate proprio nel caso in cui sia richiesta la realizzazione di una galleria in terreni al di sotto di aree sensibili:

- Condizioni di comfort e sicurezza per i lavoratori, garantite da modalità operative simili a quelle di una produzione industriale, anziché mineraria.
- Maggiore rapidità di realizzazione della galleria, dovuta al possibile automatismo delle attività e del ciclo costruttivo.
- Possibilità di mantenere un controllo continuo sui principali parametri di scavo, come la quantità di materiale scavato, la pressione di supporto al fronte, over-break, i movimenti del terreno attorno alla galleria e i cedimenti superficiali.
- Basso disturbo acustico, limitata dispersione di polveri nell'ambiente e disturbo minimo della quota piezometrica.

- L'utilizzo di conci prefabbricati per il rivestimento della galleria, facilitando il controllo delle fasi costruttive e incrementando la qualità finale del lavoro.

Per poter avere una visione più completa, è necessario un confronto tra le caratteristiche appena indicate e gli svantaggi legati all'utilizzo di una macchina TBM, così come elencati da Maidl et al. (2012):

- Tempi lunghi per il progetto, la costruzione e l'assemblaggio della macchina.
- Tempi lunghi di familiarizzazione con la macchina.
- La cantierizzazione è complessa, richiede spazio e comporta costi elevati che spostano la convenienza economica solamente verso la realizzazione di lunghe gallerie.
- Le prestazioni sono condizionate dalla variabilità del modello geologico.
- La sezione del vuoto creato è circolare, riducendo l'efficienza in termini spaziali
- Costi elevati nel caso si richieda la variazione della geometria realizzata.
- Gli anelli di rivestimento vanno progettati per resistere alla forza di spinta della macchina.

Sulla base di queste considerazioni, i costi di realizzazione di una galleria con metodo convenzionale o con scavo meccanizzato a piena sezione tendono generalmente a trovare un punto di equilibrio quando si progettano lunghezze totali di scavo che si aggirano tra i 1500 e i 2000 metri. Per gallerie di maggiore sviluppo la scelta dei progettisti ricadrà facilmente sull'impiego di TBM, soprattutto nel caso di lavori in terreni al di sotto di aree urbane, poiché i vantaggi legati a questo metodo sono in grado di fornire valide risposte all'analisi dei rischi connessi a questo tipo di operazioni. Tuttavia, è bene tener sempre presente che l'utilizzo di una fresa meccanica a piena sezione deve basarsi su una corretta previsione dei parametri legati a ciascuna fase di scavo,

in modo da non doversi trovare ad affrontare situazioni per cui la macchina stessa non è stata progettata.

2.4 L'importanza della previsione

Le caratteristiche dei processi di scavo attraverso formazioni non consolidate, descritte in precedenza, devono essere utilizzate come base su cui definire le linee guida per la progettazione della macchina più idonea alla realizzazione di una particolare galleria, qualora la scelta ricada sull'utilizzo di una TBM scudata. La capacità di affrontare le diverse complessità che generalmente si riscontrano nei terreni dipende da come la macchina viene progettata e dalla tecnologia che la caratterizza. Per questo motivo è fondamentale poter prevedere le condizioni di scavo in cui la TBM si potrebbe ritrovare, e quali dovranno essere le operazioni da effettuare e le forze in gioco, in modo da garantire all'utilizzatore il proseguimento dei lavori anche nelle condizioni più critiche.

Con riferimento alle interazioni tra materiale scavato e testa di scavo, risulta molto importante la previsione della coppia agente sulla testa di scavo, grandemente influenzata dalle proprietà meccaniche del terreno e da alcuni parametri operativi della TBM, come la velocità di rotazione della testa fresante. È evidente come una previsione corretta delle condizioni più critiche in cui ci si ritroverà ad operare è necessaria per poter dotare la macchina della giusta potenza e per progettare un sistema di guida in grado di controllare, nel limite del possibile lo sviluppo delle forze agenti sulla testa di scavo. Uguale importanza va data all'analisi della spinta longitudinale all'asse della galleria, forza che la macchina deve sviluppare per poter avanzare e progredire con la realizzazione della galleria. In questo caso, le forze di attrito sullo scudo e la spinta che la TBM deve opporre al fronte di scavo sono le caratteristiche principali da cui la definizione di tale parametro dipende.

Per poter effettuare una previsione più in generale in merito all'avanzamento dei lavori di realizzazione della galleria, è necessario valutare anche parametri non strettamente connessi alla potenza da installare sulla TBM. Gli interventi di manutenzione necessari soprattutto per la sostituzione degli utensili montati sulla testa di scavo comportano l'interruzione dell'avanzamento, che può essere programmata solamente conoscendo i valori caratteristici di abrasività del terreno attraversato e il modo in cui questi possono affliggere i materiali utilizzati per attaccare il fronte. Inoltre, una percentuale elevata di materiale fine, in particolare minerali argillosi, può comportare un'adesività in grado di influenzare il comportamento della TBM su fronti diversi. Un terreno adesivo può portare ad un incremento progressivo della coppia agente sulla testa di scavo, nonché provocare problematiche nel sistema utilizzato per il trasporto verso la superficie del materiale scavato.

Questa tesi ha lo scopo di costruire un programma previsionale valido per macchine scudate tipo EPB e, sebbene il discorso generale fino a qui condotto non sia sufficiente a descrivere le modalità con cui tale macchina è in grado di affrontare lo scavo attraverso terreni (argomento affrontato più nel dettaglio nel Capitolo seguente), le osservazioni precedenti rendono evidente la necessità che giustifica questo lavoro, ovvero la possibilità di offrire una previsione rapida dei principali parametri, in grado di permettere al progettista di delineare quelle che saranno le caratteristiche della TBM più idonee allo scavo nelle situazioni considerate. Una volta iniziato lo scavo, la macchina che ha iniziato le operazioni di realizzazione della galleria dev'essere in grado di ultimarla, potendo confrontarsi con le situazioni di scavo più critiche previste. Risulta ovvio che qualsiasi situazione impreveduta, per la quale la TBM non fosse progettata, comporterebbe complicazioni in grado di rallentare i lavori, talvolta in modo indefinito, con il conseguente aumento esponenziale dei costi per il costruttore.

3. Macchine EPBS: caratteristiche principali

3.1 Sistema di sostegno al fronte *Earth Pressure Balance*

Il potenziale sviluppo di cedimenti in superficie è il problema cui occorre prestare la maggiore attenzione quando si progetta lo scavo di gallerie in terreni, a causa delle proprietà meccaniche tipiche di tali formazioni. Le criticità legate alla subsidenza indotta dalle operazioni in sotterraneo sono causate dall'instabilità del fronte di scavo e dalla convergenza in direzione radiale rispetto all'asse della galleria, fenomeno quest'ultimo caratterizzato da una realtà tridimensionale, poiché si stabilizza progressivamente alle spalle del cantiere di avanzamento.

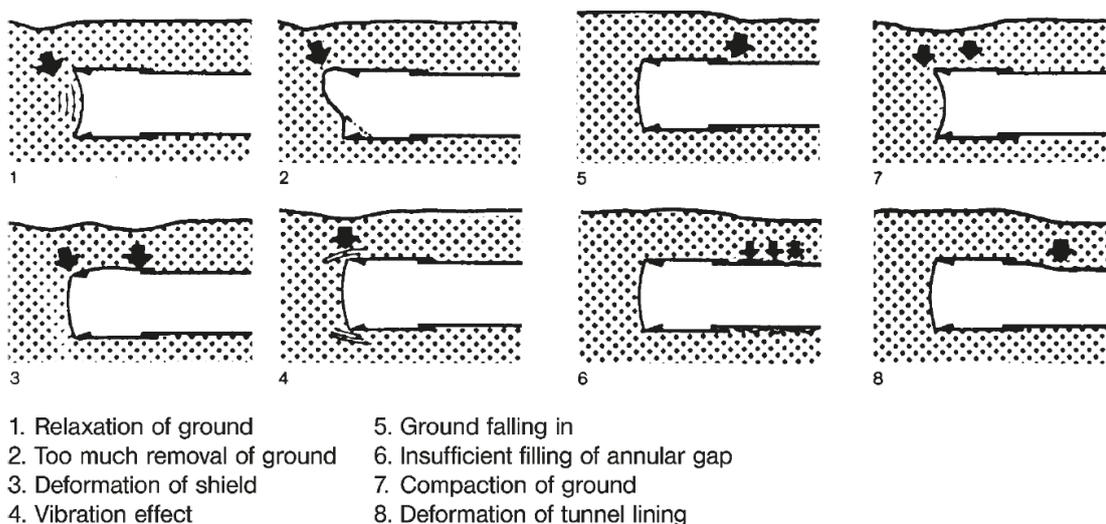


Figura 3-1. Tipologie di cedimenti legati alla realizzazione di gallerie superficiali [20]

Con l'attenzione rivolta all'impiego di TBM scudate, o TBM-S secondo la classificazione fornita da DAUB, si osserva come tutte le tipologie di frese meccaniche a piena sezione protette da scudo agiscano con le stesse tecniche per limitare la convergenza radiale legata ad un eventuale sovrascavo e all'avanzamento dello scudo, consistenti nell'iniezione di malte cementizie più o meno complesse a riempimento del vuoto creatosi. Diversamente, per quanto riguarda il sostegno del fronte di scavo, il progresso tecnologico degli ultimi 40 anni ha portato allo sviluppo di diverse soluzioni in grado di offrire la necessaria stabilità e impermeabilizzazione, senza la creazione di limiti per le operazioni di attacco e di manutenzione.

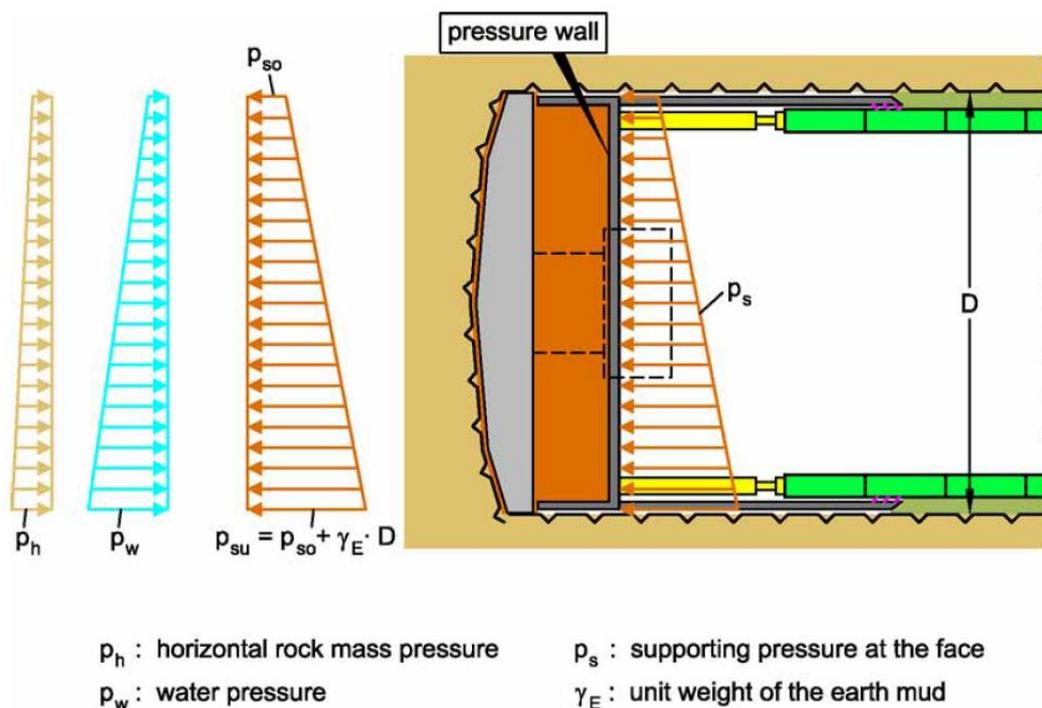


Figura 3-2. TBM-S operante in modalità chiusa [28]

Nonostante le differenze tra le tecniche di sostegno esistenti siano tali da caratterizzare fortemente i diversi tipi di TBM-S e i loro campi di applicazione,

tutte le più efficaci tecnologie a disposizione si basano sull'utilizzo di un materiale con caratteristiche meccaniche che gli permette di trasmettere una pressione stabilizzante al fronte. Questo mezzo di supporto viene compresso all'interno di una camera di scavo, delimitata dallo spazio tra il terreno sotto attacco e una parete stagna alle spalle della testa fresante, sulla quale si esercita l'azione dei martinetti idraulici responsabili dell'avanzamento della TBM. La pressione generata in questo modo sul fronte dev'essere facilmente controllabile e in grado di bilanciare la spinta geostatica del terreno e la pressione dell'acqua, riducendo le perdite di volume dovute all'instabilità della formazione ed evitando la perturbazione della falda acquifera e della quota piezometrica. Considerando le obbligate interazioni tra il materiale all'interno della camera di scavo e il terreno su cui queste tecniche di supporto fanno affidamento, risulta evidente come la natura del mezzo utilizzato e le caratteristiche geotecniche della formazione geologica attraversata siano strettamente legate tra loro, obbligando il progettista a scegliere il metodo di sostegno (e dunque il tipo di macchina scudata) più adatto in base alla granulometria e alla permeabilità del terreno interessato dalle operazioni di scavo.

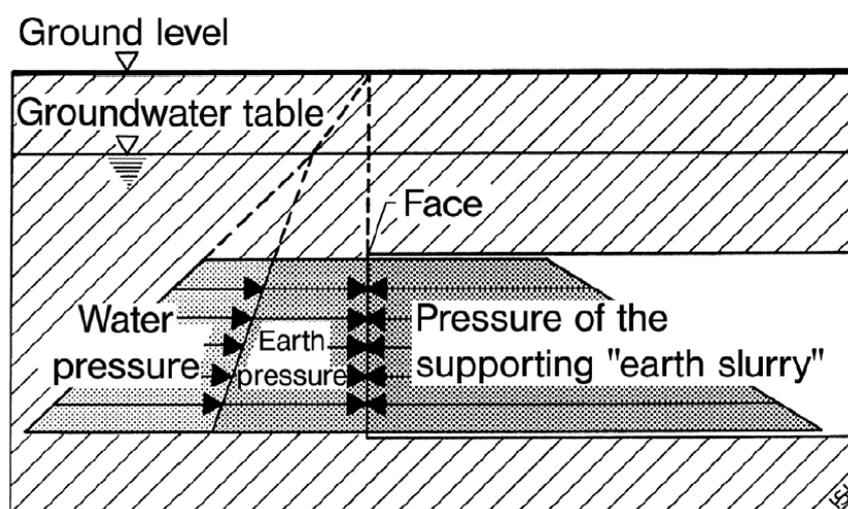


Figura 3-3. Pressione di sostegno del fronte di scavo, applicata con sistema EPB [19]

Tra le tecniche oggi più comunemente utilizzate, quella di maggiore interesse relativamente allo scopo di questa trattazione si è sviluppata in Giappone nei primi anni dopo il 1970 ed è globalmente riconosciuta con il nome di *Earth Pressure Balance* (EPB). Essa si basa sulla possibilità di utilizzare il terreno scavato dagli utensili e accumulato all'interno della camera di scavo per creare un materiale a bassa permeabilità, plastico, e con un basso coefficiente d'attrito interno, caratterizzato da una fluidità adatta ad applicare la pressione necessaria a sorreggere il fronte. Poiché pochi depositi geologici hanno tali caratteristiche, occorre iniettare dei condizionanti dalla testa fresante, aventi lo scopo di miscelarsi al materiale scavato per modificarne le proprietà meccaniche. Sebbene la scelta dei progettisti possa ricadere sull'utilizzo di acqua, bentonite, polimeri, o schiume per modificare la natura del materiale all'interno della camera in pressione, quest'ultime sono soggette ad una crescente attenzione dovuta al merito di poter ampliare enormemente il campo di applicazione di questa tecnologia.

L'impiego di schiume per modificare le proprietà meccaniche del materiale scavato ha permesso di spingersi ben oltre ai limiti originali che caratterizzavano il metodo EPB, inizialmente utilizzabile in terreni con presenza di fini (dimensione dei grani <0.06 mm) superiore al 30% (Maidl et al., 2012). L'efficacia di questi condizionanti è dovuta in particolare alla loro composizione, il cui 90-95% è occupato da aria, in grado di ridurre la frizione tra le particelle di terreno all'interno della camera di scavo; il restante 10-5% viene occupato da acqua, agenti schiumogeni ed eventuali polimeri, con il compito di garantire una bassa permeabilità e di contribuire a dare una certa coesione al nuovo materiale creato. Grazie a ciò, anche lo smarino avviene con metodologie caratterizzate da una praticità vantaggiosa, permettendo l'uso di nastri trasportatori e l'assenza di impianti di separazione: il materiale condizionato, una volta all'esterno, va depositato per alcuni giorni prima della sua messa a scarica, in

modo che si liberi naturalmente dell'aria intergranulare al suo interno, riconquistando le caratteristiche precedenti.

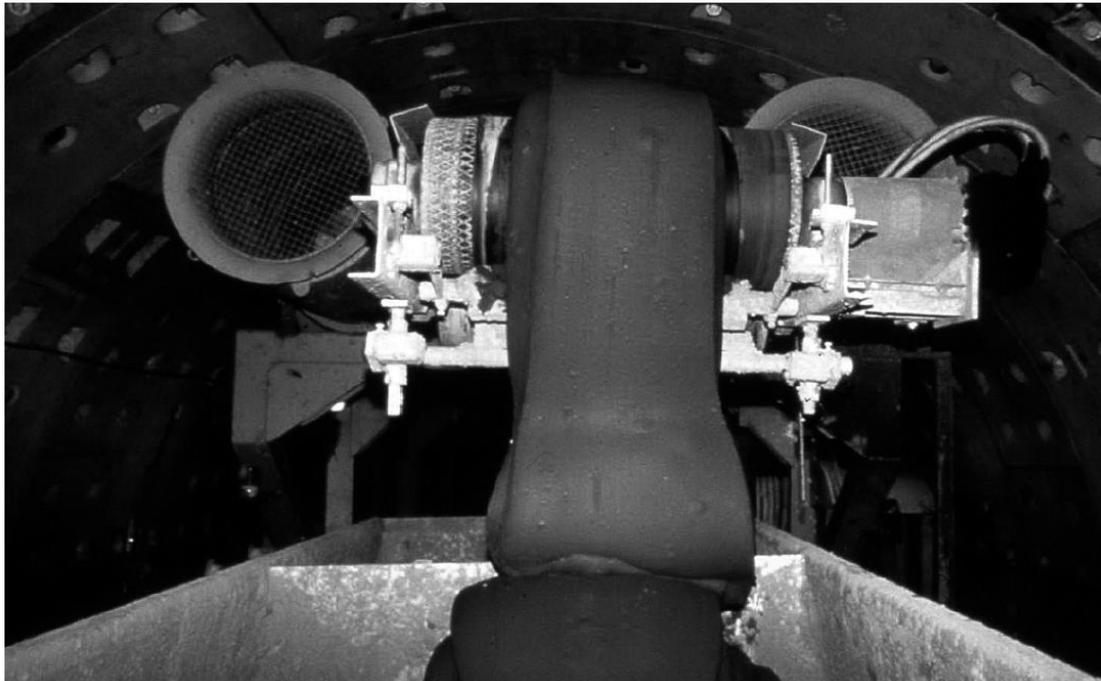


Figura 3-4. Terreno condizionato, trasportato su nastro trasportatore [19]

L'ampio campo di utilizzo della tecnologia *Earth Pressure Balance*, giustifica il crescente interesse internazionale nei suoi confronti, grazie alla capacità di agire efficacemente nelle situazioni più varie e critiche. Ad oggi, questo metodo di sostegno del fronte di scavo trova sempre più applicazioni, a causa della sua duttilità e della possibilità di poter essere utilizzato su macchine in grado di scavare in formazioni geologicamente differenti. La possibilità di utilizzare teste di scavo poco aperte permette di montare su di esse utensili a disco, e la loro struttura risulta adatta a sostenere le spinte necessarie per l'avanzamento in roccia. Per questo motivo, le TBM che adottano questa tecnica, prendendone il nome, sono in grado di scavare sia in terreni, sia attraverso masse rocciose in

particolare di ambiente carsico, dove l'impermeabilizzazione del cantiere riveste un'importanza rilevante.

3.2 TMB scudate di tipo EPB (EPBS)

Sebbene le tecniche di supporto del fronte di scavo associabili all'utilizzo di TBM scudate siano molteplici, esse condizionano fortemente la struttura meccanica e geometrica della macchina, a tal punto da obbligare il progettista a compiere una scelta che caratterizzerà lo scavo della galleria per la sua intera lunghezza. La natura del materiale usato per trasmettere la necessaria pressione al fronte comporta l'adozione di spazi e sistemi adatti al suo utilizzo e al suo trasporto, che vincolano la TBM a poter operare solamente utilizzando la tecnica prescelta. Per questo motivo, le frese meccaniche a piena sezione scudate vengono generalmente classificate in funzione del metodo di sostegno del fronte di scavo che adottano, prendendone il nome. Con riferimento al metodo *Earth Pressure Balance* descritto nel Capitolo 3.1, le TBM scudate progettate per operare con tale sistema prendono il nome di *Earth Pressure Balance Shield*, ugualmente identificabili con l'acronimo EPBS.

Grazie all'ampio campo di applicazione in cui può operare efficacemente, questo tipo di TBM scudata è oggi soggetta ad un'attenzione internazionale crescente, trovando spesso impiego nei cantieri caratterizzati da criticità rilevanti in termini di stabilità, cedimenti e variabilità geotecnica. Avendo questa tesi lo scopo di considerare l'applicabilità di un modello previsionale analitico, riferito all'impiego di questa tipologia di macchine in terreni, è necessario descriverne le principali caratteristiche meccaniche considerate dai modelli analitici utilizzati, dettagliatamente descritti nel Capitolo 4. Per farlo, è utile suddividere la struttura di una generica macchina EPBS in zone che

rivestono ruoli attivi nel processo di avanzamento, limitandosi tuttavia ad analizzarne gli aspetti rilevanti ai fini di questa trattazione.

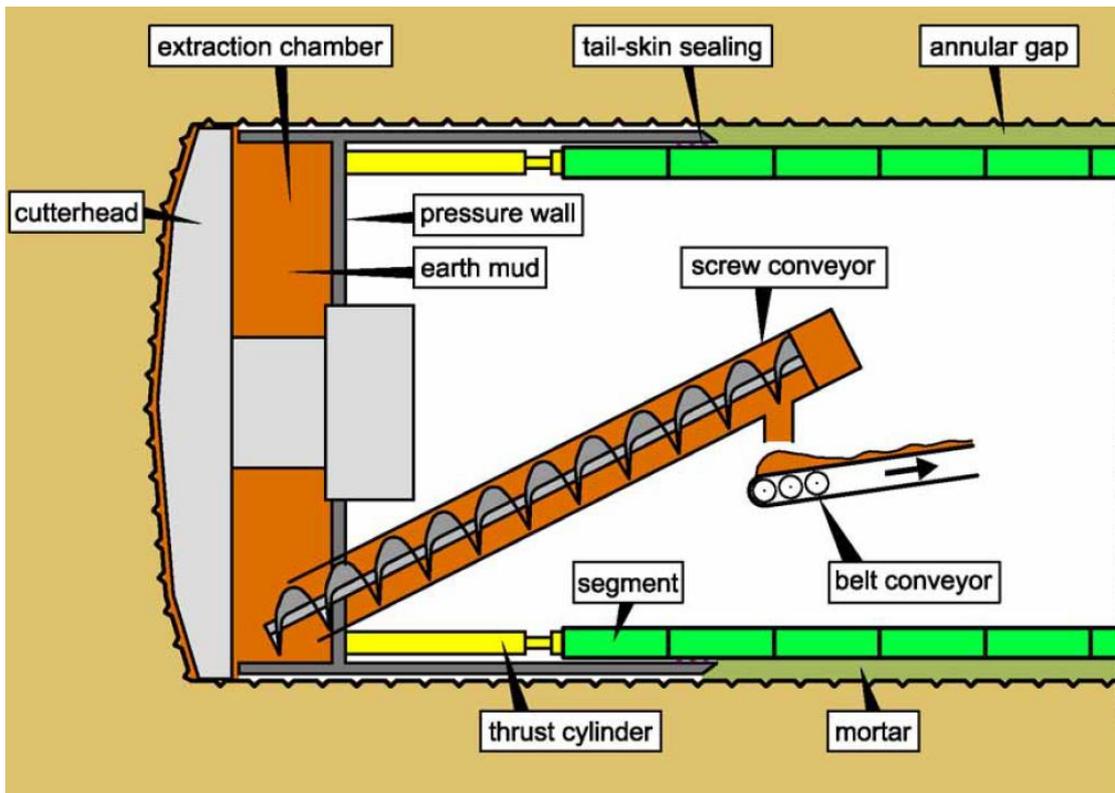


Figura 3-5. Schema rappresentativo dell'operatività di una macchina EPBS in modalità chiusa [28]

3.2.1 La testa fresante

La testa di scavo di una TBM è senz'altro la sua componente esteticamente più caratteristica, progettata in funzione della dimensione della sezione da realizzare e delle proprietà meccaniche delle formazioni geologiche che si prevede di incontrare durante l'avanzamento per la realizzazione della galleria. Tale struttura dev'essere in grado di alloggiare gli utensili necessari ad agire sul

terreno, in modo da romperne l'eventuale coesione e movimentarlo verso la camera di scavo, attraverso aperture definite in fase di progetto secondo precise necessità. Nel caso di una macchina EPBS, l'installazione di ugelli per l'iniezione di agenti condizionanti nella parte frontale risulta essere estremamente utile per iniziare a modificare le proprietà del materiale direttamente sul fronte di scavo, intervenendo sul terreno appena distaccato sotto l'azione degli utensili.

L'utilizzo di schiume e/o polimeri per modificare le proprietà meccaniche del materiale accumulato nella camera di scavo permette una distribuzione omogenea della pressione generata. Questo consente ai progettisti di definire le aperture della testa di scavo unicamente in funzione della geologia attraversata, non dovendo considerare vincoli imposti dal metodo di sostegno del fronte. In questo modo, è possibile utilizzare una macchina EPBS con una testa molto aperta qualora venisse previsto l'attraversamento di terreni ricchi di fini e dal comportamento adesivo, oppure con una testa più chiusa in grado di montare e supportare l'azione di utensili da roccia.

Nonostante le potenzialità pressoché illimitate di scelta dell'apertura, definita come percentuale relativa alla superficie totale della testa di scavo, la difficoltà di decisione nasce a causa di fattori geotecnici in grado di rendere difficoltoso l'avanzamento della macchina e le operazioni di estrazione del marino. Per quanto una testa aperta possa diminuire considerevolmente la creazione di ostruzioni, dovute al comportamento adesivo di un terreno ricco di fini, l'assenza di un supporto meccanico offerto da una superficie più chiusa potrebbe creare rischi per le operazioni di manutenzione, qualora il fronte di scavo fosse caratterizzato da instabilità e distacchi localizzati. Parimenti, l'accesso incontrollato alla camera di scavo di eventuali blocchi e trovanti potrebbe ostacolare il flusso del marino verso il sistema di estrazione a coclea, che potrebbe addirittura danneggiarsi in caso di dimensioni non compatibili. L'adozione di una testa di scavo relativamente chiusa, al contrario, potrebbe

favorire la creazione di ostruzioni dovute al comportamento adesivo di un certo materiale, aumentando la coppia necessaria per la propria rotazione.

È evidente come attraverso sedimenti di origine alluvionale entrambe le criticità descritte possano affliggere contemporaneamente lo scavo di una galleria. Per poter efficacemente operare in simili condizioni, occorre innanzitutto garantire la corretta movimentazione del materiale all'interno della camera di scavo e della coclea, impedendo ai blocchi di dimensioni troppo grandi l'accesso attraverso la testa fresante. La dimensione delle singole aperture, quindi, dev'essere definita in funzione della massima dimensione dei blocchi coesi che si possono accettare all'interno della camera di scavo, evitando così ostruzioni e danneggiamenti al sistema di trasporto. I trovanti troppo grossi per superare questa barriera dimensionale continuano a trovarsi sotto l'azione della testa di scavo e degli eventuali utensili a disco montati su di essa, fino a ridursi alle dimensioni accettabili. Per quanto riguarda il comportamento adesivo del terreno ricco di fini, è necessario utilizzare dei condizionanti in grado di limitarne la collosità, per impedire lo sviluppo di una coppia troppo elevata rispetto a quella sostenibile dalla EPBS. Inoltre, siccome le velocità tangenziali sono minori con l'avvicinarsi all'asse della galleria, occorre fornire la testa di scavo di sistemi in grado di evitare l'accumulo di materiale nella zona centrale, sia sul fronte che sul retro.

Considerando l'interesse internazionale per lo scavo con di diametri sempre maggiori, divenuti economicamente vantaggiosi grazie ai continui progressi tecnologici avvenuti in questo settore, è d'obbligo osservare come la coppia richiesta alla testa fresante aumenti di conseguenza, al di là del comportamento più o meno coloso del terreno. Per poter limitare l'intensità delle forze agenti sulla testa di scavo, una possibilità a disposizione dei progettisti prevede la suddivisione di questa in due parti concentriche, rotanti in verso opposto. Un esempio di tale soluzione messa in pratica è la macchina EPBS costruita da Herrenknecht AG, utilizzata per la realizzazione del *bypass* dell'autostrada M-30

a Madrid: la testa di scavo di diametro 15,16 metri è stata dotata di due parti concentriche rotanti in verso opposto.

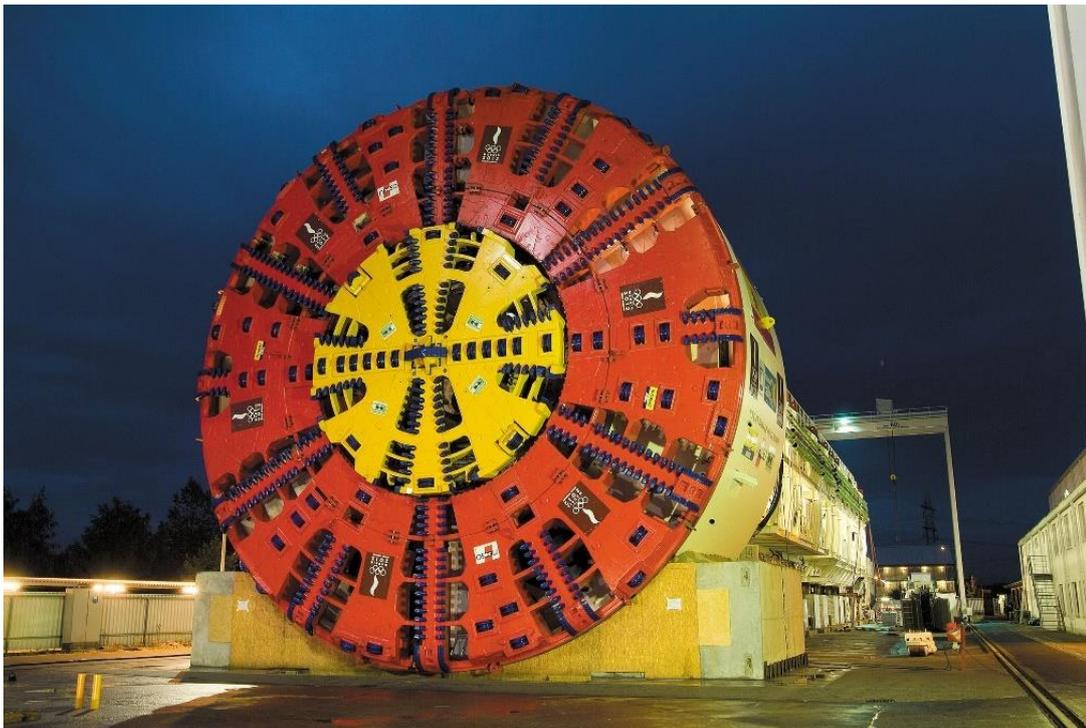


Figura 3-6. Macchina EPBS impiegata per la realizzazione dell'autostrada M-30 a Madrid, costruita da Herrenknecht AG. Immagine di proprietà di Herrenknecht AG

3.2.2 La camera di scavo

Alle spalle della testa fresante, la camera di scavo di una macchina EPBS dev'essere progettata per accogliere il materiale scavato e miscelarlo assieme agli agenti condizionanti aggiunti, in modo da creare un mezzo di supporto caratterizzato dalle proprietà meccaniche adatte a sostenere il fronte. Il dimensionamento di tale spazio dev'essere studiato in modo da consentire al terreno condizionato di essere mantenuto in costante movimento, prevenendo

in questo modo la formazione di zolle dovute ad accumuli statici. Inoltre, il flusso del materiale verso la coclea deve sempre essere garantito con continuità, in modo da permettere il controllo della pressione interna alla camera di scavo. Queste necessità fanno sì che i progettisti debbano tenere in considerazione la posizione della coclea e della camera iperbarica che consente l'accesso agli operai, nonché il tipo di testa di scavo. Come già osservato nel Capitolo 3.2.1, l'apertura della testa fresante è una caratteristica importante da considerare per poter definire le linee di flusso del materiale all'interno della camera in pressione.

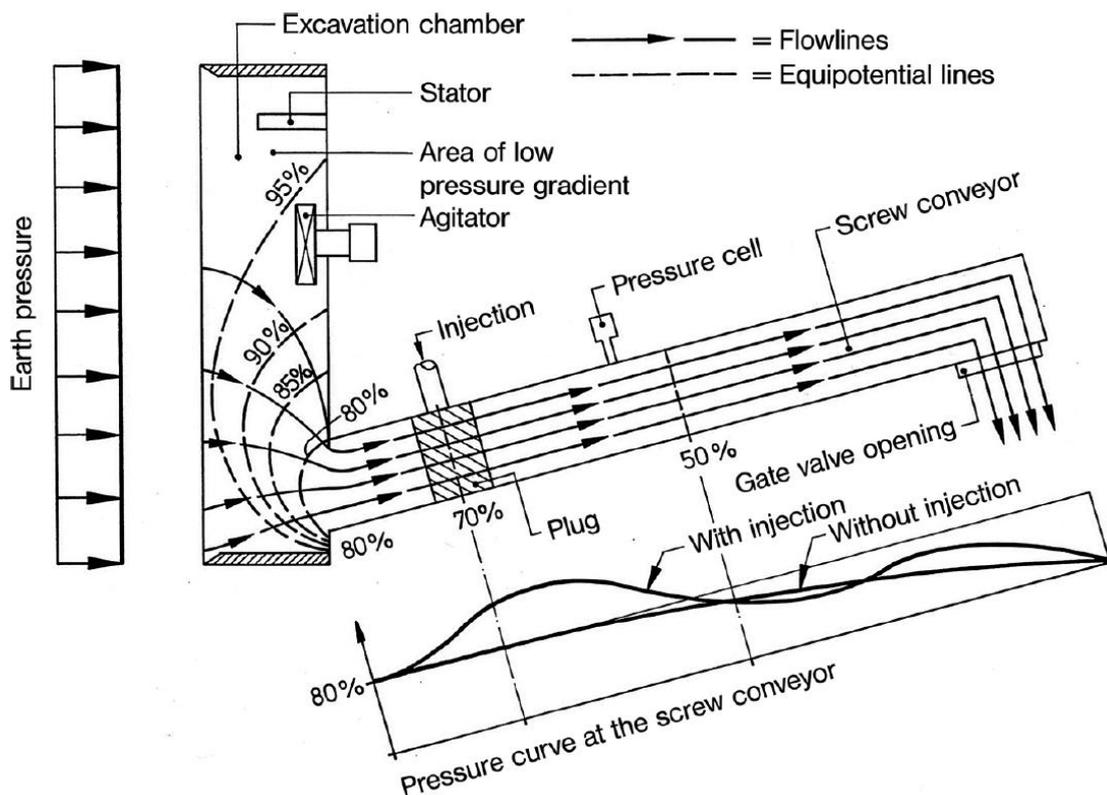


Figura 3-7. Flusso interno alla camera di scavo, dovuto all'azione della coclea [19]

Alla geometria più idonea occorre affiancare la presenza di appendici in grado di movimentare meccanicamente il materiale, favorendone il miscelamento con gli agenti condizionanti e prevenendo la formazione di zolle. Sebbene la presenza dei supporti che connettono la testa di scavo al cuscinetto principale e al motore che le permettono di ruotare sia di aiuto, l'installazione di agitatori e barre miscelatrici sulla parete stagna e sul retro della testa fresante è un'altra caratteristica tipica delle macchine EPBS. In particolare, l'attenzione da riservare al posizionamento di queste parti meccaniche dev'essere tanto maggiore quanto più è elevata la possibilità di un comportamento adesivo del terreno. Generalmente, la zona più critica dove intervenire per evitare l'accumulo statico di materiale è quella prossima all'asse centrale della galleria, dove le velocità tangenziali connesse alla rotazione della testa di scavo sono minori.

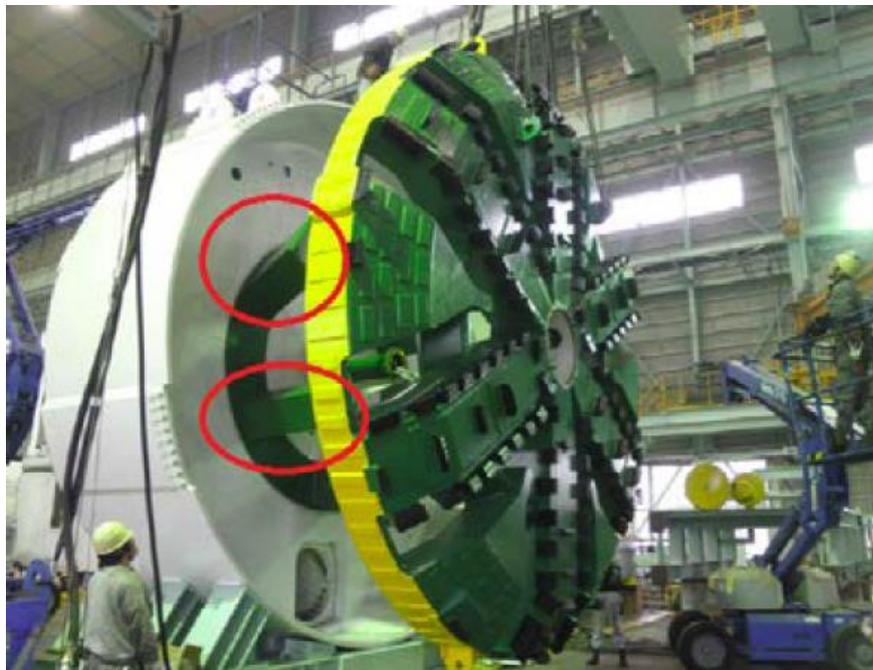


Figura 3-8. Supporti della testa fresante [13]



Figura 3-9. Barre miscelatrici montate sul retro della testa fresante [13]

Anche la posizione dell'accesso alla coclea influenza in modo importante il flusso del terreno condizionato all'interno della camera di scavo, determinando velocità variabili in funzione della distanza da essa. Poiché la zona di raccolta va correttamente situata nella parte inferiore della camera in pressione, permettendo l'utilizzo della macchina anche in modalità aperta o semi-aperta, l'accumulo di materiale in calotta durante le operazioni in modalità chiusa è rischioso, risentendo in maniera ridotta del campo di velocità sviluppato dall'azione della coclea. Risulta sempre più evidente come il costante miscelamento del materiale dentro la camera in pressione sia di fondamentale importanza, assieme all'utilizzo di condizionanti in grado di abbassare l'angolo di attrito interno del terreno e di ridurre l'eventuale adesività.

3.2.3 Il sistema di trasporto a coclea

Per poter controllare la pressione del materiale condizionato e per convogliarlo all'esterno della camera di scavo, le macchine EPBS ricorrono generalmente all'utilizzo di un sistema di trasporto a coclea. Questa scelta progettuale è condizionata dalle proprietà meccaniche modificate del terreno, che, per quanto plastico, nella condizione più comune non è idoneo ad essere trasportato per mezzo di un sistema idraulico. La presenza di questa struttura elicoidale, che si svolge all'interno di un rivestimento cilindrico, è quindi un'altra caratteristica tipica delle TBM-S di tipo *Earth Pressure Balance*, senza la quale questo sistema di supporto del fronte di scavo non potrebbe trovare applicazioni.

L'utilizzo della coclea è di fondamentale importanza soprattutto a causa del ruolo che riveste nel controllare la pressione tra camera di scavo e cantiere, permettendo al materiale trasportato di raggiungere progressivamente la pressione atmosferica. Questo si verifica a causa delle forze resistenti dovute all'attrito che si sviluppa lungo l'intera lunghezza della struttura, che perciò va progettata in funzione delle pressioni maggiori che la macchina si prevede dovrà sostenere. Per poter fare affidamento sullo sviluppo di tale gradiente di pressione occorre che gli spazi interni alla struttura della coclea siano interamente ricolmi di materiale. Tale condizione ha il secondo fine di garantire l'impermeabilizzazione del sistema, potendo riversare su nastro trasportatore il terreno condizionato estratto dalla camera di scavo.

L'azione della coclea e il gradiente di pressione che si sviluppa lungo la sua lunghezza permettono al pilota della macchina EPBS di controllare la spinta generata sul fronte di scavo, modificando la velocità di rotazione della vite. Utilizzando i dati forniti dai sensori di pressione presenti all'interno della camera stagna, è possibile controllare la fuoriuscita di materiale dalla coclea in modo da agire indirettamente sulla pressione alle spalle della testa di scavo. La condizione di equilibrio viene raggiunta quando la portata di materiale estratto

dalla coclea, funzione della sua velocità di rotazione, è equivalente all'avanzamento della macchina, espresso in termini di volume per unità di tempo.

Sebbene esistano due tipi diversi di coclea, adottabili in funzione della dimensione dei blocchi attesi, con diverso sviluppo di attriti interni, la modalità operativa non cambia, così come per il caso di adozione di un sistema a più coclee. Vista la crescente tendenza all'utilizzo di macchine EPBS con diametri di grandi dimensioni, e l'eventualità di scavare sotto l'azione di pressioni elevate, l'installazione di due o più viti si è rivelata essere una soluzione in grado di garantire l'efficace funzionamento del sistema a coclea. Oggi è condizione ormai tipica l'utilizzo di più viti in parallelo in caso di elevate quantità di materiale in entrata all'interno della camera di scavo, situazione legata all'utilizzo di grandi teste fresanti. Per quanto riguarda l'azione a profondità caratterizzate da elevate pressioni, si è soliti adottare un sistema di più coclee in serie, intervenendo cioè sulla lunghezza totale lungo la quale si deve sviluppare il necessario gradiente di pressione.

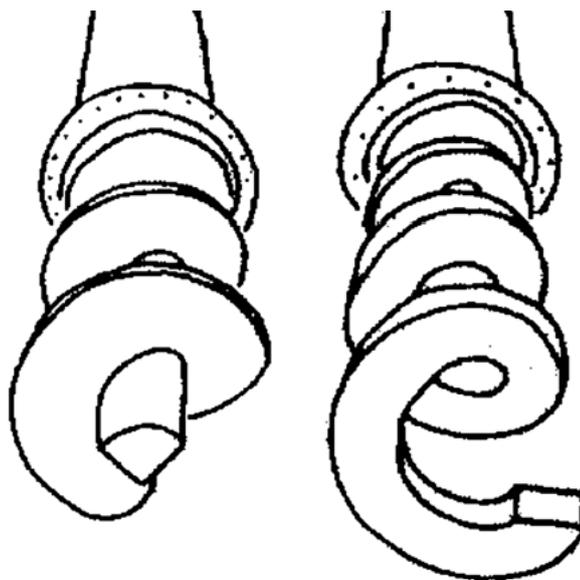


Figura 3-10. Differenti tipologie di coclea: con e senza albero centrale [6]

3.2.4 Lo scudo

Lo scudo metallico che circonda la macchina di scavo ha il compito di limitare la convergenza radiale del terreno e di proteggere le parti meccaniche e gli operai che permettono l'avanzamento della TBM-S. Al di sotto di esso trova spazio anche la costruzione del rivestimento finale della galleria, che avviene utilizzando un sollevatore meccanico per installare dei conci prefabbricati in cemento armato. Questi blocchi sono progettati in modo da incastrarsi nella realizzazione di un anello, che delimita la sezione della galleria: il posizionamento contiguo di questi anelli è studiato in modo da garantire il sostegno e l'impermeabilizzazione del vuoto realizzato, offrendo un supporto per lo sviluppo della forza di avanzamento necessaria. Proprio sull'ultimo anello installato, infatti, trovano appoggio i martinetti di spinta, aventi il compito di far avanzare la testa fresante e tutto il resto della macchina con essa, compresi tutti i servizi situati sulla struttura di supporto che si sviluppa longitudinalmente alla galleria, comunemente identificata come *backup*.

L'avanzamento dello scudo avviene ovviamente contemporaneamente a quello della macchina, essendo vincolato alla sua struttura. Per limitare le forze resistenti che si vengono a sviluppare sulla sua superficie, la forma che lo caratterizza è leggermente conica e non perfettamente cilindrica, in modo da diminuirne la sezione con il progressivo allontanamento dal fronte di scavo. Un'ulteriore agevolazione allo scorrimento si può ottenere con l'iniezione di fango bentonitico, che lubrifica la superficie dello scudo e che, se portato a pressione uguale a quella sviluppata nella camera di scavo, può offrire un certo supporto al vuoto lasciato dal sovrascavo.

Con l'avanzamento dello scudo, gli ultimi anelli installati sotto la sua protezione divengono progressivamente esposti al terreno che circonda la galleria, divenendo garanti del sostegno e dell'impermeabilizzazione del cantiere. Poiché il diametro esterno degli anelli di conci è logicamente inferiore a quello dello scudo, il progredire in avanti di questo lascia alle spalle un vuoto

corrispondente pressoché al suo spessore, che viene colmato con l'iniezione di malte cementizie, la cui composizione dipende dalle condizioni caratteristiche dei singoli progetti. Per evitare infiltrazioni di malta o acqua nello spazio tra scudo e anello di conchi, al fondo dello scudo, sulla parte interna, vengono installate delle "spazzole di coda", anelli di spazzole in ottone posizionati in serie che scorrono sulla superficie dei conchi, affiancati dall'iniezione costante di grasso negli spazi tra l'uno e l'altro. Generalmente, una macchina scudata (non necessariamente di tipo EPB) possiede dai 3 ai 5 anelli di spazzole, in modo da poter contare su almeno due strati di grasso impermeabilizzante.

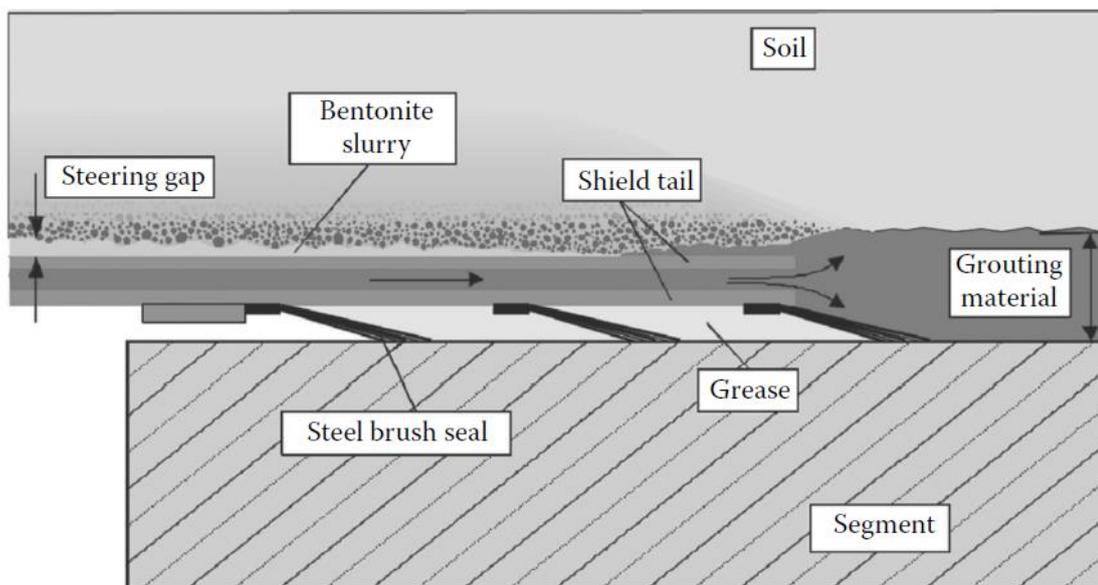


Figura 3-11. Dettaglio relativo alle spazzole di coda e all'iniezione di malta cementizia alle spalle dello scudo [6]

3.3 Utensili da terreno

La complessità legata alla realizzazione di gallerie in formazioni geologiche caratterizzate da proprietà fortemente eterogenee non si ripercuote solamente sulla progettazione della TBM-S più idonea, ma condiziona anche la scelta degli utensili più efficaci con cui equipaggiarne la testa fresante. La presenza di blocchi e trovanti è una caratteristica tipica dei terreni dovuta alla loro origine sedimentaria, e la loro casuale distribuzione all'interno dello strato sciolto obbliga la testa di scavo della macchina ad interfacciarsi contemporaneamente con coesioni diverse. Per questo motivo, è necessario prevedere l'utilizzo di utensili che siano in grado di attaccare efficacemente il materiale sciolto, limitando l'intensità della coppia agente sulla testa di scavo, ma allo stesso modo adatti ad agire su volumi localmente più compatti.

La possibilità di montare utensili a disco, o *cutters*, sulla testa fresante di una macchina EPBS può offrire una soluzione a questa problematica, permettendo allo scavo di avanzare senza rallentamenti attraverso formazioni caratterizzate dalla presenza di materiale coeso. Tuttavia, questo tipo di utensile, progettato prettamente per lo scavo in roccia, non è adatto ad attaccare un materiale con scarsa coesione, essendo del tutto inefficace la loro caratteristica modalità di scavo, comunemente nota come *chipping*. La loro azione in tali situazioni ha pertanto il solo scopo di indebolire il fronte di scavo, e l'intervento vero e proprio di distacco dev'essere effettuato da utensili delineati unicamente per lo scavo in terreno, le cui caratteristiche di forma e applicazioni risultano in continua evoluzione. I diversi autori che hanno affrontato il tema delle frese meccaniche a piena sezione scudate non offrono descrizioni dettagliate relative a ciascuna tipologia di utensile da terreno, e le classificazioni e le nomenclature sono caratterizzate da contorni non ben definiti.

Il motivo di questa limitata caratterizzazione risiede proprio nell'esclusività della progettazione degli utensili da terreno, compiuta in funzione delle caratteristiche geologiche e geotecniche relative a ciascun progetto. Gli stessi autori che non si spingono a definirne precise categorie, o che non concordano sulle diverse denominazioni, sottolineano la necessità di studiare e disegnare gli utensili più idonei in base alle esigenze dei singoli progetti, essendo caratterizzati da situazioni tra di loro solitamente molto diverse. Poiché la definizione di una classificazione universale non è di interesse per questa trattazione, questo Capitolo si limita a considerare le tipologie meglio note, descrivendone in modo generico le principali caratteristiche. Senza dubbio, la particolarità che più di tutte accomuna gli utensili da terreno è quella che permette di definirli come utensili striscianti, al contrario degli utensili a disco per roccia, che ruotano attorno ad un proprio asse.

3.3.1 Utensili utilizzati per indebolire il fronte di scavo

Tra gli utensili da terreno più utilizzati ci sono quelli aventi lo scopo di indebolire il fronte di scavo, permettendo poi ad un'altra tipologia di intervenire per sollevare il materiale e convogliarlo attraverso le aperture della testa fresante. Questi utensili svolgono la stessa funzione di cui potrebbe farsi carico la presenza di eventuali *cutters* durante lo scavo attraverso formazioni scarsamente coese, sebbene la scelta del progettista sia condizionata da vantaggi e svantaggi legati alle proprietà geologiche. Gli utensili a disco, infatti, trovano un impiego più efficace nel caso che il percorso seguito dalla macchina vada ad interessare strati caratterizzati da maggiore coesione, o dalla possibile presenza di blocchi e trovanti, ma sono maggiormente esposti all'adesività del terreno, che potrebbe causare depositi compatti sulla testa di scavo in grado di impedire la rotazione dei *cutters*, aumentandone la velocità di usura.

Al posto degli utensili a disco, che non sempre è possibile montare sulle teste di scavo di macchine scudate, è possibile utilizzare dei *pre-cutters*, utensili striscianti generalmente posizionati con un angolo di attacco di 90° rispetto al fronte di scavo. Le forme che li caratterizzano sono molteplici, dovendosi adattare alle situazioni tipiche dei diversi progetti, tuttavia giocano il ruolo di indebolire la superficie del fronte di scavo, sciogliendo del tutto l'eventuale coesione che la caratterizza, e permettendo in seguito ad altri utensili di effettuare la vera e propria asportazione del materiale. Questi *pre-cutters*, che alcuni autori identificano come *rippers*, o *chisels*, sono ugualmente in grado di attaccare formazioni caratterizzate da una certa coesione, blocchi, o trovanti, ma subiscono un processo di usura più intenso rispetto agli utensili a disco, a causa della loro modalità operativa strisciante.

Assieme ai *pre-cutters*, una testa fresante può essere dotata di utensili in grado di effettuare un sovrascavo, per agevolare l'avanzamento della TBM-S: questi vengono montati sul perimetro esterno della testa fresante, e, qualora fosse necessario variare lo spessore del sovrascavo per agevolare le operazioni di curvatura, possono eventualmente essere installati in modo da poter venire estesi o ritratti. Gli utensili più comunemente adottati in questa configurazione hanno anche lo scopo di diminuire le forze di attrito agenti lateralmente sulla testa di scavo, limitando lo sviluppo della coppia necessaria alla sua rotazione. Tipicamente, le tipologie adottate per questo ruolo sono i *drag picks* a sezione quadrata e gli utensili a guscio, o *shell bits*.

Un utensile che solitamente caratterizza esteticamente la conformazione di una testa fresante per macchina scudata è il *fish-tail bit*, riconoscibile per la sua forma appuntita che ricorda la geometria di una coda di pesce, da cui prende il nome. Le sue dimensioni sono molto maggiori rispetto agli altri utensili, avendo una larghezza variabile tra i 1200 mm e i 1500 mm, e un'altezza compresa tra i 400 mm e i 500 mm. Il *fish-tail bit* viene installato al centro della testa fresante, e il suo compito è quello di effettuare uno scavo più profondo nell'area centrale

della sezione di scavo, in modo da indebolire l'intera area circostante e agevolare il distacco del materiale dal fronte.

3.3.2 Gli *scrapers*

A seguito dell'azione di indebolimento del fronte di scavo, effettuata dagli utensili da terreno brevemente introdotti nel capitolo 3.3.1 o da *cutters*, la raccolta e il convogliamento del materiale viene eseguita da utensili generalmente definiti come *scrapers*. La loro forma e dimensione varia in funzione della geologia e delle case produttrici, ma in tutti i casi si tratta di utensili ad azione strisciante in acciaio rinforzato, generalmente caratterizzati da una o più punte, o lame, carburo di tungsteno. La sua geometria è caratterizzata in particolare da un *rake angle* e da una *clearance angle* (o *back angle*), come indicato in Figura 3-12: questi dettagli verranno utilizzati all'interno di alcuni modelli analitici di previsione descritti nel Capitolo 4. Risulta evidente come questa configurazione, e la sua modalità operativa, rendano l'utensile soggetto ad un intenso processo di usura, ed è questo il motivo per cui gli *scrapers* non vanno impiegati per scavi in formazioni caratterizzate da una resistenza a compressione monoassiale superiore a 60-80 MPa (Bilgin et al. 2012).

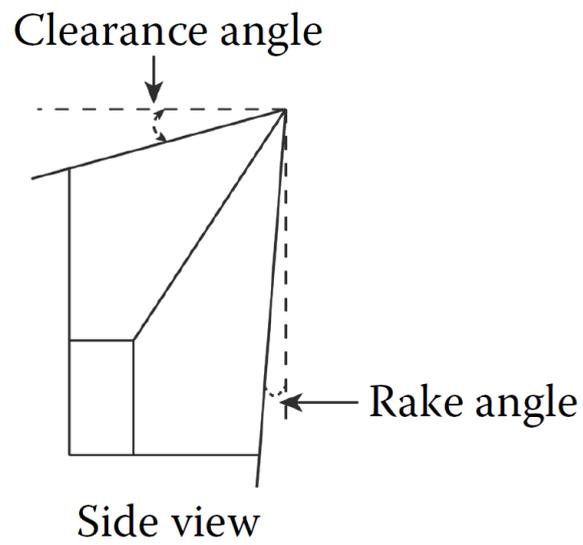


Figura 3-12. Vista in sezione schematica di uno scraper [6]

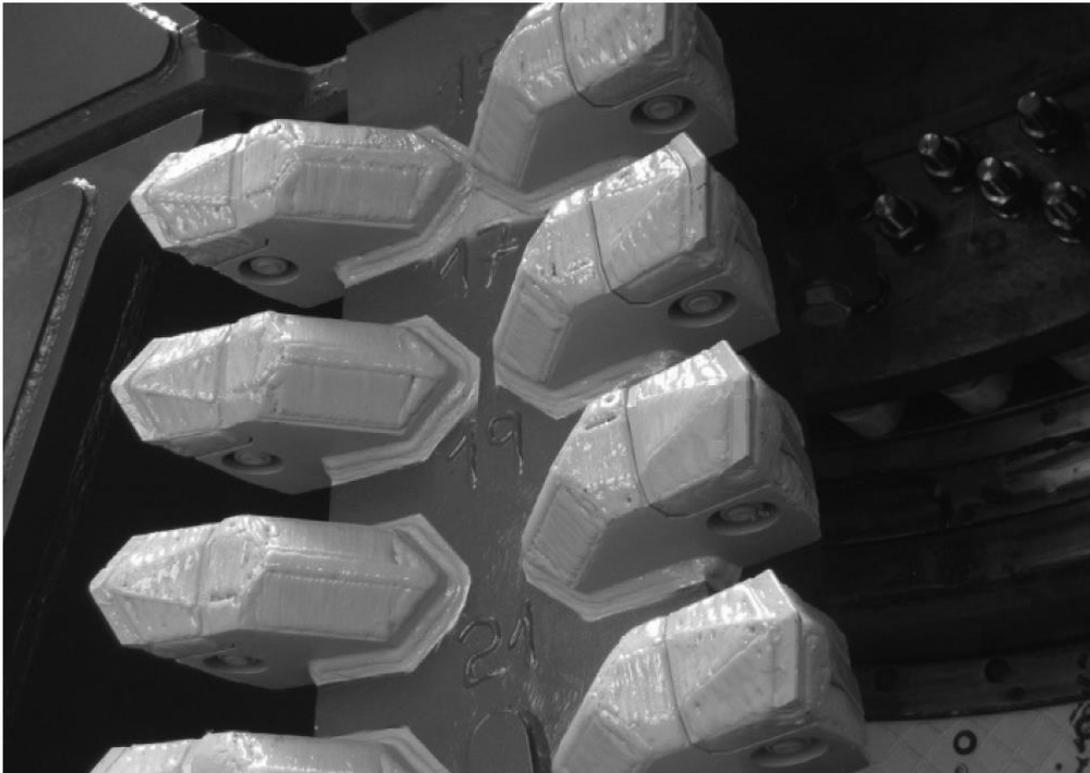


Figura 3-13. Esempio di scrapers montati su testa fresante [19]

Dovendo intervenire a seguito dell'azione di indebolimento del fronte di scavo, questi utensili sono installati generalmente più indietro di 40-50 mm rispetto ai *cutters* o ai *pre-cutters*, in modo da evitare il contatto con volumi di materiale coeso in grado di danneggiarli o accelerarne il processo di usura. Inoltre, per un'efficienza maggiore e un avanzamento più rapido della TBM-S, le traiettorie seguite da questi utensili non devono sovrapporsi a quelle dei *cutters* o dei *pre-cutters*, che devono perciò seguire traiettorie intermedie a quelle degli *scrapers*. Per quanto riguarda la differenza di dimensioni rispetto al *fish-tail bit*, questo utensile centrale risulta generalmente sopravanzare gli *scrapers* di circa 200-300 mm.

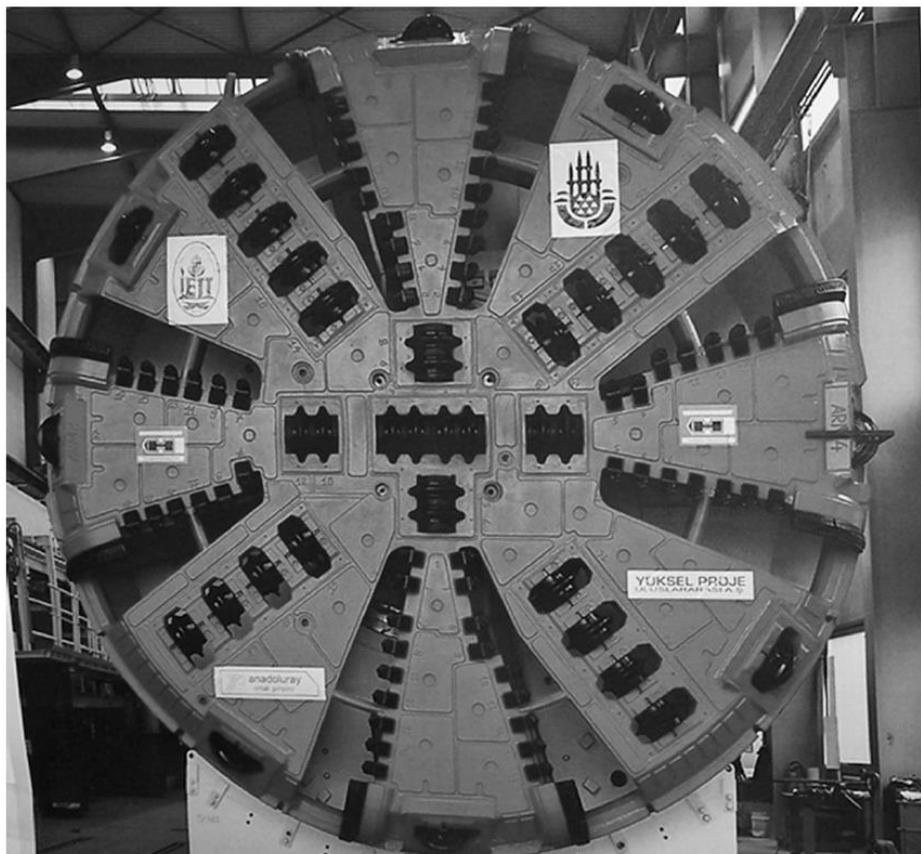


Figura 3-14. Esempio di testa fresante con installati scrapers e utensili a disco [6]

3.4 Principali parametri di scavo per la progettazione di macchine EPBS

Le modalità di avanzamento delle frese meccaniche a piena sezione e la configurazione dei cantieri in sotterraneo per la realizzazione di gallerie, sia in terreno che in roccia, non consentono di riportare la macchina in superficie facendola arretrare. Per questo motivo, l'esigenza di iniziare le attività di scavo con una TBM adatta al loro completamento costringe i progettisti a basare le loro scelte sui parametri di scavo più critici, la cui previsione a favore di sicurezza risulta di fondamentale importanza. Qualora, a scavo in corso, si dovessero incontrare difficoltà impossibili da affrontare con la macchina utilizzata, l'esigenza di modificarne la configurazione per poter procedere con l'avanzamento comporterebbe delle lavorazioni che potrebbero risultare estremamente complicate. Questi interventi di modifica della meccanica e della struttura della TBM comporterebbero un'estensione temporale dei lavori, talvolta difficilmente quantificabile a priori, con il conseguente aumento dei costi di realizzazione dell'opera.

Al pari delle caratteristiche che devono garantire il corretto avanzamento della macchina, anche il tempo di realizzazione dell'opera dev'essere correttamente previsto, poiché, come accennato, la diluizione temporale non prevista delle operazioni si tradurrebbe in costi maggiori, solitamente a carico del costruttore. La sola sicurezza di poter terminare la galleria, quindi, non è sufficiente, ma occorre valutare anche quei parametri in grado di causare rallentamenti imprevisti dell'avanzamento, come, per esempio, interventi di manutenzione anticipati. Nonostante le incertezze legate alla realizzazione di gallerie in terreni siano numerose, accrescendo l'interesse nei confronti dei modelli previsionali in grado di fornire informazioni utili per la progettazione delle TBM scudate più adatte, proprio le complessità dovute alla conformazione geologica di queste formazioni costituiscono un limite difficilmente superabile,

che si traduce in uno scarso numero di trattazioni relative a tale argomento, e spesso incomplete.

3.4.1 Spinta e coppia massima

I parametri di scavo maggiormente studiati per quanto riguarda la progettazione di *Tunnel Boring Machines* sono la spinta e la coppia massima che la macchina dev'essere in grado di fornire. Data l'importanza fondamentale della loro previsione, dalla quale dipende la capacità di ultimare lo scavo della galleria, le trattazioni relative alle macchine EPBS non fanno eccezione. In funzione della geologia attraversata, il percorso intrapreso dalla fresa meccanica durante la realizzazione della galleria è caratterizzato da una o più progressive che richiedono alla macchina una spinta più elevata per poter attaccare il fronte di scavo efficacemente e procedere con l'avanzamento. Garantire l'installazione sulla TBM di una potenza adatta a sviluppare la massima forza che dovrà essere utilizzata per l'avanzamento nei punti più critici è un obbligo da rispettare per ogni progetto. Per farlo, occorre principalmente valutare la spinta necessaria agli utensili per poter attaccare il fronte di scavo, assieme agli attriti che si sviluppano tra scudo e terreno, e alla spinta generata dal materiale in pressione all'interno della camera di scavo.

Così come per la spinta, anche la coppia necessaria per la rotazione della testa fresante è un parametro direttamente connesso alle proprietà geotecniche del terreno attraversato, che, se insufficiente, potrebbe comportare l'impossibilità di avanzare. La necessità di prevedere il suo valore massimo, ovvero quello relativo alle progressive di scavo più critiche, è fondamentale per poter installare la potenza necessaria, ma, allo stesso tempo, occorre verificare che la resistenza alla rotazione offerta dagli attriti tra scudo e terreno sia sufficiente a garantire l'immobilità della macchina stessa. Se ciò non si verificasse durante le attività di scavo, la conseguenza di una interruzione

tardiva delle operazioni risulterebbe nella rotazione della TBM-S attorno all'asse della galleria (Wittke et al., 2007). Quindi, nel caso delle macchine EPBS, il calcolo della coppia massima non va effettuato solo in funzione delle interazioni tra terreno e testa di scavo, ma anche principalmente in funzione degli attriti tra terreno e scudo, e degli attriti tra scudo e terreno condizionato all'interno della camera di scavo.

Vista l'importanza fondamentale di attrezzare la TBM con la potenza necessaria, è evidente come i valori previsti di spinta e torsione racchiudano in sé elevati fattori di sicurezza, imponendo l'installazione di motori e martinetti di spinta più che sufficienti a garantire lo sviluppo delle forze richieste. Il valore di spinta massima, in particolare, viene utilizzato anche per la progettazione strutturale dei conci prefabbricati che vengono installati per formare gli anelli di rivestimenti. Su di essi, infatti, trovano appoggio i cilindri idraulici responsabili dell'avanzamento della macchina, e i conci devono quindi essere in grado di sopportare le tensioni così generate, che saranno le forze più critiche alle quali dovranno eventualmente opporsi.

3.4.2 Velocità di avanzamento

La realizzazione di una galleria non va progettata unicamente in funzione della sua fattibilità tecnica, ma prima di tutto occorre considerarne gli aspetti economici, che possono variare in funzione della durata dei lavori e dei materiali utilizzati, sia in termini di qualità che di quantità. Per effettuare una previsione in grado di fornire informazioni utili sotto tale punto di vista, la valutazione della velocità con cui la fresa meccanica sarà in grado di avanzare assume un'importanza rilevante.

Per avere una visione completa del processo di costruzione della galleria occorre valutare la velocità della macchina almeno su scala giornaliera. Per quanto l'avanzamento istantaneo della macchina possa essere un parametro

importante per comprendere in tempo reale alcune informazioni relative alle prestazioni della TBM, questo dato non risulta utile per valutare le tempistiche complessive di realizzazione dell'opera. La velocità di avanzamento effettiva dev'essere definita anche in funzione delle interruzioni dei lavori dovute ad interventi di manutenzione, programmati o improvvisati, o ad eventi di altra natura, definendo il tempo di utilizzazione della macchina, o MUT (*Machine Utilization Time*).

Il MUT indica la percentuale relativa al tempo effettivo di attività della TBM, in riferimento ad un'unità di tempo che può variare in base alle necessità. Questo parametro viene definito generalmente dai costruttori, sulla base della loro esperienza pregressa in simili lavorazioni, ma è comunque possibile trovare generiche indicazioni in letteratura, in funzione della geologia attraversata. Tuttavia, per poterlo definire con maggiore precisione, la resistenza all'usura degli utensili montati sulla testa fresante è un dettaglio importante da considerare, in funzione dell'abrasività del terreno attraversato.

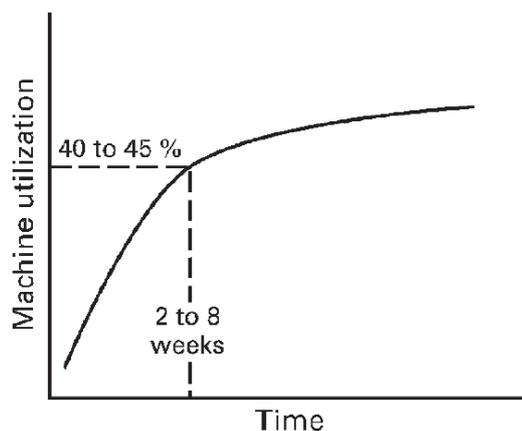


Figura 3-15. Esempio di curva sperimentale per la definizione del tempo di utilizzazione della macchina [25]

Tabella 3-1. Linee guida per stimare a priori il tempo di utilizzazione della macchina (Namli et al. 2013 e 2014) [7]

Stoppage type		Stoppage Duration, % of one day shift time
Adverse ground	Contact zones between geological formations	A few days to 1 week
	Dykes	A few days to 1 week
	Faults	A few days to 2 weeks
	Water	A few days to 1 week
TBM breakdown	New TBM (experienced crew)	2–4%
	New TBM (inexperienced crew)	4–6%
	Refurbished TBM (experienced crew)	4–6%
	Refurbished TBM (inexperienced crew)	6–8%
Cutter replacement	Quartz content of 0–20%	5%
	Quartz content greater than 20%, weak and blocky ground	5–10%
	Quartz content greater than 20%, hard rock	10%
Muck transportation	By train: Transportation distance of 0–3 km	7%
	By train: Transportation distance greater than 3 km	10%
	By belt conveyor: Transportation distance of 0–3 km	5%
	By belt conveyor: Transportation distance greater than 3 km	7%
Maintenance	Experienced contractor and crew	10%
	Moderately experienced contractor and crew	15%
Setting the segments		20–25%
TBM mobilization at stations		2–3 weeks
Other stoppages		10–15%
Machine utilization		22–45%

3.4.3 Penetrazione e velocità di rotazione della testa di scavo

L'avanzamento della TBM è strettamente legato al concetto di penetrazione, che esprime la distanza longitudinale compiuta dalla testa di scavo in funzione del numero di rotazioni effettuato dalla testa fresante. Questo parametro è un indice diretto dell'efficienza con cui gli utensili stanno attaccando il fronte di scavo, legato all'intensità della spinta che la macchina esercita e al numero di utensili. Per quanto riguarda la velocità di rotazione della testa di scavo, è necessario sottolineare come essa possa influire sull'intensità della coppia da applicare, in stretta dipendenza con le caratteristiche del terreno. Alcuni autori definiscono il calcolo della velocità di rotazione massima, in funzione del diametro e della velocità massima con cui il tipo di utensile montato può essere utilizzato, ma non si dà un'indicazione della velocità di rotazione per il pilota della TBM, poiché sta alla sua personale esperienza capire in che modo variare quel parametro per controllare la coppia agente sulla testa di scavo.

3.4.5 Rotazione della coclea

Il sistema di trasporto a coclea è caratteristico delle macchine EPBS, a causa della densità e della plasticità del terreno condizionato utilizzato per opporre una certa pressione di sostegno al fronte. Come precedentemente evidenziato nel Capitolo 3.2.3, l'utilizzo di una vite di Archimede inserita all'interno di un rivestimento cilindrico non ha il solo scopo di trasportare il materiale verso l'esterno della camera in pressione, ma viene anche utilizzata come sistema di controllo proprio della pressione generata con l'utilizzo del terreno condizionato.

Quando la macchina EPBS viene utilizzata in modalità chiusa, la coclea risulta interamente colma di materiale, potendo così essere utilizzata per

ridurre progressivamente la pressione del terreno lungo la sua lunghezza, permettendo lo scaricamento su nastro trasportatore a pressione atmosferica. In questa condizione, è possibile regolare il volume di materiale estratto dalla camera di scavo intervenendo sulla velocità di rotazione della vite. Capire con quale intensità sarà necessario agire sulla coclea durante le varie fasi di scavo è un passaggio fondamentale per poter installare sulla macchina motori con la potenza necessaria, in modo da poter intervenire con la rapidità dovuta qualora occorresse effettuare delle variazioni di pressione sul fronte di scavo.

3.4.6 Energia specifica

Con il termine energia specifica si identifica la potenza necessaria alla macchina per scavare un'unità di volume di materiale. Questo parametro può essere utilizzato per valutare le prestazioni di diverse macchine, ponendole a confronto tra loro. La sola valutazione dei generici parametri operativi (quali spinta, coppia, avanzamento, ecc. ...) non permette di confrontare l'operato di diverse macchine tra loro, poiché, anche in riferimento alla stessa TBM, i valori risultanti a seguito dello scavo risulterebbero diversi in funzione della geologia attraversata. L'utilità dell'energia specifica, tuttavia, non è limitata alla sola valutazione delle prestazioni tra lavori diversi, ma, secondo diversi autori tra cui Bilgin et al. (2016), la sua previsione può essere utilizzata al fine di valutare la produttività netta della macchina utilizzata.

4. Modelli analitici di previsione per macchine EPBS in terreni

Lo scopo di questa tesi è la realizzazione di un programma di calcolo previsionale per macchine EPBS in terreni, attraverso l'implementazione di formulazioni analitiche relative ai principali parametri di scavo. La prima fase di lavoro ha riguardato l'individuazione delle formule presenti in letteratura tecnica, con l'obiettivo di provare ad unirle e mediane i risultati in modo da ottenerne valori il più possibile fedeli a quelli reali. Nonostante l'interesse generale nei confronti di questo argomento, la ricerca ha rivelato la scarsità di informazioni adatte allo scopo, comprovando le difficoltà di previsione legate alle operazioni di scavo attraverso terreni. Questa interpretazione viene giustificata anche dalla quantità nettamente superiore di modelli previsionali analitici relativi all'utilizzo di TBM per lo scavo in roccia, essendo questo un ambito segnato da maggiore esperienza collettiva, nonché da una migliore possibilità di esecuzione in laboratorio di prove significative, che portano spesso a risultati applicabili alla scala dimensionale della TBM.

La ricerca di formulazioni riferite all'uso di EPBS in terreni più o meno sciolti ha portato unicamente all'individuazione di modelli analitici relativi a singoli parametri operativi e progettuali, e diversi autori sottolineano come sia estremamente complesso il tentativo di ottenere una previsione completa di tutti i parametri di scavo. I modelli individuati, descritti nel seguito di questo Capitolo, sono caratterizzati da diversi gradi di complessità, essendo alcuni basati su dati empirici, altri su formulazioni più complesse, caratterizzate dall'obiettivo di fornire risultati in funzione della progressiva di scavo considerata. Per poterne ricavare un unico flusso di calcolo, quindi, è necessario

valutare queste formulazioni in modo dettagliato, comprendendole nel loro significato fisico, e potendo stabilire in tal modo come procedere per la loro implementazione all'interno del programma.

Nella trattazione seguente, i modelli descritti vengono presentati nella loro versione originale. Occorre aggiungere che essi vengono identificati in riferimento agli autori e all'anno della pubblicazione consultata, che non necessariamente corrisponde a quello della prima pubblicazione del modello. Per i casi in cui le formulazioni sono recuperate da citazioni di altri autori, la data indicata è quella che viene fornita all'interno delle trattazioni in cui tali citazioni appaiono. Questa nomenclatura è coerente con quella utilizzata nel codice informatico del programma di calcolo, scelta convenzionalmente per comodità.

4.1 Modelli di previsione per la spinta

I modelli analitici di previsione per la spinta ritrovati sono, assieme a quelli per la coppia, i più numerosi tra quelli che è stato possibile reperire in letteratura tecnica. Alcuni di queste formulazioni si basano unicamente sull'esperienza relativa a scavi di gallerie eseguiti in passato, spesso fornendo una gamma di valori all'interno della quale è probabile che si debba ricercare il valore massimo di spinta, che la macchina dovrà essere in grado di fornire per l'avanzamento. Altri modelli derivano da una trattazione teorica dettagliata, con l'ambizione di poter individuare la forza che i cilindri idraulici dovranno sviluppare relativamente a ciascuna progressiva di scavo considerata.

Le formule raccolte per la previsione della spinta massima, o della spinta relativa ad una determinata sezione, sono in tutto 9, aventi datazioni comprese tra il 1969 e il 2013. Il valore di spinta ottenuto dalle formulazioni individuate viene espresso in kN.

4.1.1 Ates et al. (2013), in funzione del diametro di scavo

La formulazione pubblicata da Ates et al. nel 2013 si basa su di uno studio statistico, condotto per verificare l'esistenza di una correlazione tra il diametro delle macchine TBM e alcuni parametri di scavo e strutturali, utilizzando un *database* di dati storici a loro disposizione. In riferimento alle macchine EPBS, per riscontrare eventuali correlazioni statistiche tra il diametro e la spinta installata, sono stati utilizzati i dati relativi a 86 macchine, con diametro non inferiore ai 4 m.

I dati storici utilizzati da Ates et al. (2013) sono relativi a TBM realizzate dopo il 1985, impiegate in differenti aree del mondo. Questo ha permesso di basare lo studio su macchine caratterizzate da tecnologie all'avanguardia, per non rischiare di ottenere risultati obsoleti e privi di interesse. La formulazione pubblicata è stata ottenuta scegliendo la funzione in grado di approssimare la curva di dati statistici nel modo migliore, ovvero quella caratterizzata dal più alto valore del coefficiente di determinazione R^2 . La spinta viene calcolata in funzione solamente del diametro della testa di scavo, d (m).

$$F \text{ (kN)} = 8972,6 \cdot e^{0,2208 \cdot d} \tag{1}$$
$$R^2 = 0,79$$

Secondo gli autori, una correlazione caratterizzata da un R^2 superiore a 0.70 può essere considerata significativa. Tuttavia, visti i risultati relativi ad altri tipi di TBM (Grafico 4-1), il legame tra diametro della testa di scavo e spinta viene ritenuto debole, suggerendo come per la determinazione corretta di questo parametro non si possano trascurare gli aspetti geotecnici tipici di ciascun progetto considerato. Questo perché la spinta dipende in particolare dalla

pressione orizzontale del terreno e dell'eventuale falda acquifera, oltre alle forze di attrito generate dal contatto tra scudo e terreno.

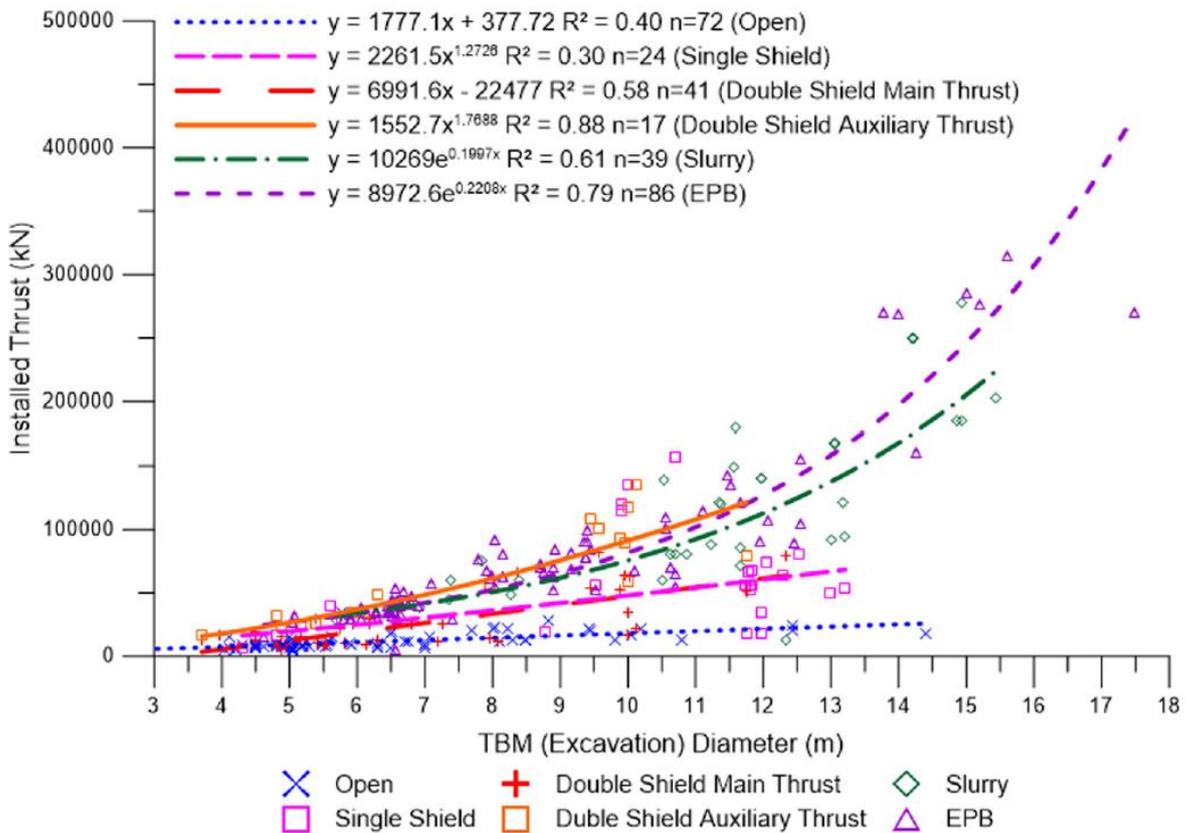


Grafico 4-1. Relazione tra diametro di scavo e capacità di spinta installata su differenti tipi di TBM [4]

4.1.2 Krause (1987)

Il modello presentato da Krause nel 1987 fornisce una previsione della spinta massima che una macchina EPBS dev'essere in grado di sviluppare, unicamente in funzione del diametro della testa di scavo, d (m). La formulazione pubblicata è stata individuata empiricamente, valutando

l'operato di 659 TBM-S, di cui circa 250 di tipo EPB. Il risultato ottenuto indica l'esistenza di diverse soluzioni, che Krause comprende in un intervallo di valori definiti tramite un coefficiente empirico, β , che per le macchine EPBS varia tra i valori 500 e 1200.

$$F (kN) = \beta \cdot d^2 \quad (2)$$

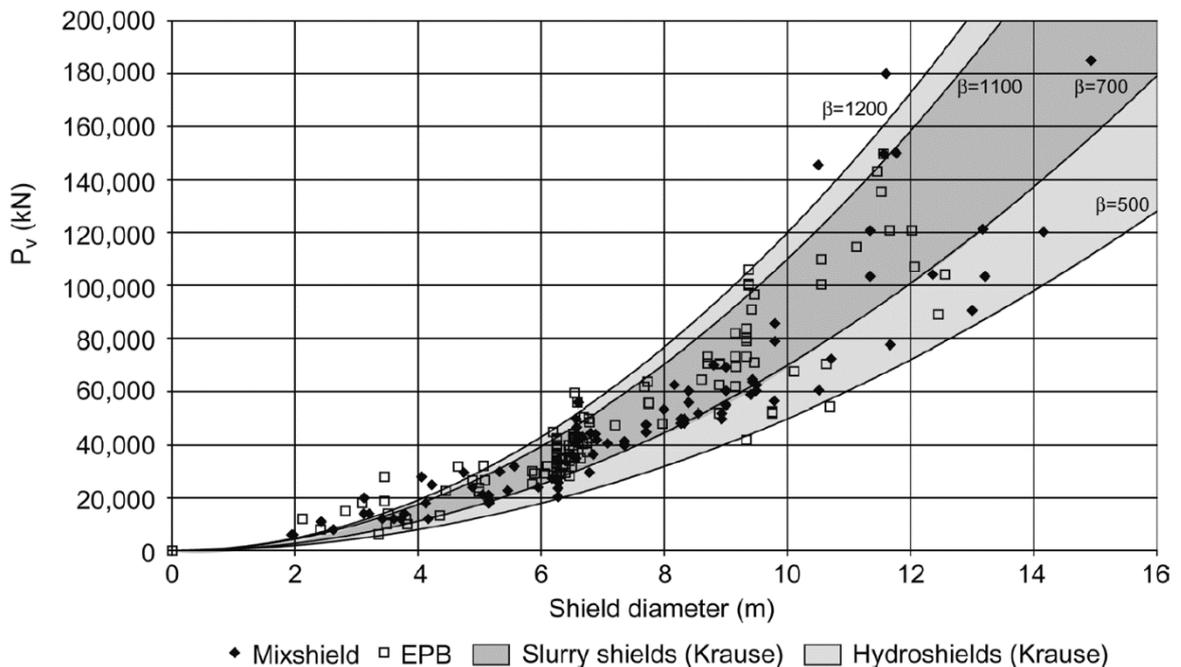


Grafico 4-2. Relazione empirica tra diametro di scavo e capacità di spinta massima installata su diversi tipi di TBM-S [19]

Come già compreso nella trattazione del modello di Ates et al. (2013), questa forte variabilità di risultati relativi allo stesso diametro prova la necessità di valutare la previsione della spinta in funzione dei parametri geotecnici, in riferimento a ciascun progetto considerato. Nonostante la scarsa precisione di

questo modello, è possibile pensare di utilizzarlo per verificare la probabile veridicità dei risultati ottenibili tramite formulazioni più complete.

4.1.3 Szechy (1969)

Nel 1969, Szechy ha pubblicato un modello di previsione basato su dati statistici, anch'esso in funzione del solo diametro di scavo. Al contrario di Krause (1987), questo autore non propone una gamma all'interno della quale poter pensare di individuare la spinta massima, ma offre un unico risultato, per quanto approssimato. Il modello propone di valutare la forza massima che i martinetti di spinta devono essere in grado di applicare come 600 kN per ogni metro quadro di superficie frontale della testa di scavo, in relazione al suo diametro, d (m).

$$F \text{ (kN)} = \alpha \cdot \pi \cdot \frac{d^2}{4} \tag{3}$$
$$\alpha = 600 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$$

4.1.4 Wittke et al. (2007)

Nella pubblicazione del 2007 di Wittke et al., viene presentato un modello per il calcolo della spinta relativa all'uso di una TBM-S. Tale trattazione presenta una formulazione non derivata da uno studio empirico, ma ottenuta sulla base di uno studio puramente meccanico, avendo identificato le principali componenti della forza di spinta che la macchina dev'essere in grado di sviluppare. È bene osservare che la pubblicazione di Wittke et al. (2007) fa riferimento all'utilizzo di macchine scudate in particolare per scavi in roccia

molto fratturata, fornendo tuttavia formule che ritrovano un'applicabilità concettualmente significativa in terreni.

Il modello presentato considera le diverse forze agenti su di una macchina scudata, parallelamente all'asse della galleria, suggerendo di aggiungere il contributo di un fattore di sicurezza, tenendo conto dell'effetto di forze di minore intensità, ma che sono comunque in grado di influenzare il risultato. Le principali componenti della spinta totale sono la forza esercitata dagli utensili perpendicolarmente al fronte di scavo, F_u , la forza generata dagli attriti tra scudo e terreno, F_a , e la forza di spinta applicata sul fronte di scavo, F_S , generata con il sistema EPB per bilanciare la spinta del terreno e, eventualmente, dell'acqua. Il calcolo esplicito di queste componenti viene indicato in seguito.

$$F_u (kN) = n \cdot U_{load} \quad (4)$$

$$F_S (kN) = S \cdot \pi \cdot \frac{D^2}{4} \quad (5)$$

$$F_a (kN) = \mu_s \cdot \sigma_{rad} \cdot \pi \cdot D \cdot L_s \quad (6)$$

Essendo n il numero di utensili, $U_{load} (kN)$ la forza normale al fronte relativa al singolo utensile, $S (kPa)$ la spinta applicata sul fronte di scavo, $d (m)$ il diametro della testa fresante, μ_s il coefficiente di attrito tra scudo e terreno, $\sigma_{rad} (kPa)$ la tensione radiale media agente normalmente alla superficie dello scudo, $L_s (m)$ la lunghezza dello scudo.

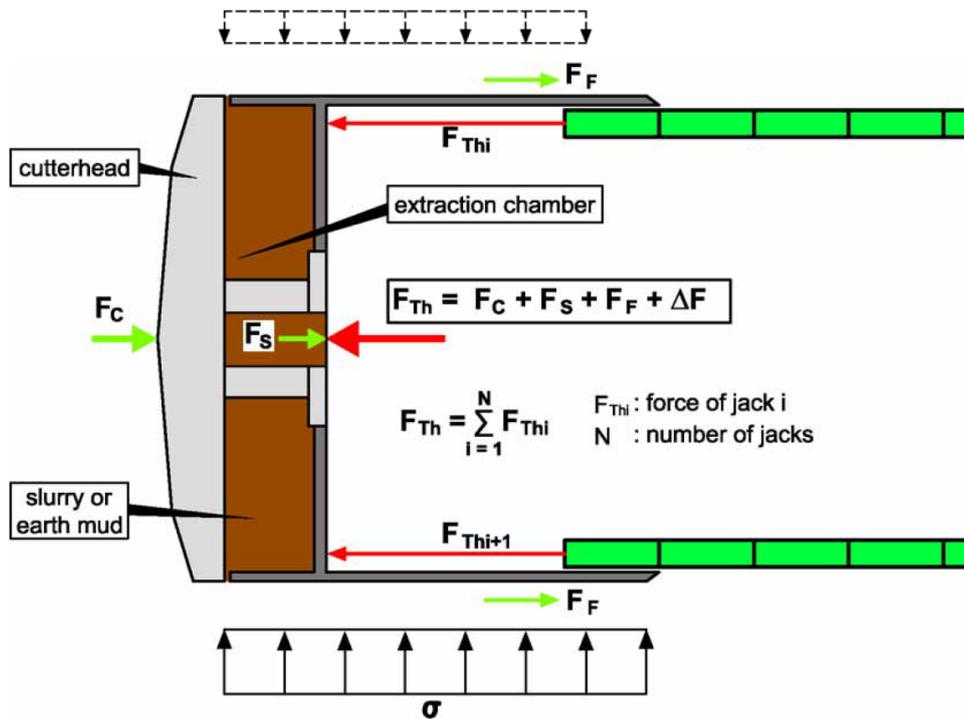


Figura 4-1. Componenti per la spinta esercitata da una TBM-S [28]

La spinta totale, F , si ottiene dalla sommatoria di queste componenti, più il valore aggiunto di un fattore di sicurezza, ΔFS , espresso in kN. Sebbene non specificato dagli autori, il valore di tale fattore dovrebbe tener conto delle forze restanti, quali, per esempio, forze di attrito opposte al trascinamento del *backup* della TBM, forze normali allo scudo generate localmente in fase di curvatura, forze di attrito tra superficie esterna degli anelli di rivestimento e spazzole di coda.

$$F \text{ (kN)} = F_u + F_s + F_a + \Delta FS \quad (7)$$

Questo modello, a differenza di quelli descritti in precedenza, considera gli aspetti geotecnici relativi al singolo progetto per cui è necessario procedere con la previsione, potendo valutare la spinta da applicare per ciascuna progressiva

di scavo. Tale possibilità rende la previsione più interessante, poiché non solo sarebbe in grado di definire la massima spinta attesa, ma potrebbe fornire in anticipo indicazioni utili al pilota della TBM.

4.1.5 JSCE (2007)

Le raccomandazioni del 2007 della *Japan Society of Civil Engineers* (JCSE), relativamente allo scavo di gallerie con TBM scudate in terreni, propongono una metodologia di calcolo della spinta teorica, basata su di uno studio meccanico delle forze parallele all'asse della galleria che si oppongono all'avanzamento della macchina. A differenza di Wittke et al. (2007), questa formulazione fa chiaro riferimento a formazioni geologiche di origine sedimentaria e superficiali, in particolare distinguendo lo scavo in formazioni argillose e lo scavo in formazioni sabbiose. In funzione della granulometria, quindi, questo modello offre soluzioni dal valore potenzialmente diverso.

Le principali componenti della spinta considerate sono la forza generata dagli attriti tra superficie dello scudo e terreno, $F_{a,s}$ per formazione sabbiosa o $F_{a,c}$ per formazione argillosa, la forza applicata sul fronte di scavo con il sistema EPB, F_S , la forza normale alla superficie dello scudo generata localmente in fase di curvatura, F_C , la forza di attrito generata tra la superficie esterna degli anelli di rivestimento e le spazzole di coda, F_{s-c} , e la forza resistente dovuta al trascinarsi del backup della macchina, F_{bu} . Il calcolo specifico di queste componenti viene indicato in seguito.

$$F_{a,s} = \mu_s \cdot (\pi \cdot d \cdot L_s \cdot \sigma_{rad} + W_m) \quad (8)$$

$$F_{a,c} = c_{ad} \cdot \pi \cdot d \cdot L_s \quad (9)$$

$$F_S = S \cdot \pi \cdot \frac{d^2}{4} \quad (10)$$

$$F_C = \mu_s \cdot d \cdot \frac{L_s}{2} \cdot \frac{P_{curv}}{2} \quad (11)$$

$$F_{S-c} = \mu_{s-c} \cdot \pi \cdot L_{s-c} \cdot d_r \cdot \sigma_{rad} \quad (12)$$

$$F_{bu} = \mu_{bu} \cdot W_{bu} \quad (13)$$

Essendo μ_s il coefficiente di attrito tra scudo e terreno, d (m) il diametro della testa fresante, L_s (m) la lunghezza dello scudo, σ_{rad} (kPa) la tensione radiale media agente normalmente alla superficie dello scudo, W_m (kN) il peso della macchina in corrispondenza dello scudo (compresa la testa di scavo), c_{ad} (kPa) l'adesione tra argilla e metallo, S (kPa) la spinta applicata sul fronte di scavo, P_{curv} (kPa) la pressione che si sviluppa localmente in fase di curvatura, μ_{s-c} il coefficiente di attrito tra superficie del rivestimento e spazzole di coda (suggerito pari a 0.2 - 0.3), L_{s-c} (m) la lunghezza di contatto tra rivestimento e spazzole di coda, d_r (m) il diametro esterno dell'anello di rivestimento, μ_{bu} il coefficiente di attrito tra *backup* e rotaie, e W_{bu} (kN) il peso del *backup*.

La spinta totale viene calcolata sommando tutte le componenti indicate, scegliendo tra $F_{a,s}$ e $F_{a,c}$ in funzione del valore di coesione relativo alla formazione considerata. In caso di coesione nulla, il modello viene applicato associando il terreno ad una granulometria prevalentemente sabbiosa, restituendo la spinta totale $F_{t,s}$. In caso contrario, si considera una prevalenza di materiale argilloso, restituendo la spinta complessiva $F_{t,c}$.

$$F_{t,s} \text{ (kN)} = F_{a,s} + F_S + F_C + F_{S-c} + F_{bu} \quad (14)$$

$$F_{t,c} (kN) = F_{a,c} + F_S + F_C + F_{s-c} + F_{bu} \quad (15)$$

Secondo il commento di Ates et al. (2013) relativo a questo modello, le componenti della spinta totale più significative sono solamente 3: la forza generata dagli attriti tra superficie dello scudo e terreno, la forza applicata sul fronte di scavo con il sistema EPB, e la forza normale alla superficie dello scudo generata localmente in fase di curvatura. Alle forze considerate di minore intensità viene sostituito un fattore di sicurezza empirico.

4.1.6 Maidl et al. (2012)

La formulazione presentata da Maidl et al. nel 2012 viene basata sullo studio teorico delle spinte dovute alle tensioni sviluppate dal peso proprio del terreno e dall'eventuale falda acquifera. Le interazioni tra queste forze e la macchina di scavo EPBS vengono studiate da un punto di vista meccanico, similmente ai modelli di Wittke et al. (2007) e JSCE (2007). All'interno della pubblicazione di riferimento vengono rappresentati dei modelli geostatici dei carichi applicati, in corrispondenza del vuoto realizzato dalla TBM-S, in particolare laddove sorretto dalla presenza dello scudo. In questo modo viene reso esplicito il calcolo delle tensioni agenti perpendicolarmente alla superficie di rivestimento a protezione del cantiere.

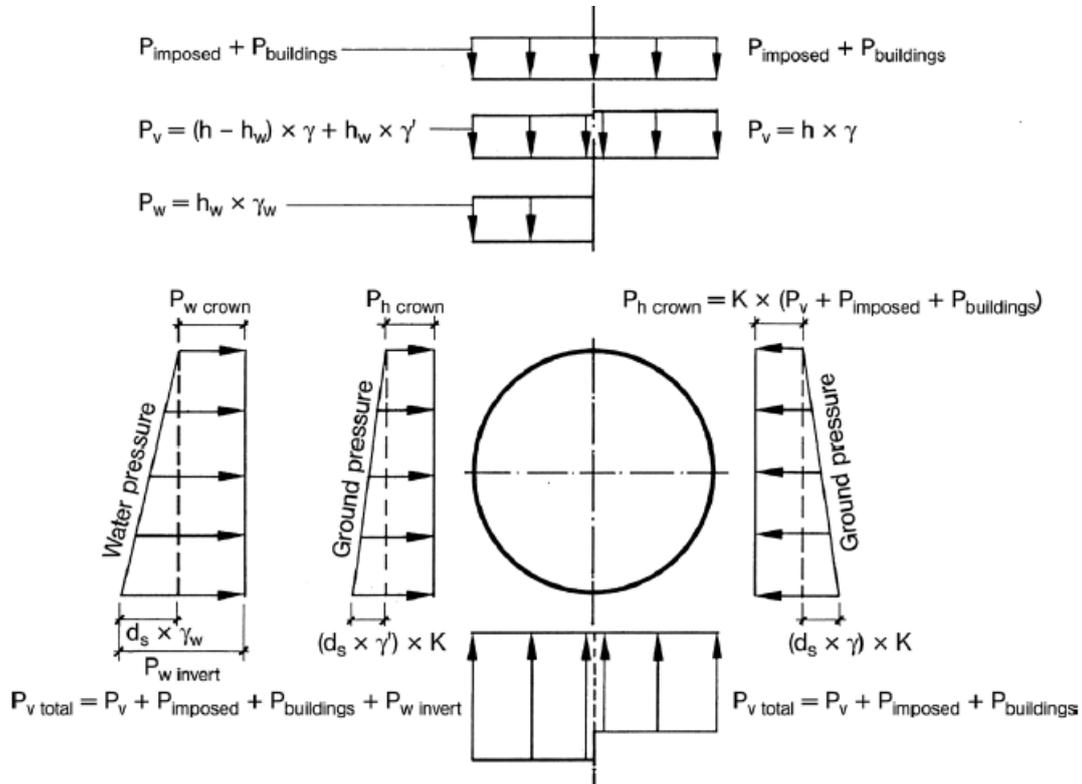


Figura 4-2. Modello per la valutazione delle tensioni radiali agenti sullo scudo di una TBM-S [19]

Secondo la formulazione in questione, le principali forze da considerare sono la forza generata dagli attriti tra scudo e terreno, F_a , la forza esercitata dagli utensili perpendicolarmente al fronte di scavo, F_u , la forza applicata sul fronte di scavo con il sistema EPB, F_S , e la forza di penetrazione necessaria alla lama dello scudo per l'avanzamento, F_p . Il calcolo esplicito di queste componenti viene indicato in seguito.

$$F_a (kN) = \mu_s \cdot [\pi \cdot d \cdot L_s \cdot (P_v + P_h) \cdot 0.5 + W_m] \quad (16)$$

con:

$$P_v = (h - h_w) \cdot \gamma + h_w \cdot \gamma_{sat}$$

$$P_{v_ges} = P_v + P_b + P_{plus}$$

$$P_h = k_0 \cdot P_{v_ges}$$

$$F_u (kN) = n \cdot A_U \cdot P_{v_ges} \cdot k \quad (17)$$

$$F_S (kN) = \pi \cdot \frac{d^2}{4} \cdot (S_c + S_{ar}) \cdot 0.5 \quad (18)$$

$$F_p = \pi \cdot d \cdot Peak \cdot t \quad (19)$$

Essendo μ_s il coefficiente di attrito tra scudo e terreno, d (m) il diametro della testa fresante, L_s (m) la lunghezza dello scudo, W_m (kN) il peso della macchina in corrispondenza dello scudo (compresa la testa di scavo), h (m) lo spessore del deposito rispetto alla sommità della galleria, h_w (m) l'altezza della superficie piezometrica rispetto alla sommità della galleria, γ (kN/m³) il peso specifico del terreno, γ_{sat} (kN/m³) il peso specifico del terreno saturo, P_b (kPa) il peso degli edifici sovrastanti la sezione considerata, P_{plus} (kPa) i carichi verticali applicati, k_0 coefficiente di spinta del terreno a riposo, n il numero di utensili, A_u (m²) area di contatto tra fronte di scavo e singolo utensile, k il coefficiente di spinta laterale, S_c (kPa) la pressione in camera di scavo a quota calotta, S_{ar} (kPa) la pressione in camera di scavo a quota arco

rovescio, $Peak$ (kPa) la resistenza di picco del terreno, e t (m) lo spessore della lama dello scudo.

Il calcolo della spinta totale viene effettuato sommando tutte le componenti precedentemente definite, con l'aggiunta di un fattore di sicurezza empirico, ΔFS (espresso in kN), al quale gli autori danno il compito di approssimare il contributo dovuto a:

- forza necessaria al trascinamento del backup
- forze di attrito generate tra superficie esterna degli anelli di rivestimento e spazzole di coda
- aumento della resistenza alla penetrazione dello scudo per la presenza di ostacoli
- aumento delle forze resistenti all'avanzamento durante l'attraversamento di zone cementate
- aumento delle forze resistenti dovute al rigonfiamento del terreno circostante la macchina
- forza normale alla superficie dello scudo generata localmente in fase di curvatura

$$F (kN) = F_a + F_u + F_S + F_p + \Delta FS \quad (20)$$

Maidl et al. (2012) sottolineano come la forza di penetrazione F_p possa essere trascurata, qualora la testa di scavo venga dotata di utensili per un sovrascavo sufficiente a facilitare l'avanzamento dello scudo. Questa configurazione permetterebbe ugualmente di trascurare l'effetto delle forze sviluppate localmente in fase di curvatura, evitando alla parte terminale dello scudo di doversi fare spazio comprimendo il terreno.

4.1.7 Wang et al. (2012)

Sempre nel 2012, Wang et al. pubblicano un modello per la previsione della spinta, relativo a macchine EPBS in terreni, sviluppato sulla base di considerazioni teoriche e discusso sulla base di risultati ottenuti in laboratorio. La formula presentata è caratterizzata da un maggiore dettaglio rispetto a quelle descritte in precedenza, e offre due diversi risultati, in funzione della granulometria della formazione coinvolta dallo scavo. Al pari del lavoro di altri autori, questo modello deriva dall'analisi separata delle principali componenti che, secondo Wang et al. (2012), influenzano l'intensità della spinta totale richiesta alla TBM-S per ciascuna progressiva considerata.

Le forze alle quali viene attribuita la maggiore rilevanza sono la spinta del terreno, F_t , la forza generata dagli attriti tra scudo e terreno, $F_{a,s}$ per formazione sabbiosa o $F_{a,c}$ per formazione argillosa, la forza di penetrazione necessaria alla lama dello scudo per l'avanzamento, F_p , la forza di attrito generata tra la superficie esterna degli anelli di rivestimento e le spazzole di coda, F_{s-c} , e la forza resistente dovuta al trascinarsi del backup della macchina, F_{bu} . Il calcolo esplicito di queste componenti viene indicato in seguito.

$$F_t \text{ (kN)} = \frac{\pi \cdot d^2}{4} [(\gamma_w \cdot H_w + k_a \cdot \gamma \cdot H + k_a \cdot P_{plus}) \cdot (1 - \eta) + S \cdot \eta] \quad (21)$$

$$F_{a,s} \text{ (kN)} = \mu_s \cdot \left[\pi \cdot d \cdot L_s \cdot \frac{(\gamma \cdot H + \gamma \cdot k_a \cdot H)}{2} - \frac{L_s \cdot d^2 \cdot (2\gamma + \gamma \cdot k_a)}{3} \right] + \mu_s \cdot W_m \quad (22)$$

$$F_{a,c} (kN) = \pi \cdot d \cdot L_s \cdot c \quad (23)$$

$$F_p (kN) = \pi \cdot d \cdot Peak \cdot t \quad (24)$$

$$F_{s-c} (kN) = n_b \cdot W_r \cdot \mu_{b-r} \quad (25)$$

$$F_{bu} (kN) = \mu_{bu} \cdot W_{bu} \quad (26)$$

Essendo d (m) il diametro della testa fresante, γ_w (kN/m^3) il peso specifico dell'acqua, H_w (m) l'altezza della superficie piezometrica rispetto all'asse della galleria, k_a il coefficiente di spinta attiva del terreno, γ (kN/m^3) il peso specifico del terreno, H (m) lo spessore del deposito rispetto all'asse della galleria, P_{plus} (kPa) i carichi verticali applicati, η il coefficiente di apertura della testa fresante, S (kPa) la pressione generata in camera di scavo, μ_s il coefficiente di attrito tra scudo e terreno, L_s (m) la lunghezza dello scudo, W_m (kN) il peso della macchina in corrispondenza dello scudo (compresa la testa di scavo), c (kPa) la coesione della formazione attraversata, $Peak$ (kPa) la resistenza di picco del terreno, t (m) lo spessore della lama dello scudo, n_b il numero di file di spazzole di coda, W_r (kN) il peso di un singolo anello di rivestimento, μ_{b-r} il coefficiente di attrito tra superficie esterna del rivestimento e spazzole di coda, μ_{bu} il coefficiente di attrito tra *backup* e rotaie, e W_{bu} (kN) il peso del *backup*.

Al fine di ottenere una formulazione per la spinta totale di struttura simile a quella presentata da Szechy nel 1969, Wang et al. (2012) presentano una formula per il calcolo della spinta totale che mette in risalto il diametro della testa di scavo: l'espressione così scritta è equivalente alla sommatoria delle componenti precedentemente definite. Considerando la granulometria della

formazione attraversata, il modello restituisce una spinta complessiva $F_{t,s}$ qualora la prevalenza di materiale ghiaioso e sabbioso rendesse nulla la coesione, mentre una spinta complessiva $F_{t,c}$ nel caso di coesione non nulla, dovuta alla grande presenza di materiale fine.

$$F_{t,s} \text{ (kN)} = k_{1,s} \cdot d^2 + k_{2,s} \cdot d + k_{3,s} \quad (27)$$

con:

$$k_{1,s} = \frac{\pi}{4} [(k_a \cdot \gamma \cdot H + k_a \cdot P_{plus} + \gamma_w \cdot H_w) \cdot (1 - \eta) + S \cdot \eta] - \frac{1}{3} \cdot \mu_s \cdot \gamma \cdot L_s \cdot (2 + k_a)$$

$$k_{2,s} = \frac{\pi}{2} \cdot \mu_s \cdot \gamma \cdot (1 + k_a) \cdot H \cdot L_s$$

$$k_{3,s} = \mu_s \cdot W_m + n_b \cdot W_r \cdot \mu_{b-r} + \mu_{bu} \cdot W_{bu}$$

$$F_{t,c} \text{ (kN)} = k_{1,c} \cdot d^2 + k_{2,c} \cdot d + k_{3,c} \quad (28)$$

con:

$$k_{1,c} = \frac{\pi}{4} [(k_a \gamma \cdot H + k_a \cdot P_{plus} + \gamma_w \cdot H_w) \cdot (1 - \eta) + S \cdot \eta]$$

$$k_{2,c} = \pi \cdot L_s \cdot c$$

$$k_{3,c} = n_b \cdot W_r \cdot \mu_{b-r} + \mu_{bu} \cdot W_{bu}$$

Sulla base di prove effettuate in laboratorio, nonostante la generale correttezza della formulazione presentata, Wang et al. (2012) propongono una correzione per tener conto della dinamicità dello scavo, inserendo nel modello anche parametri relativi a velocità di avanzamento e velocità di rotazione della testa fresante. Le modifiche alle formule precedentemente descritte sono state concepite in funzione dei dati risultati dai test sperimentali, e modificano il calcolo della spinta totale come in seguito indicato, mantenendo la distinzione tra terreno coeso e non coeso.

$$F_{t,s} (kN) = k_{1,s} \cdot (\alpha_1 \cdot r_c + \alpha_2) \cdot d^2 + k_{2,s} \cdot d + k_{3,s} \quad (29)$$

$$F_{t,c} (kN) = k_{1,s} \cdot (\beta_1 \cdot r_c + \beta_2) \cdot d^2 + k_{2,s} \cdot d + k_{3,s} \quad (30)$$

con:

$$\alpha_1 = \frac{\frac{\pi}{4} \cdot (k_a \cdot \gamma \cdot H + k_a \cdot P_{plus}) \cdot (1 - \eta)}{\frac{\pi}{4} \cdot [(k_a \cdot \gamma \cdot H + k_a \cdot P_{plus} + \gamma_w \cdot H_w) \cdot (1 - \eta) + S \cdot \eta] - \frac{1}{3} \cdot \mu_s \cdot \gamma \cdot L_s \cdot (2 + k_a)}$$

$$\alpha_2 = \frac{\frac{\pi}{4} \cdot \gamma_w \cdot H_w \cdot (1 - \eta) + S \cdot \eta}{\frac{\pi}{4} \cdot [(k_a \cdot \gamma \cdot H + k_a \cdot P_{plus} + \gamma_w \cdot H_w) \cdot (1 - \eta) + S \cdot \eta] - \frac{1}{3} \cdot \mu_s \cdot \gamma \cdot L_s \cdot (2 + k_a)}$$

$$\beta_1 = \frac{(k_a \cdot \gamma \cdot H + k_a \cdot P_{plus}) \cdot (1 - \eta)}{(k_a \cdot \gamma \cdot H + k_a \cdot P_{plus} + \gamma_w \cdot H_w) \cdot (1 - \eta) + S \cdot \eta}$$

$$\beta_2 = \frac{k_a \cdot P_{plus} \cdot (1 - \eta) + S \cdot \eta}{(k_a \cdot \gamma \cdot H + k_a \cdot P_{plus} + \gamma_w \cdot H_w) \cdot (1 - \eta) + S \cdot \eta}$$

$$r_c = \frac{v_{adv}}{v_{rpm} \cdot l_u}$$

Essendo v_{adv} (mm/min) la velocità di avanzamento della macchina EPBS, v_{rpm} (rev/min) la velocità di rotazione della testa di scavo, e l_u (mm) la lunghezza degli utensili (cui in teoria dovrebbe corrispondere l'avanzamento per ogni rotazione della testa fresante).

4.1.8 Zhang et al. (2013), per fronte di scavo omogeneo

Il modello pubblicato da Zhang et al. nel 2013 si basa su uno studio teorico delle forze di interazione tra terreno e TBM scudate. La formulazione presentata per il calcolo della spinta viene associata all'utilizzo di macchine EPBS attraverso terreni, ma non distingue casi diversi a seconda della granulometria. Similmente a Wang et al. (2012), questo modello considera l'apertura della testa di scavo per distinguere le forze agenti direttamente su di essa, da quelle bilanciate dalla pressione generata in camera di scavo. Diversamente, però, viene considerata una forza di resistenza del terreno che si oppone all'avanzamento della testa di scavo, componente non inserita negli altri modelli precedentemente considerati.

Le principali forze studiate per il calcolo della spinta totale da Zhang et al. (2013) sono la forza resistente del terreno opposta all'avanzamento della testa di scavo, F_r , la spinta del terreno, F_t , la forza applicata sul fronte di scavo con il sistema EPB, F_s , la forza generata dagli attriti tra scudo e terreno, F_a , e la forza resistente dovuta al trascinamento del backup della macchina, F_{bu} . Il calcolo esplicito di queste componenti viene indicato in seguito.

$$F_r (kN) = \frac{d \cdot E \cdot (1 - \eta)}{1 - \nu^2} \cdot \delta \quad (31)$$

$$F_t (kN) = \frac{\pi}{4} \cdot d^2 \cdot (1 - \eta) \cdot k_0 \cdot \gamma \cdot H \quad (32)$$

$$F_s (kN) = \frac{\pi}{4} \cdot d^2 \cdot \eta \cdot S \quad (33)$$

$$F_a (kN) = \mu_s \cdot (\pi \cdot d \cdot L_s \cdot \sigma_{rad} + W_m) \quad (34)$$

$$F_{bu} (kN) = \mu_{bu} \cdot W_{bu} \quad (35)$$

Essendo d (m) il diametro della testa fresante, E (kPa) il modulo di Young del terreno, η il coefficiente di apertura della testa fresante, ν il coefficiente di Poisson del terreno, δ (m/rev) la penetrazione della testa fresante per numero di rivoluzioni, k_0 il coefficiente di spinta a riposo del terreno, γ (kN/m³) il peso specifico del terreno, H (m) lo spessore del deposito rispetto all'asse della galleria, S (kPa) la pressione generata in camera di scavo, μ_s il coefficiente di attrito tra scudo e terreno, L_s (m) la lunghezza dello scudo, σ_{rad} (kPa) la tensione radiale media agente normalmente alla superficie dello scudo, W_m (kN) il peso della macchina in corrispondenza dello scudo (compresa la

testa di scavo), μ_{bu} il coefficiente di attrito tra *backup* e rotaie, e W_{bu} (kN) il peso del *backup*.

Sommando le componenti descritte, Zhang et al. (2013) forniscono una formulazione per il calcolo della spinta totale che la TBM-S dev'essere in grado di sviluppare, in funzione delle proprietà geotecniche caratterizzanti la progressiva di scavo considerata.

$$F (kN) = F_r + F_t + F_s + F_a + F_{bu} \quad (36)$$

4.1.9 Zhang et al. (2013), per fronte di scavo stratificato

La pubblicazione di Zhang et al. (2013) continua presentando una variazione al modello descritto nel Capitolo 4.1.8: la nuova formulazione permette il calcolo della spinta totale in caso di fronte di scavo caratterizzato da stratificazione geologica. Le modifiche riguardano le componenti direttamente influenzate dai parametri geotecnici, in particolare la forza resistente del terreno che si oppone all'avanzamento della testa di scavo, F_r , e la spinta del terreno, F_t . La correzione applicata viene descritta esplicitamente nel seguito.

$$F_r = \sum_{i=1}^n \frac{E_i \cdot h_i \cdot \delta \cdot (1 - \eta)}{1 - \nu_i^2} \quad (37)$$

$$F_t = \sum_{i=0}^n [2 \cdot (1 - \eta) \cdot x_i \cdot k_{0i} \cdot \gamma_i \cdot h_i \cdot (H - y_i)] \quad (38)$$

Essendo E_i (kPa) il modulo di Young relativo allo strato i-esimo, h_i (m) lo spessore dello strato i-esimo, δ (m/rev) la penetrazione della testa fresante per numero di rivoluzioni, η il coefficiente di apertura della testa fresante, ν_i il coefficiente di Poisson dello strato i-esimo, $k_{0,i}$ il coefficiente di spinta a riposo relativo allo strato i-esimo, γ_i (kN/m³) il peso specifico del terreno relativo allo strato i-esimo, x_i (m) la distanza orizzontale tra il centro dello strato i-esimo e il perimetro della sezione di scavo, e y_i (m) la distanza verticale tra il centro dello strato i-esimo e il centro della sezione di scavo.

La formula per il calcolo della spinta totale si traduce nella sommatoria tra le componenti descritte nel Capitolo 4.1.8, andando a sostituire le forze F_r e F_t con la versione modificata per fronte di scavo stratificato.

$$F \text{ (kN)} = F_r + F_t + F_S + F_a + F_{bu} \quad (39)$$

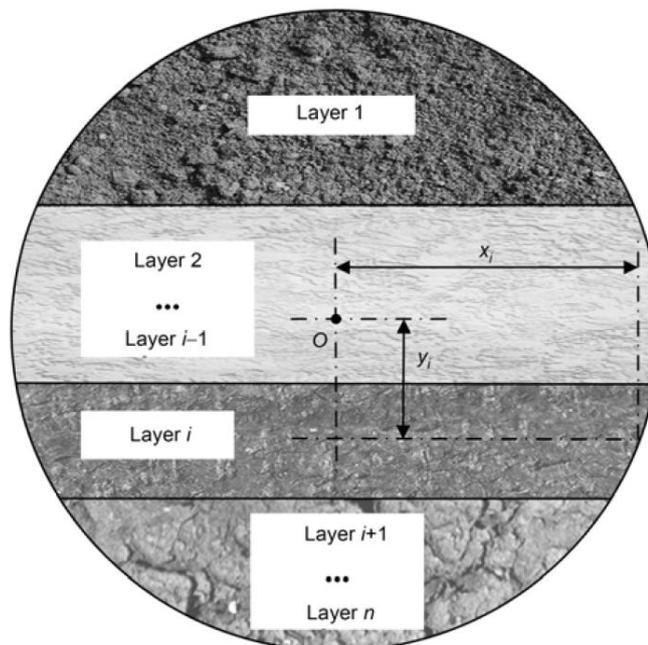


Figura 4-3. Definizione delle dimensioni x_i e y_i per fronte di scavo stratificato [30]

4.2 Modelli di previsione per la coppia

Come anticipato all'inizio del Capitolo 4.1, anche i modelli analitici per la previsione della coppia necessaria alla rotazione di scavo sono numerosi. Così come per quelli relativi alla spinta, alcune di queste formulazioni sono principalmente empiriche, ottenute con l'analisi di dati storici relativi a scavi con macchine EPBS attraverso terreni. Anche in questo caso viene talvolta fornita una gamma di valori all'interno della quale va cercata la massima coppia che la TBM-S dovrà essere in grado di sostenere. Per quanto riguarda i modelli più complessi, essi si basano su considerazioni teoriche più complete, con l'obiettivo di restituire un risultato per ogni progressiva di scavo valutata, in funzione della geologia e delle caratteristiche strutturali della macchina.

Le formule raccolte per la previsione della coppia necessaria sono in tutto 9, aventi datazioni comprese tra il 2007 e il 2015. La coppia ottenuta dalle formulazioni individuate viene espressa in kN·m.

4.2.1 Ates et al. (2013)

La pubblicazione di Ates et al. del 2013, che ha fornito un modello statistico per la previsione della spinta (Capitolo 4.1.1), indaga sull'eventuale correlazione tra diametro di una TBM e coppia massima che la macchina dev'essere in grado di sviluppare. Il metodo di previsione indicato si basa su di uno studio statistico, che, in riferimento alle TBM di tipo EPB, è stato portato a termine con l'ausilio di un database contenente i dati storici relativi a 86 macchine EPBS, impiegate in ambito mondiale, di diametro non inferiore a 4 m.

Tali macchine sono state tutte realizzate dopo il 1985, e questo criterio di selezione ha permesso di basare lo studio su TBM caratterizzate da tecnologie all'avanguardia, in modo da non rischiare di ottenere risultati obsoleti e privi di

interesse. La formulazione pubblicata è stata ottenuta scegliendo la funzione in grado di approssimare la curva di dati statistici nel modo migliore, ovvero quella caratterizzata dal più alto valore del coefficiente di determinazione R^2 . La coppia viene calcolata in funzione solamente del diametro della testa di scavo, d (m).

$$T \text{ (kN} \cdot \text{m)} = 13,438 \cdot d^{3,154} \tag{40}$$
$$R^2 = 0,85$$

Secondo gli autori, una correlazione caratterizzata da un R^2 superiore a 0.70 può essere considerata come significativa e, in questo caso, il valore del coefficiente di determinazione è molto elevato. Avendo a disposizione il confronto con i risultati relativi ad altri tipi di TBM (Grafico ...), si comprende come la correlazione tra coppia massima e diametro della testa di scavo sia forte, a tal punto da non richiedere necessariamente di considerare i parametri geotecnici relativi al singolo progetto da valutare. Ciò viene giustificato dal legame tra coppia applicata alla testa di scavo e forze di attrito che si generano su di essa, che, per quanto possano essere diverse le proprietà meccaniche dei terreni considerati, dipendono fortemente dalla dimensione della testa fresante.

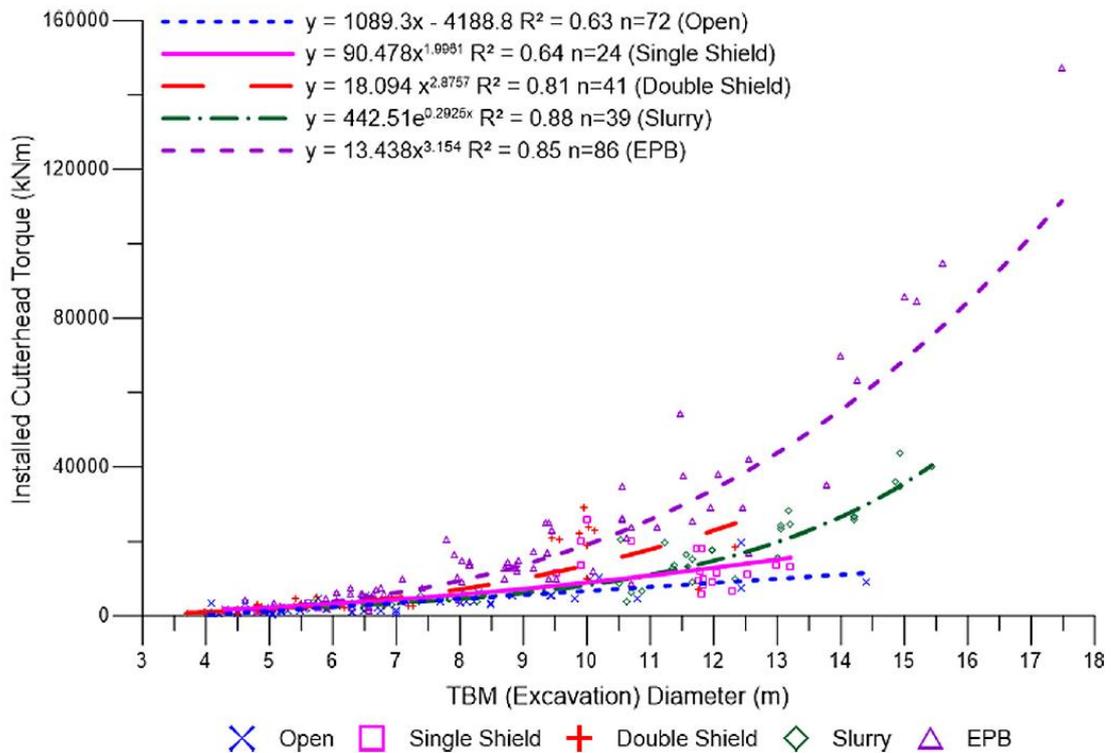


Grafico 4-3. Relazione tra diametro di scavo e coppia massima installata su differenti tipi di TBM [4]

4.2.2 Ates et al. (2013), in funzione della spinta massima

Sebbene la correlazione tra diametro della testa di scavo e spinta venga considerata debole da Ates et al. (2013) (Capitolo 4.1.1), gli stessi autori sottolineano come i risultati statistici relativi all'osservazione dei dati precedentemente descritti nei capitoli 4.1.1 e 4.2.1 indichino un forte legame tra spinta massima e coppia massima, in particolare nel caso di impiego di TBM scudate. Questa correlazione viene esplicitata con la formulazione indicata in seguito, dove la coppia massima che una macchina EPBS dev'essere in grado di sviluppare viene calcolata in funzione della spinta installata F (kN).

$$T \text{ (kN} \cdot \text{m)} = 0.0053 \cdot F^{1.3179} \quad (41)$$

$$R^2 = 0.80$$

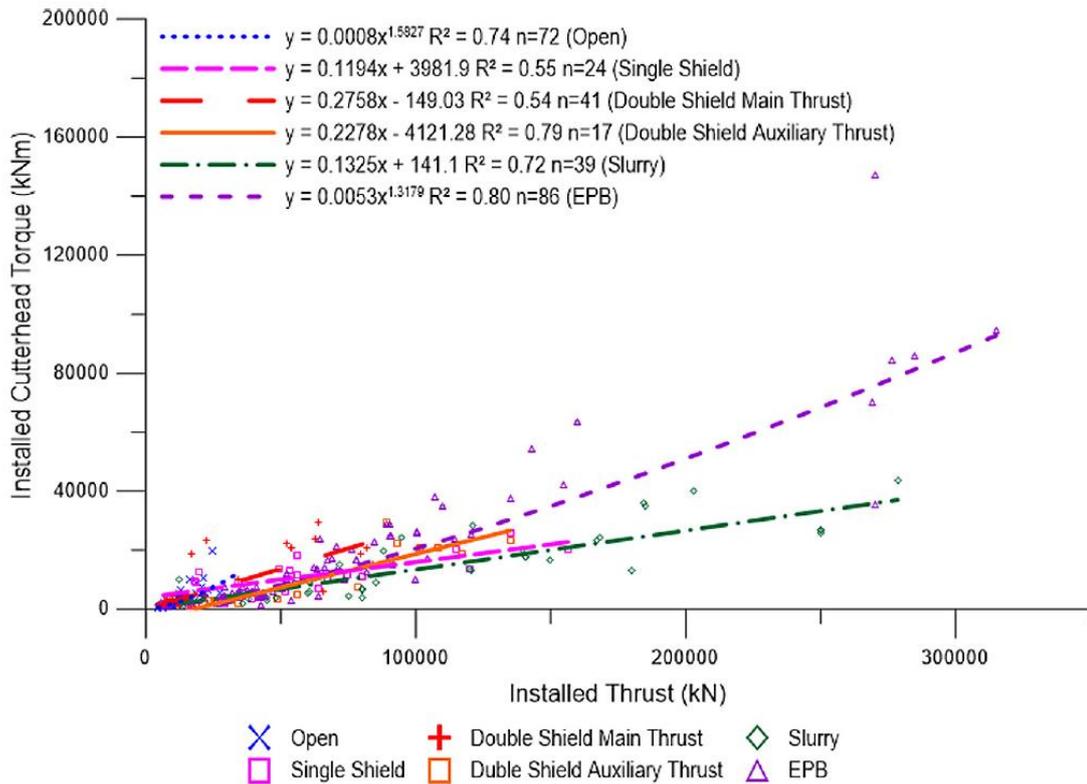


Grafico 4-4. Relazione tra spinta installata e coppia installata su differenti tipi di TBM [4]

4.2.3 Maidl et al. (2012)

Il modello ricavato da Maidl et al. nel 2012 si basa su un confronto empirico tra diametro, d (m), e massima coppia a disposizione della testa di scavo, in riferimento a differenti casi storici i cui dati operativi sono stati diagrammati. La

funzione che meglio approssima la correlazione tra coppia e diametro di scavo in relazione alle macchine EPBS è stata ottenuta per interpolazione.

$$T \text{ (kN} \cdot \text{m)} = 19,519 \cdot d^3 + 84,973 \cdot d^2 - 962,23 \cdot d + 2547,7 \quad (42)$$

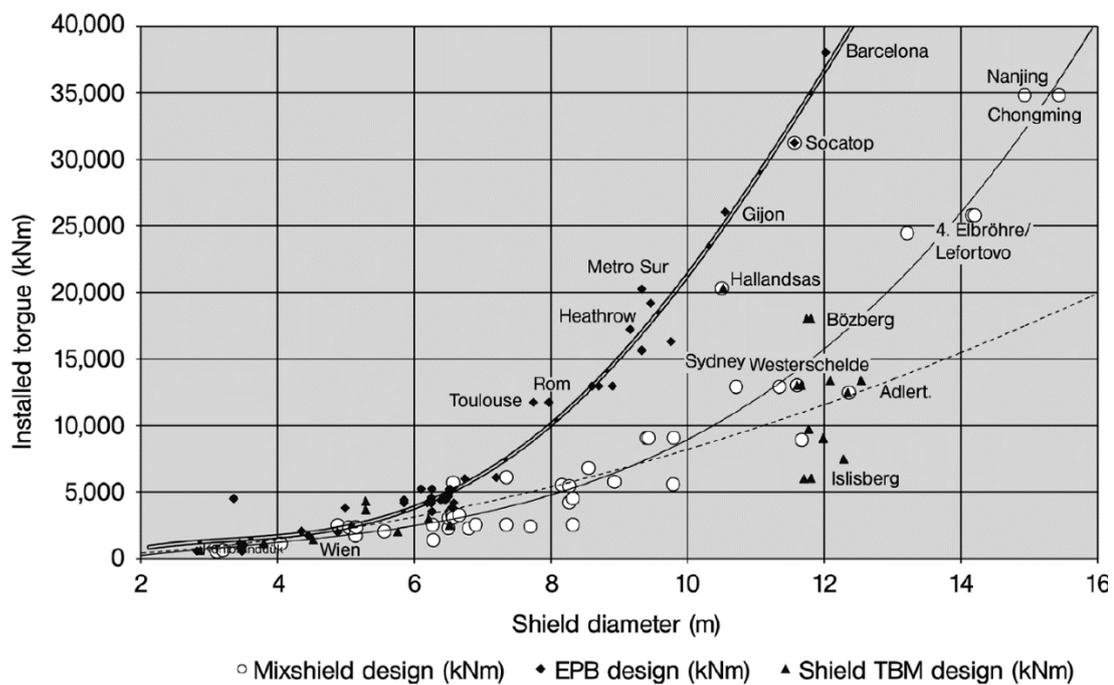


Grafico 4-5. Relazione empirica tra diametro di scavo e coppia massima installata su diversi tipi di TBM-S [19]

4.2.4 JSCE (2007)

Il modello per il calcolo della coppia massima indicato dalla *Japan Society of Civil Engineers* nel 2007 è delineato in funzione del solo diametro della testa fresante d (m), ma, come nel caso della formulazione descritta nel Capitolo

4.1.2, le soluzioni possibili per un determinato diametro sono comprese all'interno di un intervallo. Questa gamma di valori viene definita con l'utilizzo di un coefficiente empirico, α , che per le macchine EPBS può variare tra i 10 e i 25 kN/m².

$$T \text{ (kN} \cdot \text{m)} = \alpha \cdot d^3 \quad (43)$$

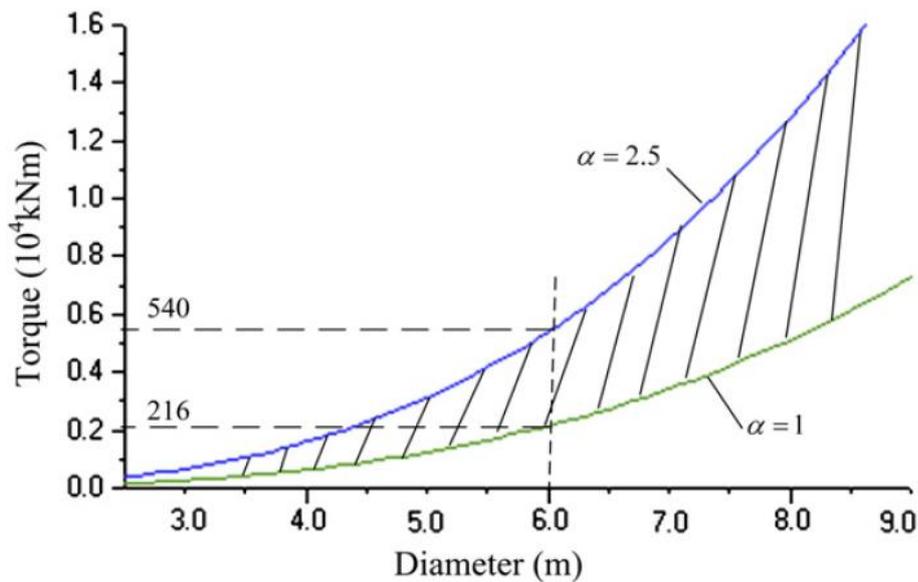


Grafico 4-6. Relazione empirica tra diametro di scavo e coppia installata per macchine EPBS [24]

Nonostante la forte correlazione tra coppia e diametro della testa fresante, questa gamma di soluzioni, che si allarga al crescere della sezione di scavo, suggerisce la necessità di considerare modelli previsionali più complessi.

4.2.5 Godinez et al. (2015)

La pubblicazione del 2015 di Godinez et al. propone un modello di calcolo della coppia per una macchina EPBS in terreni, modificando una precedente formulazione di Shi et al. (2011). Sebbene entrambi gli studi siano basati su un approccio teorico e analitico, il modello descritto in questo Capitolo si distingue dall'originale per le modifiche apportate dagli autori in funzione di dati empirici, relativi ad operazioni di scavo storiche.

Per ottenere il valore della coppia agente sulla testa fresante per una determinata progressiva di scavo, il modello considera le componenti principali che influenzano lo sviluppo di tali forze. In particolare, Godinez et al. (2015) considerano la coppia dovuta agli attriti tra fronte di scavo e testa fresante, T_a , la coppia dovuta agli attriti tra perimetro laterale della testa di scavo e terreno, T_l , la coppia sviluppata dagli attriti tra testa di scavo e terreno condizionato (all'interno della camera in pressione), T_r , la coppia dovuta agli attriti tra zone di apertura della testa di scavo e terreno condizionato, T_o , e la coppia sviluppata dagli attriti tra terreno condizionato e barre miscelatrici, T_b . Il calcolo esplicito di queste componenti viene indicato in seguito.

$$T_a (kN \cdot m) = \frac{\pi \cdot d^3}{12} \cdot \sigma_{rad} \cdot \mu_{c-s} \cdot (1 - \eta) \quad (44)$$

$$T_l (kN \cdot m) = \frac{\pi \cdot d^2}{2} \cdot \sigma_{rad} \cdot \mu_s \cdot t \quad (45)$$

$$T_r (kN \cdot m) = \frac{\pi \cdot d^3}{12} \cdot \sigma_{rad} \cdot \mu_{c-m} \cdot (1 - \eta) \quad (46)$$

$$T_o(kN \cdot m) = \frac{\pi \cdot d^3}{12} \cdot k_q \cdot \sigma_{rad} \cdot \mu_{o-m} \cdot \eta \quad (47)$$

$$T_b(kN \cdot m) = \sigma_{rad} \cdot \mu_{b-m} \cdot (d_b \cdot L_b \cdot n_b \cdot t_b + d_p \cdot L_p \cdot n_p \cdot t_p) \quad (48)$$

Essendo d (m) il diametro della testa fresante, σ_{rad} (kPa) la tensione radiale media agente normalmente alla superficie dello scudo, μ_{c-s} il coefficiente di attrito tra testa fresante e fronte di scavo, η il coefficiente di apertura della testa fresante, μ_s il coefficiente di attrito tra scudo e terreno, t (m) lo spessore della testa di scavo, μ_{c-s} il coefficiente di attrito tra il retro della testa di scavo e il terreno condizionato, k_q un parametro relative al tipo di aperture sulla testa di scavo (pari a 0,35 nel caso considerato da Godinez et al. (2015)), μ_{o-m} il coefficiente di attrito tra terreno condizionato e aperture della testa di scavo, μ_{b-m} il coefficiente di attrito tra terreno condizionato e barre miscelatrici, d_b (m) la dimensione trasversale media delle barre miscelatrici, L_b (m) la lunghezza media delle barre miscelatrici, n_b il numero delle barre miscelatrici, t_b (m) la distanza media tra barre miscelatrici e asse della galleria, d_p (m) la dimensione trasversale media dei supporti della testa di scavo, L_p (m) la lunghezza media dei supporti della testa di scavo, n_p il numero dei supporti della testa di scavo, e t_p (m) la distanza media tra supporti della testa di scavo e asse della galleria.

Il calcolo della coppia totale agente sulla testa di scavo si effettua effettuando la sommatoria delle componenti precedentemente descritte. Tal valore viene calcolato in funzione delle singole progressive di scavo considerate, fornendo informazioni utili sia in fase di progetto, sia durante le fasi operative.

$$T(kN \cdot m) = T_a + T_l + T_r + T_o + T_b \quad (49)$$

Secondo il modello presentato nel 2009 da Xiong et al., sul quale si basa la formulazione presentata seguentemente nel Capitolo 4.2.6, è possibile accorpate T_a e T_r all'interno di un'unica componente, considerando il rapporto tra pressione agente sul fronte della testa fresante e quello agente sul retro. In questo modo, la coppia dovuta alle interazioni tra terreno e testa di scavo si potrebbe definire nel modo seguente.

$$T_a \text{ (kN} \cdot \text{m)} = (1 + f_{\Delta P}) \cdot \frac{\pi \cdot d^3}{12} \cdot \sigma_{rad} \cdot \mu_{c-s} \cdot (1 - \eta) \quad (50)$$

Essendo $f_{\Delta P}$ il rapporto tra spinta sul fronte e sul retro della testa fresante.

Questo coefficiente avrebbe valore 1 se si volessero considerare uguali gli attriti sul retro e sul fronte della testa di scavo. Tuttavia, con la consapevolezza delle proprietà meccaniche modificate dall'utilizzo di condizionanti, è opportuno considerare un valore di tale coefficiente al di sotto dell'unità, tenendo così conto degli attriti minori agenti sul retro della testa fresante. La formulazione completa per il calcolo della coppia agente, in questo caso assume la forma indicata in seguito.

$$T \text{ (kN} \cdot \text{m)} = T_a + T_l + T_o + T_b \quad (51)$$

4.2.6 Xiong et al. (2009)

Nel 2009, Xiong et al. pubblicano un modello per il calcolo della coppia agente sulla testa fresante, ottenuto attraverso lo studio teorico delle forze agenti su di essa. Le principali componenti considerate sono la coppia dovuta

agli attriti tra terreno e testa fresante, T_a , la coppia dovuta agli attriti tra zone di apertura della testa di scavo e terreno condizionato, T_o , la coppia dovuta agli attriti tra perimetro laterale della testa di scavo e terreno, T_l , e la coppia sviluppata dagli attriti tra terreno condizionato e barre miscelatrici, T_b . Il calcolo esplicito di queste componenti viene indicato in seguito.

$$T_a (kN \cdot m) = (1 + f_{\Delta P}) \cdot \frac{\pi \cdot d^3}{12} \cdot \mu_{c-s} \cdot \gamma \cdot H \cdot k_a \cdot (1 - \eta) \quad (52)$$

$$T_o (kN \cdot m) = \frac{\pi \cdot d^3}{12} \cdot k_q \cdot \eta \cdot \tau \quad (53)$$

$$\tau = c + \gamma \cdot H \cdot \tan(\varphi)$$

$$T_l (kN \cdot m) = \frac{\pi \cdot d^2}{4} \cdot (1 + k_a) \cdot \gamma \cdot H \cdot \mu_s \cdot t \quad (54)$$

$$T_b (kN \cdot m) = v_{rpm} \cdot \gamma \cdot H \cdot \mu_{b-m} \cdot d_b \cdot L_b \cdot n_b \cdot t_b \quad (55)$$

Essendo $f_{\Delta P}$ il rapporto tra spinta sul retro e sul fronte della testa fresante, d (m) il diametro della testa fresante, μ_{c-s} il coefficiente di attrito tra testa fresante e fronte di scavo, γ (kN/m^3) il peso specifico del terreno, H (m) lo spessore del deposito rispetto all'asse della galleria, k_a il coefficiente di spinta attiva del terreno, η il coefficiente di apertura della testa fresante, k_q un parametro relative al tipo di aperture sulla testa di scavo (pari a 0,35 nel caso considerato da Godinez et al. (2015)), c (kPa) la coesione del terreno condizionato, φ ($^\circ$) l'angolo di attrito relativo alla formazione attraversata, t (m) lo spessore della testa di scavo, v_{rpm} (rev/min) la velocità di rotazione

della testa di scavo, μ_{b-m} il coefficiente di attrito tra terreno condizionato e barre miscelatrici, d_b (m) la dimensione trasversale media delle barre miscelatrici, L_b (m) la lunghezza media delle barre miscelatrici, n_b il numero delle barre miscelatrici, e t_b (m) la distanza media tra barre miscelatrici e asse della galleria.

Il coefficiente $f_{\Delta P}$ permette di trascurare la valutazione per esteso della componente alla coppia dovuta agli attriti agenti sul retro della testa di scavo. Considerando questo rapporto pari a 1, le forze resistenti alla rotazione sulle 2 facce della testa rotante vengono ritenute uguali. Tuttavia, con l'utilizzo di condizionanti in grado di modificare le proprietà meccaniche del terreno in camera di scavo, è opportuno considerare un valore di tale coefficiente al di sotto dell'unità, tenendo così conto degli attriti minori agenti sul retro della testa fresante. La formulazione completa per il calcolo della coppia agente assume la forma indicata in seguito.

$$T \text{ (kN} \cdot \text{m)} = T_a + T_o + T_l + T_b \quad (56)$$

4.2.7 Wang et al. (2012)

Nel 2012, Wang et al. pubblicano un modello per il calcolo della coppia agente sulla testa fresante, avendo migliorato su base sperimentale la formulazione di Xiong et al. (2009). La struttura originale si basa sullo studio delle componenti principali responsabili della coppia totale, al pari del modello presentato da Shi et al. (2011) e modificato da Godinez et al. (2015). Come nel caso della formulazione presentata nel Capitolo 4.1.7 per il calcolo della spinta, il modello descritto in questo Capitolo viene presentato mettendo in evidenza il ruolo del diametro di scavo, d (m).

$$T \text{ (kN} \cdot \text{m)} = k_1 \cdot (\zeta \cdot \alpha_1 \cdot r_c + \alpha_2) \cdot d^3 + k_2 \cdot d^2 + k_3 \quad (57)$$

con:

$$k_1 = \frac{\pi}{12} [(1 + f_{\Delta P}) \cdot (1 - \eta) \cdot k_a \cdot \mu_{c-s} \cdot \gamma \cdot H + k_q \cdot \eta \cdot \tau]$$

$$\tau = c + \sigma_{rad} \cdot \tan(\varphi)$$

$$k_2 = \frac{\pi}{4} \cdot (1 + k_a) \cdot \mu_{c-s} \cdot \gamma \cdot H \cdot t$$

$$k_3 = v_{rpm} \cdot \gamma \cdot H \cdot d_b \cdot L_b \cdot t_b \cdot n_b \cdot \mu_{b-m}$$

$$\alpha_1 = \frac{(1 + f_{\Delta P}) \cdot k_a \cdot \mu_{c-s} \cdot \gamma \cdot H \cdot (1 - \eta)}{(1 + f_{\Delta P}) \cdot k_a \cdot \mu_{c-s} \cdot \gamma \cdot H \cdot (1 - \eta) + k_q \cdot \eta \cdot \tau}$$

$$\alpha_2 = \frac{k_q \cdot \eta \cdot \tau}{(1 + f_{\Delta P}) \cdot k_a \cdot \mu_{c-s} \cdot \gamma \cdot H \cdot (1 - \eta) + k_q \cdot \eta \cdot \tau}$$

$$r_c = \frac{v_{adv}}{v_{rpm} \cdot l_u}$$

Essendo d (m) il diametro della testa fresante, $f_{\Delta P}$ il rapporto tra spinta sul retro e sul fronte della testa fresante, η il coefficiente di apertura della testa fresante, k_a il coefficiente di spinta attiva del terreno, μ_{c-s} il coefficiente di

attrito tra testa fresante e fronte di scavo, γ (kN/m^3) il peso specifico del terreno, H (m) lo spessore del deposito rispetto all'asse della galleria, k_q un parametro relative al tipo di aperture sulla testa di scavo (pari a 0,35 nel caso considerato da Godinez et al. (2015)), c (kPa) la coesione del terreno condizionato, σ_{rad} (kPa) la tensione radiale media agente normalmente alla superficie dello scudo, φ ($^\circ$) l'angolo di attrito relativo alla formazione attraversata, t (m) lo spessore della testa di scavo, v_{rpm} (rev/min) la velocità di rotazione della testa di scavo, d_b (m) la dimensione trasversale media delle barre miscelatrici, L_b (m) la lunghezza media delle barre miscelatrici, t_b (m) la distanza media tra barre miscelatrici e asse della galleria, n_b il numero delle barre miscelatrici, μ_{b-m} il coefficiente di attrito tra terreno condizionato e barre miscelatrici, v_{adv} (mm/min) la velocità di avanzamento della macchina EPBS, e l_u (mm) la lunghezza degli utensili. ζ è un parametro empirico, utilizzato da Wang et al. (2012) pari a 1,21.

Questo modello permette di considerare l'eventuale coesione del terreno condizionato, nel momento in cui esso attraversa le aperture della testa di scavo. Inoltre, questa formulazione considera la velocità di rotazione della testa fresante come parametro in grado di influenzare l'intensità della coppia agente. L'assunzione del coefficiente $f_{\Delta P}$ pari a 1 significa considerare l'assenza di differenze di pressioni normali alla testa di scavo tra fronte e retro; tuttavia, con l'utilizzo di condizionanti in grado di modificare le proprietà meccaniche del terreno in camera di scavo, è opportuno considerare un valore di tale coefficiente al di sotto dell'unità, tenendo così conto degli attriti minori agenti sul retro della testa fresante.

4.2.8 Zhang et al. (2013), per fronte di scavo omogeneo

La pubblicazione di Zhang et al. del 2013 propone un modello di previsione per la coppia agente sulla testa di scavo di una macchina EPBS, durante

l'attraversamento di terreni, analizzando teoricamente le componenti principali in grado di influenzarne maggiormente l'intensità. Secondo questa formulazione, queste componenti sono la coppia generata dagli attriti tra testa di scavo e terreno, T_a , la coppia dovuta all'azione degli utensili, T_u , la coppia sviluppata dagli attriti tra perimetro laterale della testa di scavo e terreno, T_l , e la coppia generata dagli attriti tra barre miscelatrici e terreno condizionato, T_b . Il calcolo esplicito di queste componenti viene indicato in seguito.

$$T_a (kN \cdot m) = A \cdot \frac{G \cdot \mu_{c-s} \cdot (1 - \eta)}{1 - \nu} \cdot \delta + (1 - \eta) \cdot \frac{d}{3} \cdot A \cdot \mu_{c-s} \cdot k_0 \cdot \gamma \cdot H \quad (58)$$

$$T_u (kN \cdot m) = \delta \cdot \frac{d^2}{8} \cdot \left[S \cdot \tan^2 \left(\frac{\pi}{4} + \frac{\varphi}{2} \right) + 2 \cdot c \cdot \tan \left(\frac{\pi}{4} + \frac{\varphi}{2} \right) \right] \quad (59)$$

$$T_l (kN \cdot m) = 2 \cdot A \cdot t \cdot \mu_s \cdot \sigma_{rad} \quad (60)$$

$$T_b (kN \cdot m) = \pi \cdot n_b \cdot d_b \cdot L_b \cdot t_b \cdot \mu_{b-m} \cdot \sigma_{rad} \quad (61)$$

Essendo $A (m^2)$ la sezione di scavo, $G (kPa)$ il modulo di taglio relativo alla formazione attraversata, μ_{c-s} il coefficiente di attrito tra testa fresante e fronte di scavo, η il coefficiente di apertura della testa fresante, ν il coefficiente di Poisson del terreno, $\delta (m/rev)$ la penetrazione della testa fresante per numero di rivoluzioni, $d (m)$ il diametro della testa fresante, k_0 il coefficiente di spinta a riposo del terreno, $\gamma (kN/m^3)$ il peso specifico del terreno, $H (m)$ lo spessore del deposito rispetto all'asse della galleria, $S (kPa)$ la pressione generata in camera di scavo, $\varphi (^\circ)$ l'angolo di attrito relativo alla formazione attraversata, $c (kPa)$ la coesione della formazione attraversata, $t (m)$ lo spessore della testa di scavo, μ_s il coefficiente di attrito tra scudo e terreno, $\sigma_{rad} (kPa)$ la tensione

radiale media agente normalmente alla superficie dello scudo, n_b il numero di barre miscelatrici, d_b (m) la dimensione trasversale media delle barre miscelatrici, L_b (m) la lunghezza media delle barre miscelatrici, t_b (m) la distanza media tra barre miscelatrici e asse della galleria, e μ_{b-m} il coefficiente di attrito tra terreno condizionato e barre miscelatrici.

La coppia complessivamente agente sulla testa fresante, in relazione alla progressiva di scavo considerata, viene calcolata tramite la sommatoria delle componenti precedentemente definite.

$$T \text{ (kN} \cdot \text{m)} = T_a + T_u + T_l + T_b \quad (62)$$

4.2.9 Zhang et al. (2013), per fronte di scavo stratificato

La pubblicazione di Zhang et al. (2013) continua presentando una variazione al modello descritto nel Capitolo 4.2.7: la nuova formulazione permette il calcolo della coppia totale agente sulla testa fresante in caso di fronte di scavo stratificato. Le modifiche riguardano l'unica componente che risente dell'effetto di una stratificazione geologica, ovvero la coppia dovuta agli attriti tra fronte di scavo e testa fresante, T_a . La correzione applicata viene descritta esplicitamente nel seguito.

$$T_a \text{ (kN} \cdot \text{m)} = \sum_{i=1}^n \frac{4 \cdot G_i \cdot \mu_{c-s} \cdot h_i \cdot \delta \cdot (1 - \eta) \cdot y_i}{\pi \cdot (1 - \nu_i)} \cdot E \left(-\frac{x_i^2}{y_i^2} \right) + \mu_{c-s} \cdot (1 - \eta) \cdot k_{oi} \cdot \gamma_i \cdot h_i \cdot (H - y_i) \cdot \left(x_i \cdot \frac{d}{2} + \frac{y_i^2}{2} \cdot \ln \left| \frac{d/2 + x_i}{d/2 - x_i} \right| \right) \quad (63)$$

Essendo G_i (kPa) il modulo di taglio relativo allo strato i -esimo, μ_{c-s} il coefficiente di attrito tra testa fresante e fronte di scavo, h_i (m) lo spessore dello strato i -esimo, δ (m/rev) la penetrazione della testa fresante per numero di rivoluzioni, η il coefficiente di apertura della testa fresante, ν_i il coefficiente di Poisson dello strato i -esimo, $k_{0,i}$ il coefficiente di spinta a riposo relativo allo strato i -esimo, γ_i (kN/m^3) il peso specifico del terreno relativo allo strato i -esimo, H (m) lo spessore del deposito rispetto all'asse della galleria, d (m) il diametro della testa fresante, x_i (m) la distanza orizzontale tra il centro dello strato i -esimo e il perimetro della sezione di scavo, e y_i (m) la distanza verticale tra il centro dello strato i -esimo e il centro della sezione di scavo. La funzione $E(\xi)$ rappresenta un integrale ellittico completo di seconda specie.

La formula per il calcolo della spinta totale si traduce nella sommatoria tra le componenti descritte nel Capitolo 4.2.7, andando a sostituire la componente T_a con la versione modificata per fronte di scavo stratificato.

$$T \text{ (} kN \cdot m \text{)} = T_a + T_u + T_l + T_b \quad (64)$$

4.3 Modelli di previsione per l'avanzamento

Nel Capitolo 3.4.2 si è discusso della differenza tra velocità di avanzamento istantanea e velocità di avanzamento netta, in riferimento ad una precisa unità di tempo. Per il calcolo di questo parametro sono state individuate 2 formule: la prima si riferisce al calcolo della velocità di avanzamento istantanea, mentre la seconda è delineata in funzione del coefficiente di utilizzazione della macchina di scavo, con l'obiettivo di ottenere un risultato relativo alla velocità netta di avanzamento complessiva.

I due modelli risalgono rispettivamente al 2016 e al 2014. Entrambi i risultati esprimono la velocità di avanzamento in mm/min.

4.3.1 Burger (Herrenknecht AG) (2016)

Il modello presentato in seguito è stato estrapolato da un grafico utilizzato da Burger (2016) durante un corso tenuto da Herrenknecht, relativamente alla realizzazione di gallerie per mezzo di TBM. La formula ottenuta permette il calcolo dell'avanzamento, v_{adv} , in funzione del diametro di scavo, d (m), sulla base della correlazione empirica proposta nel Grafico 4-7.

$$v_{adv} \text{ (mm/min)} = \frac{317,22}{d} \quad (65)$$

Per quanto semplice, questo modello permette una previsione dell'avanzamento istantaneo, utile per poter utilizzare modelli di previsione di altri parametri che lo richiedono come dato in ingresso.

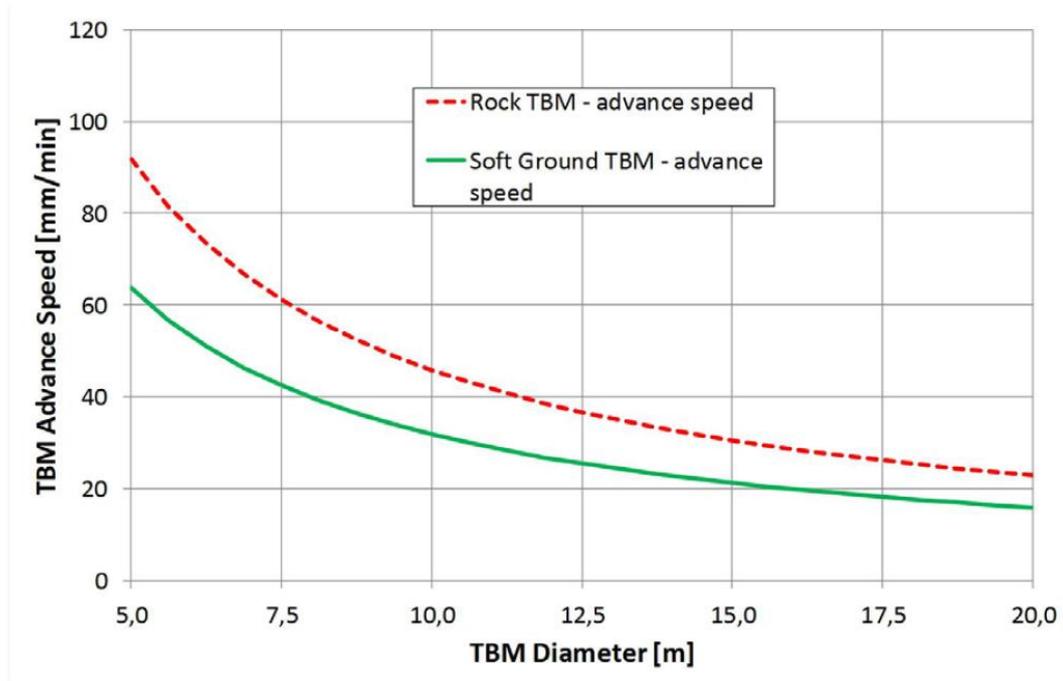


Grafico 4-7. Rapporto empirico tra diametro di scavo e velocità di avanzamento, in funzione del tipo di TBM [8]

4.3.2 Bilgin et al. (2014)

Il modello presentato da Bilgin et al. nel 2014 propone il calcolo della velocità di avanzamento relativamente alla realizzazione complessiva della galleria, considerando i tempi di interruzione delle operazioni di scavo e le ore totali di lavoro. Per calcolare la velocità di avanzamento $v_{adv,tot}$, occorre quindi ipotizzare il tempo di utilizzazione della macchina, sulla base di suggerimenti tabellati, o fidandosi dell'esperienza del costruttore.

$$v_{adv,tot} (mm/min) = \frac{L_{tun} \cdot 1000}{MUT \cdot h_{tot} \cdot 60} \quad (66)$$

Essendo L_{tun} (m) la lunghezza totale della galleria, MUT il coefficiente relativo al tempo di utilizzazione della macchina, e h_{tot} (h) le ore totali di lavoro.

Per poter permettere un'interpretazione più pratica dei risultati così ottenuti, questa stessa formulazione è stata usata per definire il calcolo del numero di anelli da realizzare ogni giorno, in funzione delle ore totali previste. Inoltre, prevedendo la possibilità di indicare come dato iniziale il numero di anelli al giorno voluto, è stata implementata anche nel modo inverso, ovvero con l'obiettivo di fornire il numero di ore totali lavorative previste, sulla base dell'avanzamento giornaliero voluto. Le due formule in questione vengono presentate in seguito.

$$h_{tot} (h) = \frac{L_{tun} \cdot 1000}{MUT \cdot h_{tot} \cdot v_{adv,tot} \cdot 60} \quad (67)$$

$$n_{ring} (day^{-1}) = \frac{v_{adv,tot} \cdot 1,44}{w} \quad (68)$$

Essendo n_{ring} (day^{-1}) il numero di anelli installati per giorno, e w (m) la profondità dell'anello di rivestimento.

La triplice implementazione di questa formula, utilizzata in diversi risvolti, permette di indicare a fine previsione l'avanzamento totale previsto per lo scavo, il numero di anelli da installare ogni giorno in funzione delle ore di lavoro previste, o, indicando la quantità di anelli da installare per giorno, le ore di lavoro totali previste.

4.4 Modelli di previsione per la velocità di rotazione della testa di scavo

I modelli implementati per la previsione della velocità di rotazione della testa fresante sono 2, sebbene siano del tutto simili sia concettualmente che nella forma. La differenza che li distingue risiede unicamente nella massima velocità tangenziale con cui un utensile da terreno può essere utilizzato, suggerita diversamente dagli autori delle due formulazioni.

I modelli risalgono al 2013 e al 2016. La velocità di rotazione viene espressa in rivoluzioni al minuto, o rpm nella concezione anglosassone.

4.4.1 Bilgin et al. (2013)

Questo modello considera la massima velocità tangenziale per gli utensili da terreno pari a 45 m/min . La formula proposta permette il calcolo della massima velocità di rotazione della testa fresante, v_{rpm} , unicamente in funzione del diametro di scavo, d (m).

$$v_{rpm} \text{ (rev/min)} = \frac{45 \text{ (m/min)}}{d \cdot \pi} \quad (70)$$

4.4.2 Burger (Herrenknecht AG) (2016)

L'unica differenza rispetto al modello proposto nel Capitolo 4.4.1 risiede nella massima velocità tangenziale per gli utensili da terreno. Secondo il suggerimento dato da Herrenknecht AG, questa velocità è pari a 40 m/min . La

formula proposta permette il calcolo della massima velocità di rotazione della testa fresante, v_{rpm} , unicamente in funzione del diametro di scavo, d (m).

$$v_{rpm} (rev/min) = \frac{45 (m/min)}{d \cdot \pi} \quad (71)$$

4.5 Modelli di previsione per la penetrazione

La penetrazione di una macchina EPBS in terreni è un parametro piuttosto trascurato dalle pubblicazioni, in particolare da quelle che si occupano di fornire formule di calcolo per i parametri di scavo. Ai fini di comprendere la sua previsione all'interno del modello sviluppato in questa tesi, sono state individuate due formulazioni, caratterizzate da differente complessità. Una prima trattazione definisce la penetrazione in modo banale, in funzione di avanzamento e velocità di rotazione della testa fresante. La seconda tiene in considerazione la geometria degli utensili da terreno utilizzati, assieme alla forza di spinta di competenza del singolo utensile.

Le due formulazioni risalgono entrambe al 2014. La penetrazione viene espressa in mm/rivoluzione (mm/rev).

4.5.1 Bilgin et al. (2014), modello A

Il modello di Bilgin et al. del 2014, identificato convenzionalmente come versione A, determina la penetrazione, δ , a livello teorico, considerando l'avanzamento istantaneo della macchina, v_{adv} (mm/min), e la velocità di rotazione della testa di scavo, v_{rpm} (rev/min).

$$\delta \text{ (mm/rev)} = \frac{v_{adv}}{v_{rpm}} \quad (72)$$

4.5.2 Bilgin et al. (2014), modello B

Il modello di Bilgin et al. del 2014, convenzionalmente definito come versione B, propone una valutazione della penetrazione sulla base di una formulazione più complessa, in funzione delle interazioni tra terreno e utensili. In questo modo, il calcolo dell'avanzamento longitudinale della TBM-S richiede la conoscenza della forza di spinta necessaria agli utensili per attaccare il fronte di scavo, F_{cut} (kN), l'angolo di attrito interno del terreno, φ (°), l'angolo di attacco, o *rake angle*, dello *scraper*, α (°), l'angolo di attrito tra utensili e terreno, φ_{cg} (°), la larghezza media degli *scrapers*, w_{scr} (m), e la coesione del terreno, c (kPa). Il calcolo della penetrazione δ viene esplicitato in seguito.

$$\delta \left(\frac{mm}{rev} \right) = \frac{F_{cut} \cdot (1 + \sin\varphi \cdot \cos 2\xi)}{2,5 \cdot \left(1 + \frac{\cos\left(\frac{\pi}{2} - \alpha\right)}{\sin\left(\frac{\pi}{2} - \alpha\right)} \cdot \tan\varphi_{cg} \right) \cdot w_{scr} \cdot (1 - \sin\varphi \cdot \cos 2\xi) \cdot c \cdot \cos\varphi} \quad (73)$$

Con:

$$\xi = 2\pi - 2\alpha - \varphi_{cg} - \arcsin(\sin\varphi \cdot \sin\varphi_{cg})$$

4.6 Modello di previsione per il sistema di trasporto a coclea

L'importanza del sistema a coclea per controllare la pressione generata all'interno del fronte di scavo è stata ampiamente discussa. La necessità di poter prevedere la coppia agente su di essa in funzione delle velocità di rotazione necessaria è perciò evidente, così come il poter correlare tale velocità all'avanzamento della macchina. A tal fine, 2 modelli di previsione sono stati individuati, entrambi caratterizzati da un grado di complessità che richiede la conoscenza dettagliata della geometria della vite, non sempre disponibile in modo completo.

I due modelli risalgono al 2008 e al 2014. La velocità di rotazione della coclea viene espressa in rivoluzioni/min, o rev/min. La coppia agente sulla vite viene espressa in kN·m.

4.6.1 Li et al. (2014)

Il modello pubblicato nel 2014 da Li et al. mette in evidenza il legame teorico tra variazione della pressione all'interno della camera di scavo e velocità di rotazione della coclea. Per farlo, la formula indicata richiede che la geometria della vite utilizzata sia nota, in modo da poter calcolare la portata volumetrica al suo interno, in funzione della sua velocità di rotazione. Il modello proposto viene esplicito in seguito.

$$v_{screw} (rev/min) = 2 \cdot \pi \cdot \frac{\left(A \cdot v_{adv} - \frac{V_c \cdot \Delta P_c \cdot v_{adv}}{E_s \cdot l} \right)}{\frac{\pi}{4} \cdot (d_{screw}^2 - d_{shaft}^2) \cdot p \cdot \eta} \quad (74)$$

Essendo v_{adv} (mm/min) l'avanzamento istantaneo della macchina, A (m^2) la sezione di scavo, V_c (m^3) il volume della camera di scavo, E_s (kPa) il modulo secante del terreno condizionato, ΔP_c (kPa) la variazione della pressione all'interno della camera di scavo, l (m) la lunghezza di riferimento per la variazione di pressione, d_{screw} (m) il diametro interno del rivestimento della coclea, d_{shaft} (m) il diametro dell'albero della coclea (eventuale), p (m) il passo tra le eliche della coclea, e η l'efficienza volumetrica della coclea.

Questa formula propone il calcolo della velocità di rotazione della coclea in funzione di una variazione di pressione in camera di scavo che avviene con un avanzamento spaziale longitudinale pari a l . Questo parametro può variare in base alle necessità di previsione dei singoli progetti. Il rendimento volumetrico identifica il rapporto tra portata effettiva e portata teorica all'interno della coclea.

4.6.2 Merritt et al. (2008)

Il modello presentato da Merritt et al. nel 2008 offre la possibilità di mettere in relazione la coppia agente sulla coclea con la sua velocità di rotazione, in funzione della portata volumetrica che caratterizza il sistema di trasporto. Per poter applicare questa formulazione, occorre precedentemente utilizzare il modello di Li et al. (2014) per prevedere la velocità di rotazione della coclea sulla base dei parametri meccanici del terreno condizionato. Inoltre, la stessa pubblicazione suggerisce la modalità di calcolo della portata volumetrica, in funzione dell'efficienza volumetrica del sistema. Sulla base di queste considerazioni, la formula ottenuta da Merritt et al. viene esplicitata in seguito.

$$T \text{ (kN} \cdot \text{m)} = \frac{\pi}{2} \cdot d_{screw}^2 \cdot L_{scr} \cdot s_u \cdot \cos\theta \quad (75)$$

Con:

$$\theta = \operatorname{atan}\left(\frac{\tan\phi_f \cdot \frac{Q}{\alpha}}{1 - \frac{Q}{\alpha}}\right)$$

$$Q = \frac{\pi}{4} \cdot (d_{screw}^2 - d_{shaft}^2) \cdot v_{screw} \cdot p \cdot \eta$$

$$\alpha = \frac{\pi}{4} \cdot (d_{screw}^2 - d_{shaft}^2) \cdot \pi \cdot d_{screw} \cdot v_{screw} \cdot \tan\phi_f$$

$$\phi_f = \operatorname{atan}\left(\frac{p}{\pi \cdot d_{screw}}\right)$$

Essendo d_{screw} (m) il diametro interno del rivestimento della coclea, L_{scr} (m) la lunghezza della coclea, s_u (kPa) la coesione non drenata del terreno condizionato, Q (m^3/min) la portata volumetrica secondo Li et al. (2014), p (m) il passo tra le eliche della coclea, d_{shaft} (m) il diametro dell'albero della coclea (eventuale), η l'efficienza volumetrica della coclea, e v_{screw} (rev/min) la velocità di rotazione della coclea.

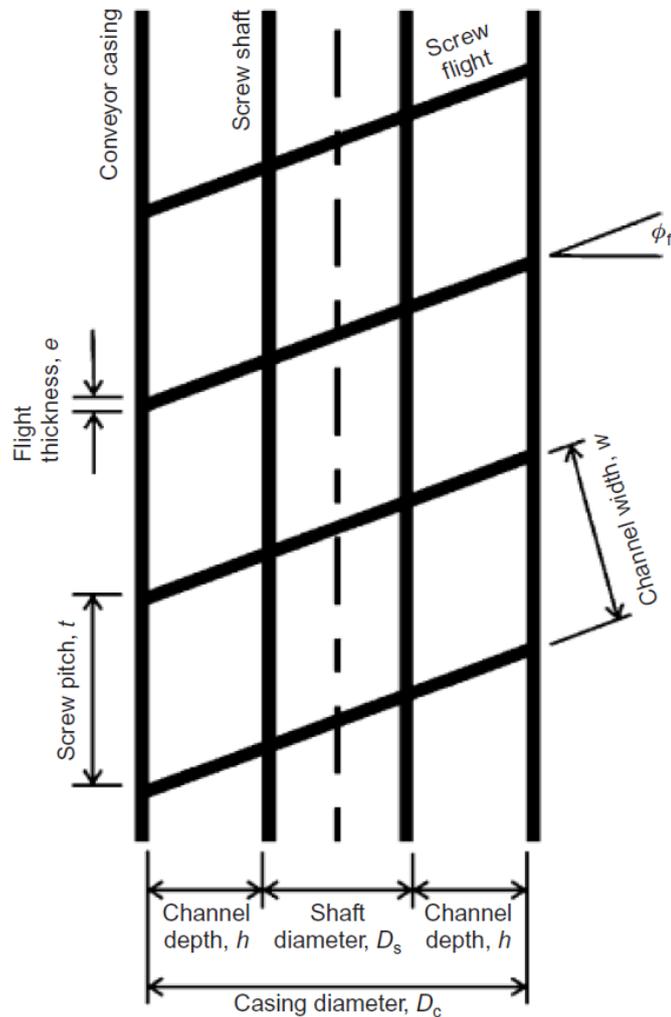


Figura 4-4. Sezione longitudinale schematica di una coclea [23]

Secondo gli autori del modello, l'angolo θ rappresenta "l'angolo di flusso" all'interno della coclea, che sta ad indicare la direzione del materiale in movimento rispetto alla superficie interna del rivestimento. Un valore nullo di tale parametro sta ad indicare l'assenza di movimento longitudinale all'asse della coclea da parte del materiale al suo interno, mentre per $\theta = 90^\circ - \phi_f$ non vi è movimento relativo tra coclea e materiale al suo interno. Nel caso in cui θ

risultasse ancora superiore, si avrebbe un flusso incontrollato attraverso la vite, con il materiale caratterizzato da una velocità di movimento superiore a quella di rotazione della coclea (Merritt et al., 2014).

Osservando le formule mostrate, è possibile notare la dipendenza di θ da Q e da v_{screw} : tali parametri dipendono entrambi dall'efficienza volumetrica del sistema di trasporto. Partendo dal valore medio per l'angolo di flusso suggerito da Merritt et al., è stato perciò possibile ricavare un valore per η su base sperimentale. Considerando un angolo θ pari a 35° , quindi, si è definita un'efficienza volumetrica teorica di 0.7.

4.7 Modello di previsione per l'energia specifica

Sebbene l'energia specifica di scavo relativa all'utilizzo di macchine EPBS sia un parametro di interesse particolare, e dalle potenzialità ancora non del tutto indagate, è stato possibile ritrovare in letteratura tecnica solamente un modello di previsione ad essa dedicato. In particolare, questa formulazione nasce con l'obiettivo di poter confrontare l'efficienza operativa di due diverse macchine, oppure della stessa macchina durante due differenti scavi di gallerie.

Il modello risale al 2011. L'energia specifica viene espressa in MJ/m^3 .

4.7.1 Cardu et al. (2011)

Cardu et al. pubblicano nel 2011 un modello di previsione per l'energia specifica di macchine EPBS utilizzate per scavi di gallerie in terreno, definendone due principali componenti. In particolare, una prima componente viene correlata alla spinta sviluppata dai cilindri idraulici, F (kN), mentre la seconda

è definita in funzione della coppia agente sulla testa fresante, T ($kN \cdot m$), e della sua velocità di rotazione, v_{rpm} (rev/min).

$$E_S \left(\frac{MJ}{m^3} \right) = \frac{F}{A} + \frac{T \cdot v_{rpm}}{A \cdot v_{adv}} \quad (76)$$

Essendo A (m^2) la sezione di scavo, e v_{adv} (mm/min) l'avanzamento istantaneo della macchina.

Tuttavia, a seguito della verifica sperimentale di tale modello sulla base di dati storici, Cardu et al. (2011) reputano la componente relativa alla spinta trascurabile, poiché di molto inferiore rispetto al contributo dato dalla coppia e dalla velocità di rotazione della testa di scavo. Per questo motivo, la formulazione definitiva proposta è quella esplicitata in seguito.

$$E_S \left(\frac{MJ}{m^3} \right) = \frac{T \cdot v_{rpm}}{A \cdot v_{adv}} \quad (77)$$

5. Costruzione del programma di calcolo

5.1 Diagramma di flusso

A seguito dell'individuazione e della raccolta dei modelli previsionali analitici più idonei allo scopo di questa tesi, descritti nel Capitolo 4, la seconda fase di lavoro è stata caratterizzata dalla necessità di analizzare nel dettaglio la struttura del codice in linguaggio Python che avrebbe dovuto dare vita al programma di calcolo. Sebbene l'implementazione informatica dei modelli nella loro versione originale, e la seguente operazione di verifica matematica, abbiano richiesto diverso tempo, la difficoltà principale che ha caratterizzato la programmazione vera e propria va ricondotta alla definizione della struttura più adatta per l'ottimizzazione del programma.

Questa trattazione non si fa carico di descrivere nel dettaglio la stesura del codice informatico, così come non viene approfondito il tema complesso del linguaggio di programmazione Python, obbligatoriamente utilizzato dall'autore per poter sfruttare alcuni codici di calcolo già esistenti, forniti da SWS Engineering (Capitolo 5.3). Tuttavia, è indispensabile poter comprendere concettualmente quale sia la logica utilizzata dal programma per poter eseguire i modelli implementati, in modo da sapere quali dati fornire in ingresso e, di conseguenza, che tipo di risultati attendersi.

A causa della complessità del codice scritto, e poiché la trattazione informatica non rientra nei principali argomenti da sviluppare in questa tesi, il diagramma di flusso presentato non rispecchia la struttura dettagliata del programma, tuttavia permette di comprenderne i principali passaggi logici in modo sufficientemente chiaro da interpretare correttamente i risultati ottenuti.

È necessario tener presente che il flusso logico sviluppato prevede la possibilità di considerare diverse progressive di scavo di una galleria, a patto che i dati in ingresso necessari alle formulazioni vengano inseriti per ciascuna di esse. Questo significa che è possibile prevedere i parametri di scavo stabilendo un intervallo spaziale, più o meno regolare, con cui suddividere l'estensione longitudinale dell'opera, potendo utilizzare i risultati ottenibili dai modelli più complessi per analizzare le diverse formazioni geologiche che eventualmente si prevede di attraversare.

In relazione al diagramma di flusso presentato, è possibile notare come il programma esegua i modelli implementati secondo una sequenza precisa, saltando l'esecuzione di una formulazione qualora i dati necessari per quel singolo modello non fossero presenti. L'ordine di esecuzione delle formule implementate è stato definito in modo tale da permettere l'utilizzo di quelle che richiedono in ingresso alcuni parametri restituiti da altre come risultato. In altre parole, i primi modelli ad essere eseguiti sono quelli per cui i dati inseribili dall'utilizzatore sono sufficienti; i risultati ottenuti vengono successivamente forniti come dati in ingresso a quei modelli per cui sono necessari.

L'esecuzione del programma si interrompe non appena i modelli implementati vengono complessivamente eseguiti o saltati (per mancanza di dati), e non ci sono successive progressive da considerare. A questo punto, è possibile leggere i risultati ottenuti nell'interfaccia utilizzata dal programma per la stampa a video, distinguendo i vari parametri di scavo previsti, e potendo riconoscere chiaramente il modello da cui i diversi risultati sono stati ottenuti. Sebbene non esplicitato all'interno del diagramma di flusso, è possibile indicare nel codice informatico dei pesi matematici da attribuire ai diversi risultati per il calcolo di un valore medio, al fine di poter mettere in evidenza un singolo valore in uscita per ogni tipo di parametro.

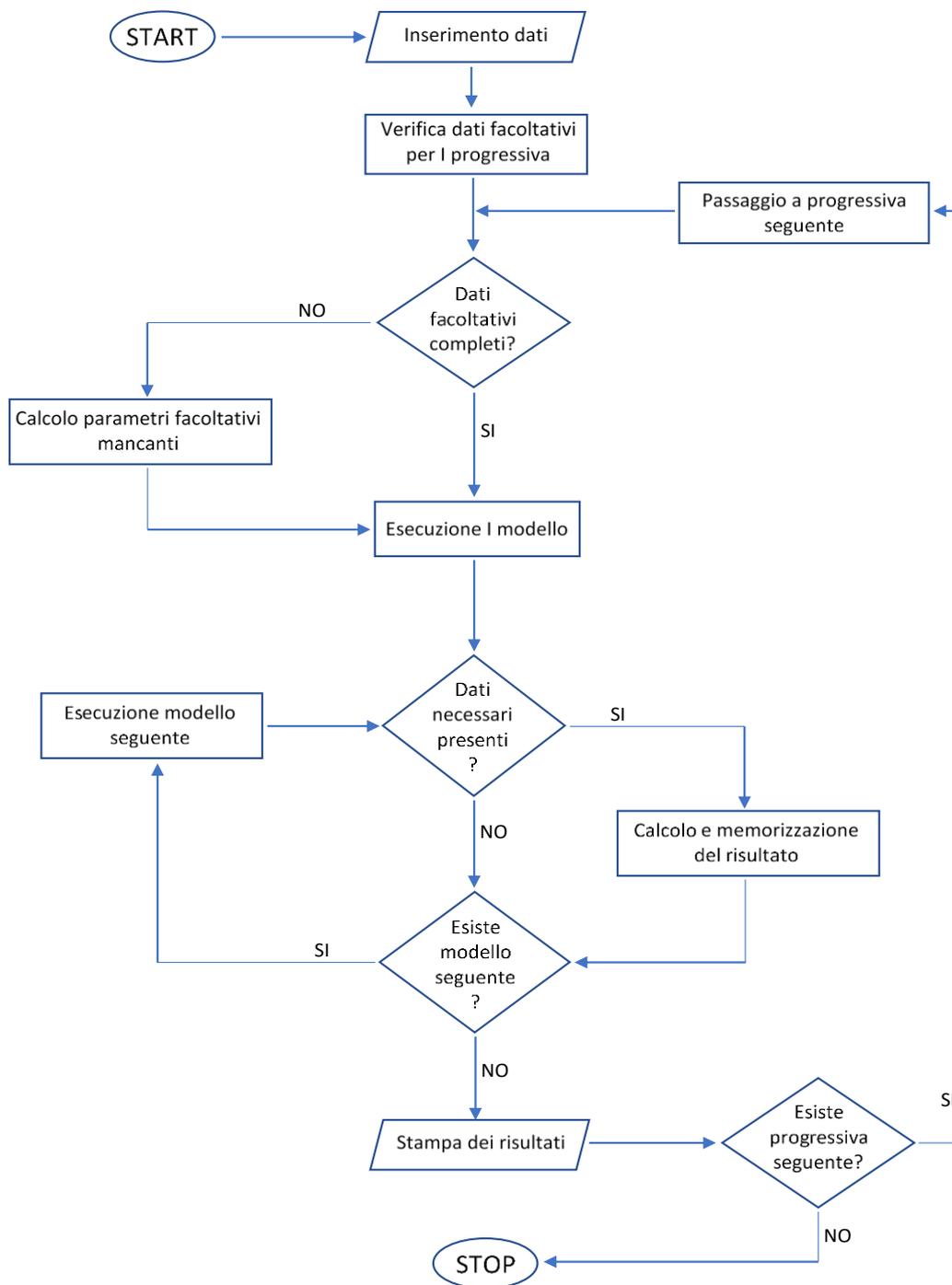


Figura 5-1. Diagramma di flusso rappresentativo delle principali fasi di operatività del programma di calcolo sviluppato

5.1.1 Sequenza di esecuzione dei modelli implementati

Una volta effettuato l'eventuale calcolo dei parametri mancanti, il programma procede con l'esecuzione in sequenza dei modelli implementati, in modo da saltare quelli per cui i dati iniziali sono insufficienti, e per poter avere a disposizione risultati da utilizzare come *input* per i modelli successivi. Tenendo a mente tale necessità, si è scelto di eseguire inizialmente quei modelli di previsione della spinta per i quali tutti i dati necessari sono più facilmente a disposizione. In particolare, i primi modelli di calcolo che vengono considerati sono: Ates et al. (2013), Krause (1987), JSCE (2007), Maidl et al. (2012), e Wang et al. (2012). Nel caso di quest'ultimo, la formulazione eseguita in questa fase non comprende la correzione suggerita dagli autori per considerare gli aspetti dinamici dello scavo (Capitolo 4.1.7), che verrà riconsiderata più avanti, con tutti i dati necessari potenzialmente a disposizione. Dopo l'esecuzione di questi primi modelli, il programma considera quelli relativi al calcolo della coppia di Ates et al. (2013), Maidl et al. (2012), JSCE (2007), e Godinez et al. (2015).

Da qui in avanti iniziano ad essere necessari alcuni parametri di scavo, ottenibili per mezzo della previsione dovuta all'utilizzo di formulazioni implementate nel programma. Per questo motivo, si passa all'esecuzione dei modelli per il calcolo della velocità massima di rotazione della testa fresante, in modo da poter successivamente utilizzare questo parametro nelle formule che lo richiedono. Il programma, quindi, esegue, se possibile, i modelli di Bilgin et al. (2013) e di Burger (Herrenknecht AG) (2016), considerando successivamente la definizione di un valore medio per la velocità di rotazione, sulla base dei due risultati ottenuti. Il valore risultante viene utilizzato in seguito come dato per le formulazioni successive. Il programma prosegue con il calcolo dell'avanzamento, utilizzando il modello di Burger (Herrenknecht AG) (2016), per ottenere come risultato l'avanzamento istantaneo, da poter utilizzare in seguito come dato in ingresso, oltre che come risultato della previsione. Subito

dopo, viene eseguito il modello di Bilgin et al. (2014), per la previsione dell'avanzamento rispetto alla realizzazione complessiva della galleria.

Con i dati a disposizione di velocità di rotazione della testa di scavo e di avanzamento, il programma è quindi in grado di eseguire il modello di Wang et al. (2012), applicando le correzioni per la definizione della spinta sulla base di parametri dinamici. Avendo a disposizione avanzamento e velocità di rotazione, anche il modello A di Bilgin et al. (2014) per la previsione della penetrazione può essere eseguito, restituendo un valore da poter successivamente utilizzare all'interno delle formulazioni successive. A questo punto, il programma prosegue con le formulazioni per il calcolo della spinta non ancora utilizzate, ovvero il modello di Wittke et al. (2007), il modello di Zhang et al. (2013) per fronte di scavo omogeneo, e quello di Zhang et al. (2013) per fronte di scavo stratificato. Quindi, avendo considerato tutti i modelli di calcolo della spinta implementati, il programma utilizza i diversi risultati ottenuti per restituire un valore medio, sulla base di pesi definibili all'interno del codice informatico. In questo modo, è possibile ottenere un valore di spinta, immediatamente utilizzabile dal modello B di Bilgin et al. (2014), per il calcolo della penetrazione.

A seguire, vengono calcolati i restanti modelli di previsione della coppia: Ates et al. (2013) in funzione della spinta, Zhang et al. (2013) per fronte di scavo omogeneo, e Zhang et al. (2013) per fronte di scavo stratificato. Come per la spinta, anche per la coppia viene calcolato un valore medio, pesato sulla base di tutti i risultati. Gli ultimi passi di questa sequenza sono caratterizzati dall'esecuzione di Li et al. (2014) per il calcolo della velocità di rotazione della coclea, sia in caso di variazione di pressione in camera di scavo, sia nel caso di pressione da mantenere costante, e dal calcolo della coppia agente sulla coclea con Merritt et al. (2008). L'ultimo modello eseguibile è quello di Cardu et al. (2011) per la previsione dell'energia specifica.

5.1.2 Calcolo della spinta agente sul singolo utensile

I modelli di Wittke et al. (2007) per la previsione della spinta e di Bilgin et al. (2014) per il calcolo della penetrazione, versione B, richiedono entrambi il dato in ingresso relativo alla forza agente sul singolo utensile, normale al fronte di scavo. Nel caso tale valore non fosse a disposizione tra i dati di *input*, il programma è in grado di calcolarlo, utilizzando una formulazione di Labanov e Joanknecht (1980), tratta dalla pubblicazione di Bilgin et al. (2014). Essa prevede il calcolo di questa forza in funzione dell'angolo di attrito tra utensile e terreno, δ ($^{\circ}$), della penetrazione, p (m/rev), della larghezza dell'utensile, w (m), dell'angolo di attrito interno del terreno, φ ($^{\circ}$), della coesione del terreno, c (kPa), e del *rake angle* dell'utensile, α (rad).

$$F_{tool} = 2.5 \cdot \left[1 + \cot\left(\frac{\pi}{2} - \alpha\right) \cdot \tan\delta \right] \cdot p \cdot w \cdot \frac{1 - \sin\varphi \cdot \cos 2\xi}{1 + \sin\varphi \cdot \cos 2\xi} \cdot c \cdot \cos\varphi \quad (78)$$

$$\xi = 2\pi - 2\alpha - \delta - \arcsin(\sin\varphi \cdot \sin\delta)$$

La necessità di conoscere la previsione relativa alla penetrazione comporta il posizionamento dei modelli di Wittke et al. (2007) e di Bilgin et al. (2014), versione B, nel punto della sequenza descritto nel Capitolo 5.1.1. Risulta evidente come questa formulazione consideri il contributo di questa forza trascurabile, qualora le attività di scavo interessino l'attraversamento di formazioni del tutto prive di coesione.

5.2 Dati in ingresso

Come evidente dalla descrizione dei vari modelli utilizzati condotta nel Capitolo 4, i parametri in ingresso necessari per le operazioni di calcolo sono numerosi, per quanto la complessità delle formulazioni sia di varia natura. Per meglio identificare tutti i dati richiesti al fine di eseguire il programma di calcolo nella sua completezza, è utile definire una suddivisione in funzione degli ambiti di appartenenza di tali parametri. In questo modo, è più facile identificarne la natura fisica e inserire valori che, se non realmente a disposizione, possono essere ragionevolmente ipotizzati.

I dati da impiegare in ingresso sono stati suddivisi in obbligatori e facoltativi, sebbene tutti siano necessari per poter eseguire il programma senza che nessuno dei modelli implementati venga saltato. La differenza tra queste definizioni ricade nella capacità o meno del programma di risalire ad alcuni dati mancanti, sfruttando quelli a disposizione. Questo sta ad indicare che i dati indicati come facoltativi, qualora non inseriti, vengono calcolati dallo stesso programma che li richiede in ingresso, a patto che i parametri obbligatori necessari siano stati correttamente inseriti.

Nel caso in cui alcuni parametri identificati come obbligatori non fossero disponibili, il loro mancato inserimento comporterebbe la mancata esecuzione di quei modelli che ne richiedono la presenza in ingresso. Per questo motivo, qualora uno di questi parametri fosse di valore nullo, occorre specificare tale valore nell'interfaccia di inserimento dati, in modo da non impedire l'esecuzione dei modelli che ne prevedono la lettura. Al contrario, i dati definiti come facoltativi possono venire omessi durante l'inserimento, senza impedire direttamente l'esecuzione di alcun modello. Tuttavia, è doveroso sottolineare come tale possibilità sia stata prevista unicamente per sopperire dove possibile all'eventuale mancanza di dati, utilizzando codici di calcolo che fanno

riferimento a metodi semplificati, dai risultati non sempre di globale applicabilità.

Siccome il programma sviluppato non è in grado di verificare la correttezza del dato inserito in relazione all'unità di misura utilizzata, l'operazione di scrittura di tali parametri richiede all'esecutore la giusta attenzione, con la consapevolezza che eventuali risultati fisicamente discutibili potrebbero richiedere la revisione dei dati inseriti proprio dal punto di vista del loro significato fisico. In ogni caso, l'interfaccia utilizzata per l'inserimento dei parametri necessari identifica con chiarezza l'unità di misura attesa dal programma di calcolo. Nel seguito di questo Capitolo, il termine "facoltativo" viene specificato nel caso in cui il dato in elenco possa essere omesso, senza comportare la mancata esecuzione di alcun modello.

5.2.1 Parametri macchina

Dopo l'inserimento dell'identificativo numerico relativo alla progressiva di scavo considerata, i primi dati richiesti dal programma riguardano in particolare le caratteristiche strutturali della macchina utilizzata. Tali parametri, per forza di cose tutti obbligatori e non calcolabili dal programma, sono i seguenti:

- Diametro testa di scavo (m)
- Spessore testa di scavo (m)
- Apertura (-)
- Lunghezza scudo (m)
- Numero spazzole di coda (-)
- Lunghezza di contatto tra conci e spazzole di coda (m)
- Spessore lama dello scudo (m) facoltativo
- Resistenza di picco del terreno (kN/m²) facoltativo
- Volume camera di scavo (m³)

- Diametro esterno anello di rivestimento (m)
- Peso anello di rivestimento (kN)
- Peso *backup* (kN)
- Peso macchina (kN)

Per quanto la resistenza di picco alla penetrazione del terreno sia in realtà un parametro geotecnico, essa viene collocata immediatamente in seguito allo spessore della lama dello scudo, poiché i modelli che considerano la componente di spinta dovuta alla penetrazione dello scudo nel terreno considerano questi due parametri insieme. Per il valore della resistenza di picco del terreno, qualora non disponibile da altre fonti, è possibile utilizzare la Tabella 5-1. È doveroso sottolineare che la mancata specificazione della resistenza di picco e dello spessore della lama dello scudo, parametri facoltativi, fa sì che la componente di spinta a loro relativa venga trascurata, e non ne comporta il calcolo indiretto.

Altri dati, sempre relativi alle caratteristiche meccaniche della macchina utilizzata, vengono tuttavia raggruppati all'interno di categorie differenti: tale separazione è stata ideata unicamente al fine di agevolare le operazioni di inserimento dei parametri necessari al programma, potendo identificare i vari dati richiesti in relazione a una certa locazione fisica sulla macchina, nonché ad alcuni modelli relativi ad uno specifico parametro di scavo.

Tabella 5-1. Resistenza di picco del terreno, in funzione delle sue proprietà geotecniche (Herzog 1985) [19]

Soil type	Peak resistance p_{Sch} [kN/m ²]
rock-type soil	12.000
gravel	7.000
sand, densely consolidated	6.000
sand, medium consolidated	4.000
sand, loosely consolidated	2.000
marl	3.000
Tertiary clay	1.000
silt, Quaternary clay	400

5.2.2 Parametri geotecnici e geometrici

All'interno di questa categoria vengono identificati tutti quei dati in grado di fornire al programma un modello geotecnico e geometrico della formazione geologica attraversata, sempre mantenendo una stretta relazione con la progressiva di scavo considerata. I dati richiesti sono i seguenti:

- Quota s.l.m. piano campagna (m)
- Quota s.l.m. asse della galleria (m)
- Copertura rispetto alla calotta (m) facoltativo
- Quota s.l.m. superficie piezometrica (m)
- Tensione radiale media (kPa) facoltativo
- Peso degli edifici (kPa)
- Carichi applicati (kPa)
- Pressione di supporto al fronte (kPa) facoltativo
- Pressione media in camera di scavo (kPa) facoltativo

- Rapporto tra pressione sul fronte e sul retro della testa fresante (-)
- Pressione in calotta (kPa) facoltativo
- Pressione quota arco rovescio (kPa) facoltativo
- Adesione argilla - metallo (kPa)
- Coesione non drenata (kPa) facoltativo
- Peso specifico terreno condizionato (kN/m^3)
- Coefficiente di rigonfiamento (-)

Grazie a un'interfaccia di inserimento separata, il programma è in grado di valutare un'eventuale stratificazione in direzione verticale, relativamente alla sezione di scavo valutata. A tal fine, è possibile inserire anche la quota s.l.m. del limite superiore e inferiore di ciascuno strato, indicandone i parametri geotecnici seguenti:

- Modulo di Young (kPa)
- Coefficiente di Poisson (-)
- Angolo di attrito interno ($^{\circ}$)
- Coesione (kPa)
- Peso specifico del terreno (kN/m^3)
- Saturazione
- Impermeabilità
- Rapporto di sovra-consolidazione (-)

I dati relativi a saturazione e impermeabilità richiedono solamente di specificare il valore 1 in caso di positività, oppure il valore 0 in caso di negatività. In altre parole, in questa fase occorre solamente indicare se lo strato si trova, o non si trova, sotto la quota piezometrica, e se si tratta di uno strato impermeabile, oppure no.

5.2.3 Dati della coclea

Nel caso dei dati relativi alla geometria della coclea installata sulla macchina EPBS, il loro accorpamento visivo ha sì il compito di facilitare l'operazione di inserimento dei dati, ma vuole implicitamente ricordare, inoltre, che il mancato inserimento impedirebbe al programma di eseguire quei modelli riguardanti la previsione dei parametri operativi legati alla vite, senza comportare esclusioni ulteriori. I dati necessari alle formulazioni relative alla coclea vengono elencati in seguito, tutti non calcolabili dal programma:

- Diametro interno della coclea (m)
- Diametro albero della coclea (m)
- Lunghezza della coclea (m)
- Efficienza volumetrica della coclea (m)
- Inclinazione della coclea rispetto alla direzione orizzontale (°)
- Passo tra le eliche della coclea (mm)
- Spessore delle eliche (m)
- Variazione di pressione voluta in camera di scavo (kPa)
- Avanzamento di riferimento (m)
- Modulo secante del terreno condizionato (kPa)

Gli ultimi 3 dati specificati sono riconducibili a parametri operativi, tuttavia, come specificato in precedenza, il loro accorpamento assieme ai dati geometrici della coclea sta ad indicare come essi siano necessari solamente per l'esecuzione dei modelli relativi all'operatività del sistema di trasporto a vite. L'efficienza volumetrica richiesta dal modello di Li et al. (2014) viene definita in questa trattazione come il rapporto tra la portata effettiva della coclea e quella teorica, tenendo presente che il valore di tale rapporto può essere talvolta superiore all'unità. Come anticipato nel Capitolo 4.6.2, in questa trattazione per questo parametro viene considerato il valore teorico di 0.7.

$$\eta = \frac{Q_{eff}}{Q_{teo}} = 0.7 \quad (79)$$

5.2.4 Barre miscelatrici e supporti

Le caratteristiche relative alle barre miscelatrici presenti in camera di scavo, nonché quelle dei supporti che connettono la testa di scavo ai motori che ne permettono il movimento, vengono accorpate separatamente dai parametri attribuiti alla struttura della macchina. Questa scelta è stata compiuta in relazione alla loro locazione e al rapporto di interazione diretta con il terreno condizionato, all'interno della camera di scavo. I dati richiesti in inserimento sono:

- Numero di barre miscelatrici (-)
- Numero di supporti della testa fresante (-)
- Lunghezza media delle barre miscelatrici (m)
- Lunghezza media dei supporti (m)
- Distanza media tra barre miscelatrici e asse galleria (m)
- Distanza media tra supporti e asse galleria (m)
- Dimensione trasversale media delle barre miscelatrici (m)
- Dimensione trasversale media dei supporti (m)

5.2.5 Coefficienti di attrito

Tutti i coefficienti di attrito richiesti dal programma sono ovviamente obbligatori, non ricavabili indirettamente. In particolare, i dati richiesti sono:

- Coefficiente di attrito *backup* – rotaie (-)
- Coefficiente di attrito spazzole di coda – conci (-)

- Coefficiente di attrito barre miscelatrici – terreno condizionato (-)
- Angolo di attrito utensile – terreno (°)
- Coefficiente di attrito testa di scavo – terreno condizionato (-)
- Coefficiente di attrito dinamico testa di scavo – terreno (-)
- Coefficiente di attrito scudo – terreno (-)
- Coefficiente di attrito terreno – aperture testa di scavo (-)
- Coefficiente di attrito lato testa di scavo – terreno (-)

Risulta evidente come i diversi modelli implementati considerino meccaniche differenti e parametri non sempre comuni, soprattutto osservando la diversa natura dei coefficienti di attrito richiesti. Sebbene con alcuni dati sia stato possibile attribuire un'identificazione univoca, nel caso dei coefficienti di attrito si è preferito mantenere la distinzione originale, permettendo all'utilizzatore del programma di inserire i dati secondo la propria personale interpretazione. Qualora non fosse possibile conoscere la natura dei coefficienti di attrito, in particolare tra terreno e scudo della macchina, è possibile utilizzare la Tabella 5-2.

Tabella 5-2. Coefficienti di attrito tra superficie dello scudo e terreno (Herzog 1985) [19]

soil	coefficient of friction μ
gravel	0.55
sand	0.45
loam, marl	0.35
silt	0.30
clay	0.20

5.2.6 Utensili e parametri operativi

Per quanto riguarda gli utensili, i dati da inserire sono i seguenti:

- Lunghezza media degli *scrapers* (mm)
- Larghezza media degli *scrapers* (m)
- Numero di *scrapers* (m)
- Superficie di contatto singolo utensile (m²)
- Carico normale sul singolo utensile (kN) facoltativo
- Velocità massima dell'utensile più esterno (m/min) facoltativo
- *Rake angle* (°)

Poiché i modelli considerati riguardano macchine EPBS utilizzate in terreni, l'utilizzo di utensili a disco viene trascurato, e solo i dati relativi agli utensili da terreno vengono ritenuti rilevanti.

Gli ultimi dati richiesti dal modello vengono convenzionalmente identificati come parametri operativi, e si tratta di:

- Pressione laterale in fase di curvatura (kPa)
- Lunghezza della galleria (m)
- Ore lavorative totali (h)
- Tempo di utilizzazione della macchina, MUT (-)
- Numero di anelli installati al giorno (day⁻¹)

Nel caso si volesse trascurare la pressione aggiuntiva dovuta alla spinta dello scudo sul terreno in fase di curvatura, considerando un sovrascavo da parte della testa fresante (Maidl et al., 2012), è possibile farlo indicando il valore nullo per tale dato. Non essendo un parametro facoltativo, infatti, la sua omissione comporterebbe l'esclusione di quei modelli che lo prevedono come dato in ingresso.

5.3 L'interfaccia di inserimento dati

Per poter fornire al programma i dati necessari, si è deciso di adottare come interfaccia di inserimento un file .xlsx, nominato come "input_data.xlsx". Questa scelta è stata dettata dalla necessità di rendere accessibile il modello analitico creato senza dover obbligatoriamente conoscere le basi del linguaggio informatico Python. Il programma sviluppato è in grado di accedere al documento, ricercando in particolare due fogli di lavoro da cui reperire i dati in ingresso. Nel primo di questi fogli, nominato "parameters", vengono richiesti tutti i dati comuni alla progressiva di scavo considerata, visivamente accorpata come descritto nel Capitolo 5.2, comprendendo quindi i parametri macchina, alcuni parametri geotecnici e geometrici, i dati relativi alla coclea, agli utensili e alle barre miscelatrici, i parametri operativi, e i coefficienti di attrito. Nel secondo foglio, nominato "layers", viene richiesto l'inserimento dei dati geotecnici in funzione della stratigrafia considerata. In questo particolare caso, ogni riga di dati corrisponde ad uno strato, attribuito alla progressiva di riferimento in base alla numerazione inserita nella prima colonna, e i parametri k_0 , k_a , e il modulo di taglio vengono calcolati direttamente sul foglio del file "input_data.xlsx".

La particolarità di questa interfaccia di inserimento, comune ad entrambi i fogli, è la possibilità di inserire i dati per più progressive di scavo, in modo da poter analizzare l'intera lunghezza della galleria solamente con un'unica esecuzione del programma. Come visto, infatti, il modello costruito è in grado di eseguire tutti i modelli implementati (in funzione dei dati inseriti) per più progressive di scavo. Dal punto di vista pratico, la differenza tra i due fogli di lavoro risiede nell'orientamento verticale del primo, e in quello orizzontale del secondo. Perciò, nel foglio "parameters", l'aggiunta di una colonna di dati sulla destra dev'essere attribuita ad una nuova progressiva di scavo, mentre, nel foglio "layers", l'aggiunta di una riga verso il basso può essere usata per inserire dati relativi ad un nuovo strato appartenente alla stessa progressiva

considerata, oppure può essere usata per specificare una nuova sezione di scavo, inserendo tutti gli strati ad essa relativi.

Come è possibile osservare dalle immagini presentate, l'interfaccia di inserimento è scritta in inglese, conformemente alla lingua utilizzata per la scrittura del codice informatico. Inoltre, per distinguere i parametri obbligatori da quelli facoltativi, si è deciso di adottare un sistema di indicazione grafico, utilizzando il colore verde per identificare quei dati la cui omissione non comporta la mancata esecuzione dei modelli, o, nel caso del foglio "layers", i valori direttamente calcolati all'interno del file .xlsx. Il file "input_data.xlsx" presenta un terzo foglio di lavoro, sconnesso dal programma di calcolo, nominato "comments". Questo spazio viene utilizzato per specificare alcune linee guida relative alle modalità di inserimento dei dati, nonché per suggerire alcuni valori forniti dalla letteratura tecnica, utilizzabili qualora alcuni parametri non fossero noti.

Parameter	Value
3 change_id	1
4 cutterhead diameter [m]	7,76
5 cutterhead thickness [m]	0,5
6 opening ratio [-]	0,38
7 shield length [m]	7,68
8 tail brushes number [-]	3
9 brushes-segment contact length [m]	1
10 blade's thickness (shield at face) [m]	0,15
11 soil's peak resistance [kN/m2]	7000
12 bulk chamber volume [m3]	70,94
13 ring external diameter [m]	7,48
14 ring width [m]	1,4
15 ring weight [kN]	170
16 backup weight [kN]	5700
17 machine weight (shield zone) [kN]	6000
18 surface height (see level) [m]	200
19 tunnel axis height (see level) [m]	180
20 overburden (top) [m]	100
21 water table height (see level) [m]	0
22 average radial stress [kPa]	0
23 building vertical load [kPa]	0
24 applied vertical loads [kPa]	0
25 face support pressure [kPa]	0,8
26 average pressure inside bulk chamber [kPa]	0,8
27 bulk chamber internal-external pressure ratio [-]	0
28 crown bulk chamber pressure [kPa]	0
29 invert bulk chamber pressure [kPa]	0,7
30 clay-steel adhesion [kPa]	0,2
31 undrained shear strength [kPa]	8
32 screw conveyor diameter [m]	0,7
33 screw conveyor shaft diameter [m]	0,2
34 screw conveyor length [m]	8
35 screw conveyor volumetric efficiency [-]	0,7

Figura 5-2. Immagine relativa all'interfaccia di inserimento dati, foglio "parameters"

chainage_id	top height [m]	base height [m]	Young's modulus [kPa]	Poisson's ratio [-]	gamma [kN/m ³]	phi [°]	c [kPa]	u [kPa]	gamma	wet	imp	OCR
1	200	0	150000	0.3	57692,30769	40	0	0,35721	0,21744	21	0	0
2	200	0	20000	0.3	7692,307692	30	20	0,5	0,33333	21	0	0
3	200	0	10000	0.3	3846,153846	35	30	0,42642	0,27099	19	0	1

Figura 5-3. Immagine relativa all'interfaccia di inserimento dati, foglio "layers"

5.4 L'interfaccia di stampa dei risultati

Una volta eseguiti i modelli, completati i cicli di calcolo e analizzate tutte le progressive indicate nel file "input_data.xlsx", il programma è in grado di stampare a video i risultati ottenuti su un nuovo file .xlsx, nominato "epb_performance.xlsx". Anche in questo caso, l'interfaccia di stampa dei risultati viene creata con più fogli di lavoro, ognuno dei quali viene attribuito ad un unico parametro di scavo, risultato dei modelli previsionali eseguiti. All'interno di ogni foglio, la prima riga viene utilizzata per indicare i nomi dei modelli implementati, al di sotto dei quali, in colonna, compariranno i risultati ottenuti, relativi a ciascuna progressiva di scavo considerata. In ogni foglio di lavoro del file "epb_performance.xlsx", ogni riga fa riferimento ad una diversa progressiva di scavo, identificata dal valore numerico indicato nella prima colonna, corrispondente a quello fornito nel file "input_data.xlsx".

Qualora i dati in ingresso non fossero sufficienti per l'esecuzione di un particolare modello, nell'interfaccia di stampa dei risultati il nome del modello in questione sarebbe comunque visibile, ma le celle sottostanti risulterebbero vuote.

5.5 Calcolo dei parametri facoltativi, e supporto di SWS Engineering

Come accennato all'inizio del Capitolo 5.1, la scelta del linguaggio di programmazione Python è dovuta soprattutto alla possibilità di sfruttare codici di calcolo già esistenti, in modo da poter ottenere alcuni dati eventualmente non a disposizione. A tal fine, il supporto di SWS Engineering nella fase di scrittura del codice informatico è stato fondamentale, avendo concesso all'autore l'accesso ai server della Società e la possibilità di utilizzare parti di

codice utili al calcolo di alcuni parametri, richiesti in ingresso dal programma in fase di definizione.

I codici di proprietà di SWS Engineering sono stati utilizzati, per esempio, per il calcolo della tensione radiale media, approssimata come tensione laterale a quota asse galleria, così come suggerito da [13], per l'omogeneizzazione geotecnica degli strati relativi alle diverse progressive, e per il calcolo della pressione di sostegno al fronte. In riferimento a quest'ultimo esempio, il calcolo della spinta viene compiuto secondo il modello di Broms e Bennemark (1967) [14], che è stato studiato per l'applicabilità in terreni coesivi e saturi, condizione non rispettata dal programma soggetto di questa tesi. Per questo motivo, è giusto nuovamente sottolineare come questi codici di calcolo impliciti all'interno del programma siano stati previsti per fornire dei dati fondamentali, unicamente qualora questi non possano essere disponibili. Questa soluzione è stata adottata per poter comunque ottenere dei risultati realistici, interpretabili al fine di valutare l'applicabilità dell'intero programma di calcolo.

Il senso dei parametri definiti facoltativi, quindi, è quello di permettere all'utilizzatore del programma di riconoscere, in fase di inserimento dati, quali tra quelli debbano essere necessariamente inseriti e quali no. Per questo motivo è necessario aver chiaro che, tra i parametri che è possibile omettere, ce ne sono alcuni che il programma calcola o approssima attraverso modelli semplificati, utilizzati solamente per ottenere un dato indicativo da poter utilizzare per la completa esecuzione dei modelli.

6. Analisi dei risultati e ottimizzazione del programma di calcolo

6.1 Verifica del codice e dei modelli implementati

Terminata la scrittura del codice informatico sulla base del diagramma di flusso presentato nel Capitolo 5.1, si è reso necessario verificarne la correttezza sia in termini logici che matematici, al fine di valutare l'applicabilità del programma creato. Per portare a termine tale operazione, sono stati specificati i dati in ingresso necessari, utilizzando l'interfaccia di inserimento descritta nel Capitolo 5.3, in modo da validare, ed eventualmente correggere, i processi logici del programma. Una volta assicurata la corretta esecuzione di tutti i modelli implementati, sulla base delle diverse progressive specificate e della stratificazione indicata, è stato possibile analizzare i risultati ottenuti, in modo da interpretare matematicamente i valori restituiti dalle formulazioni.

I parametri iniziali scelti per il lavoro di verifica sono stati raccolti sulla base di dati storici cortesemente offerti all'autore, completati con le specifiche geotecniche raccolte su www.geotechdata.info [12], in relazione alla classificazione dei terreni stabilita da USCS (*Unified Soil Classification System*). I dati d'esempio mostrati in Tabella 6-1 e 6-2, in riferimento ad uno strato geologico definibile su base granulometrica come ghiaia sabbiosa, sono relativi ad una delle diverse esecuzioni compiute per validare il programma.

Tabella 6-1. Dati di input teorici per la verifica delle formule implementate all'interno del programma di calcolo, foglio "parameters"

Dati in input per foglio "parameters"	
Parametro	Valore
Progressiva di riferimento	1
Diametro testa di scavo (m)	7.76
Spessore testa di scavo (m)	0.5
Apertura (-)	0.38
Lunghezza scudo (m)	7.68
Numero di spazzole di coda (-)	3
Lunghezza di contatto tra spazzole di coda e conci (m)	1
Spessore lama dello scudo (m)	0.15
Resistenza di picco del terreno alla penetrazione (kPa)	7000
Volume camera di scavo (m ³)	70.94
Diametro esterno anello di rivestimento (m)	7.48
Profondità anello di rivestimento (m)	1.4
Peso anello di rivestimento (kN)	170
Peso <i>backup</i> (kN)	5700
Peso della macchina (zona scudo) (kN)	6000
Quota s.l.m. piano campagna (m)	200
Quota s.l.m. asse galleria (m)	180
Copertura (rispetto calotta) (m)	
Quota piezometrica s.l.m. (m)	100
Tensione radiale media (kPa)	
Peso edifici (kPa)	0
Carichi applicati (kPa)	0
Pressione di supporto al fronte (kPa)	
Pressione media in camera di scavo (kPa)	

Dati in input per foglio “parameters”	
Parametro	Valore
Rapporto tra pressione media sul retro e sul fronte della testa di scavo (-)	0.8
Pressione quota calotta (kPa)	
Pressione quota arco rovescio (kPa)	
Adesione argilla – scudo (kPa)	0
Coesione non drenata (kPa)	
Diametro interno coclea (m)	0,7
Diametro albero coclea (m)	0,2
Lunghezza coclea (m)	8
Efficienza volumetrica coclea (-)	0.7
Passo tra eliche (mm)	700
Spessore delle eliche (m)	0.03
Variazione di pressione in camera di scavo (kPa)	0
Distanza di riferimento (m)	1.4
Modulo secante del terreno condizionato (kPa)	50000
Numero di barre miscelatrici (-)	5
Numero di supporti per la testa fresante (-)	4
Lunghezza media barre miscelatrici (m)	0.7
Lunghezza media supporti (m)	1.5
Distanza media tra barre miscelatrici e asse della galleria (m)	3
Distanza media tra supporti e asse della galleria (m)	0.5
Dimensione trasversale media barre miscelatrici (m)	0.25
Dimensione trasversale media supporti (m)	0.3
Coefficiente di attrito backup (-)	0.2
Coefficiente di attrito spazzole di coda – conci (-)	0.3

Dati in input per foglio “parameters”	
Parametro	Valore
Coefficiente di attrito barre miscelatrici – terreno condizionato (-)	0.2
Angolo di attrito utensile – terreno (°)	28
Coefficiente di attrito retro della testa fresante – terreno condizionato (-)	0.2
Coefficiente di attrito dinamico testa fresante – terreno (-)	0.4
Coefficiente di attrito terreno – scudo (-)	0.45
Coefficiente di attrito terreno condizionato – aperture (-)	0.35
Coefficiente di attrito dinamico lato della testa fresante – terreno (-)	0.45
Lunghezza media <i>scrapers</i> (mm)	150
Larghezza media <i>scrapers</i> (m)	0.1
Numero di <i>scrapers</i> (-)	200
Superficie di contatto utensile – terreno (m²)	0.03
Carico normale su singolo utensile (kN)	
Velocità tangenziale massima dell’utensile esterno (m/min)	
<i>Rake angle</i> (°)	30
Pressione laterale in fase di curvatura (kPa)	0
Lunghezza galleria (m)	1700
Ore lavorative totali (h)	6000
<i>Machine Utilization Time</i> (-)	0.45
Numero di anelli per giorno (day⁻¹)	10

Tabella 6-2. Dati di input teorici per la verifica delle formule implementate all'interno del programma di calcolo, foglio "layers"

Dati in input per foglio "layers"	
Parametro	Valore
Progressiva di riferimento	1
Quota s.l.m. limite superiore dello strato (m)	200
Quota s.l.m. limite inferiore dello strato (m)	0
Modulo di Young (kPa)	150000
Coefficiente di Poisson (-)	0.3
Modulo elastico di taglio (kPa)	57692
Angolo di attrito interno (°)	40
Coesione (kPa)	0
K_0 (-)	0.36
K_a (-)	0.22
Peso specifico del terreno (kN/m³)	21
Saturazione	0
Impermeabilità	0
OCR	1

Conformemente con la grafica dell'interfaccia di inserimento dei dati, le tabelle mostrano in verde i dati il cui inserimento non risulta obbligatorio, e, nel caso del foglio "layers", quelli che vengono calcolati direttamente all'interno del file "input_data.xlsx". A causa della complessità di alcuni modelli implementati all'interno del programma, diversi parametri si sono dovuti ipotizzare, sulla base della personale esperienza dell'autore, o per mezzo di esempi tratti dalla letteratura tecnica consultata per la realizzazione di questa tesi. I valori in questione vengono rappresentati in grigio, in modo da poter essere distinti dai dati reali avuti a disposizione.

L'adozione di dati approssimati e ipotizzati è stata fondamentale per poter verificare il corretto funzionamento del programma, nonché per l'ottenimento di risultati in grado di confermare la validità dell'implementazione matematica portata a termine. Per mezzo dei valori indicati nelle precedenti tabelle, infatti, è stato possibile intervenire con le dovute correzioni, laddove errori nella scrittura del codice provocavano risultati caratterizzati da un ordine di grandezza dissimile da quello atteso. A seguito delle dovute modifiche al codice, e con l'ottenimento di risultati consoni alla situazione di scavo ipotizzata per i dati iniziali, si è deciso di procedere con un'operazione di confronto tra i risultati dei diversi modelli implementati, anche in funzione di geologie differenti, eseguendo i calcoli di previsione, oltre che per ghiaia sabbiosa, anche per sabbia limosa e sabbia argillosa. I dati iniziali e i risultati di questo confronto vengono discussi nel Capitolo 6.2.

6.1.1 Formazione geologica stratificata

Come indicato nel Capitolo 5.3, è possibile definire un modello geometrico della formazione attraversata che consideri anche un'eventuale stratificazione, specificando le quote di riferimento dei limiti superiori e inferiori, in riferimento alla sezione di scavo considerata. Tramite alcuni codici di calcolo forniti da SWS Engineering, il programma è in grado di utilizzare dei parametri geotecnici equivalenti, ovvero calcolati in considerazione delle proprietà meccaniche dei diversi strati presenti. Nel caso in cui la stratificazione risulti finanche sulla sezione interessata dallo scavo della galleria, è possibile ottenere dei risultati per la previsione di spinta e coppia sulla base dei modelli di Zhang et al. (2013), studiati proprio per il caso di fronte di scavo stratificato. Per verificare la corretta implementazione dei modelli in caso di stratificazione, sono stati considerati tre diversi strati: ghiaia sabbiosa, sabbia limosa, sabbia argillosa. A titolo d'esempio, in Tabella 6-3 vengono riportati i valori utilizzati per definire

uno dei modelli geometrici utilizzati per la validazione. I restanti dati utilizzati in ingresso sono mostrati in Appendice 2.

Tabella 6-3. Dati identificativi del modello geometrico utilizzato per validare il programma di calcolo in caso di formazione stratificata

Modello geometrico stratificato			
Parametro	Ghiaia sabbiosa	Sabbia limosa	Sabbia argillosa
Quota s.l.m. superiore (m)	200	182	178
Quota s.l.m. inferiore (m)	182	178	0
Modulo di Young (kPa)	150000	20000	10000
Coefficiente di Poisson (-)	0,3	0,3	0,3
Modulo elastico di taglio (kPa)	57692	7692	3846
φ (°)	40	30	35
Coesione (kPa)	0	20	30
k_0 (-)	0,36	0,5	0,43
k_a (-)	0,22	0,33	0,27
γ (kN/m³)	21	21	19
Saturo	0	0	0
Impermeabile	0	0	1
OCR	1	1	1

6.1.2 Condizioni da rispettare per la validità del modello

Prima di affrontare l'analisi dettagliata dei risultati in funzione dei dati indicati in ingresso, è necessario soffermarsi su alcuni aspetti da tenere a mente nella compilazione del file "input_data.xlsx", in modo da non rischiare valori in uscita errati a causa di dati iniziali non correttamente impiegati dal programma.

Occorre considerare che il codice di calcolo utilizzato per la valutazione della spinta di sostegno al fronte restituisce valore nullo in caso di coesione superiore ai 32 kPa , ritenendo il fronte caratterizzato da un'autoportanza sufficiente ad evitare cedimenti e collassi. Nel caso fosse necessario considerare valori di coesione più elevati, quindi, è doveroso indicare esplicitamente l'eventuale spinta di sostegno applicata, rammentando che tale pratica è consigliata ogni qualvolta questo parametro sia a disposizione dell'utilizzatore.

La seconda importante osservazione è relativa alla profondità della galleria da realizzare, per cui si vuole ottenere una previsione dei principali parametri di scavo. Anche inserendo i dati in modo completo, infatti, le formule implementate all'interno del programma fanno riferimento a gallerie superficiali, e non sono in grado di restituire risultati tenendo conto di un eventuale effetto ad arco (o effetto Terzaghi). Questo modello di previsione, quindi, viene considerato applicabile unicamente per la progettazione di gallerie superficiali, ritenendo rispettata tale condizione per una copertura massima pari, o poco superiore, a 2 volte la misura del diametro di scavo.

6.2 Analisi dei risultati e confronto tra le diverse previsioni

Sebbene alcuni dati in ingresso siano stati obbligatoriamente scelti sulla base di ipotesi e approssimazioni, si è posta particolare attenzione nell'utilizzare

valori riconducibili il più possibile a situazioni di scavo reali, in modo da poter garantire un significato fisico ai risultati ottenuti. Sulla base di questa intenzione, le previsioni dei parametri di scavo, ottenute attraverso l'esecuzione del programma, sono state analizzate per studiare le principali differenze tra i modelli implementati, al fine di comprenderne l'eventuale applicabilità, e di capire in che modo ottenere la restituzione di un solo valore per ogni tipo di parametro.

6.2.1 Risultati in funzione del solo diametro di scavo

Come ampiamente discusso nel Capitolo 4, alcuni modelli di previsione per i valori di spinta e coppia massima si basano su una trattazione unicamente empirica, che ha permesso di legare determinati valori di questi parametri alla sola specificazione del diametro di scavo. Per poter comprendere in che modo sfruttare tali formulazioni di previsione nell'ambito della creazione di un unico programma di calcolo, il primo passo compiuto è stato il confronto di questi risultati tra loro, in modo da capire fino a che punto le previsioni così ottenute possano essere affidabili, e utilizzabili come riferimento per valutare l'attendibilità dei modelli più complessi. Avendo convenzionalmente scelto un intervallo di valori per il diametro di scavo compreso tra i 4 e i 18 metri, unendo alla coerenza con le dimensioni tipiche per le gallerie in terreni l'attuale tendenza all'uso di diametri sempre maggiori, i risultati ottenuti con i modelli eseguibili senza altri dati in ingresso sono mostrati in Appendice 1, mentre il confronto tra i valori previsti dai diversi modelli viene rappresentato graficamente in seguito.

Osservando i valori di spinta massima ottenuti, rappresentati nel Grafico 6-1, il primo aspetto che risulta evidente riguarda il diverso andamento del modello proposto da Ates et al. (2013), rispetto a quello di Krause (1987) e quello di Szechy (1969), al contrario accumulati da una simile proporzionalità

tra spinta e diametro. Tuttavia, il modello proposto da Szechy comporta una previsione caratterizzata da valori costantemente inferiori a quello che Krause sostiene essere il limite minimo per la spinta installata su macchine EPBS in terreni. Questa considerazione porta in questa fase a ritenere i risultati forniti dalla formulazione di Szechy rischiosi, a causa della loro distanza dai valori più elevati che Krause e Ates et al. indicano con i loro modelli. È bene tener presente, infatti, come l'installazione di una potenza non sufficiente a garantire una certa spinta laddove richiesta possa comportare l'interruzione dei lavori, mentre una sopravvalutazione di tali parametri in fase progettuale assicuri la completa realizzazione dell'opera, per quanto un sovradimensionamento si traduca in costi di cantierizzazione superiori.

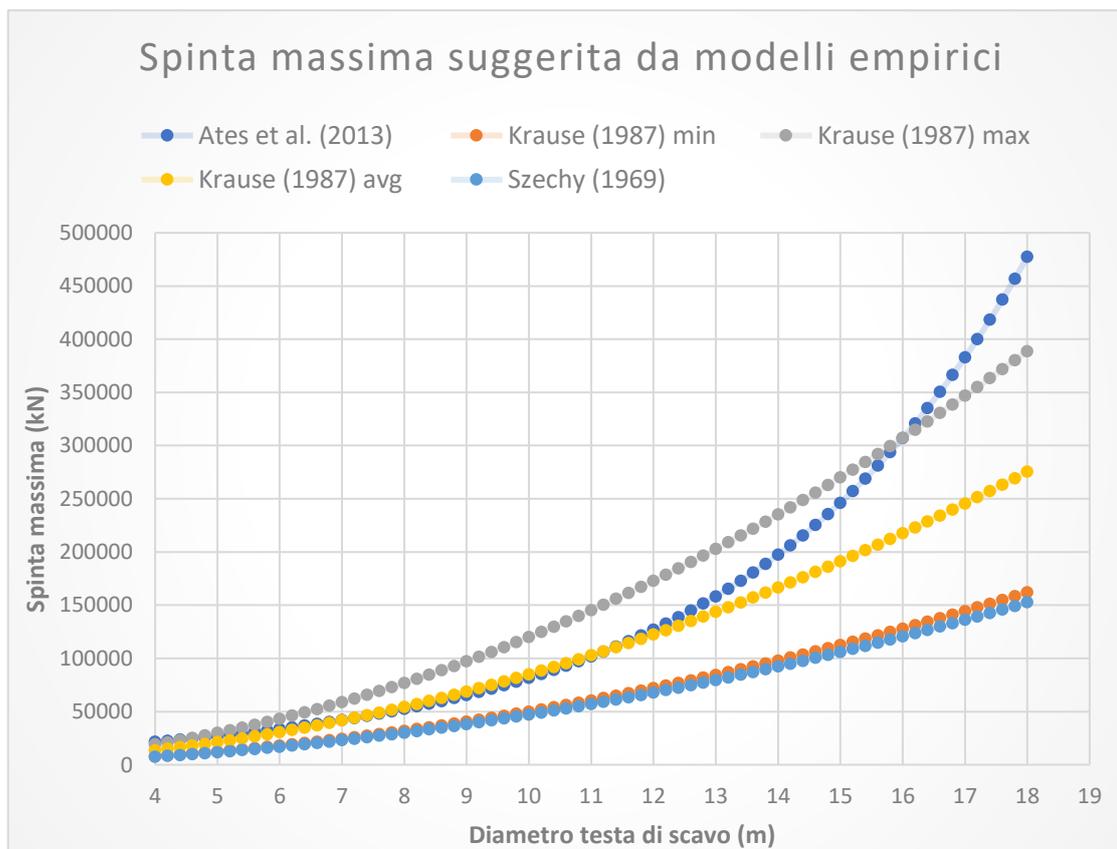


Grafico 6-1. Risultati ottenuti per la spinta in funzione del solo diametro di scavo

Per quanto riguarda la previsione della coppia massima, dal Grafico 6-2 è possibile notare come i modelli considerati abbiano un andamento simile tra loro, restituendo risultati che si attestano tra la previsione media e massima definita da JSCE (2007). Questo assestamento su valori caratterizzati da un ordine di grandezza simile, se confrontato con i risultati dei modelli ottenuti per la previsione della spinta in funzione del diametro, rende evidente come la coppia massima agente sulla testa di scavo sia fortemente legata alla dimensione di quest'ultima, essendo dovuta agli attriti che si sviluppano su di essa. Sebbene occorra certamente proseguire con la valutazione dei modelli più complessi implementati nel programma di calcolo, a seguito di questa prima analisi è possibile appoggiare l'interpretazione di Maidl et al. (2013) (Capitolo 4.2.1), secondo cui l'ipotizzare una coppia massima in funzione unicamente del diametro di scavo, sulla base di dati empirici, può fornire valori caratterizzati da un'attendibilità adatta per una prima fase di progettazione della macchina EPBS.

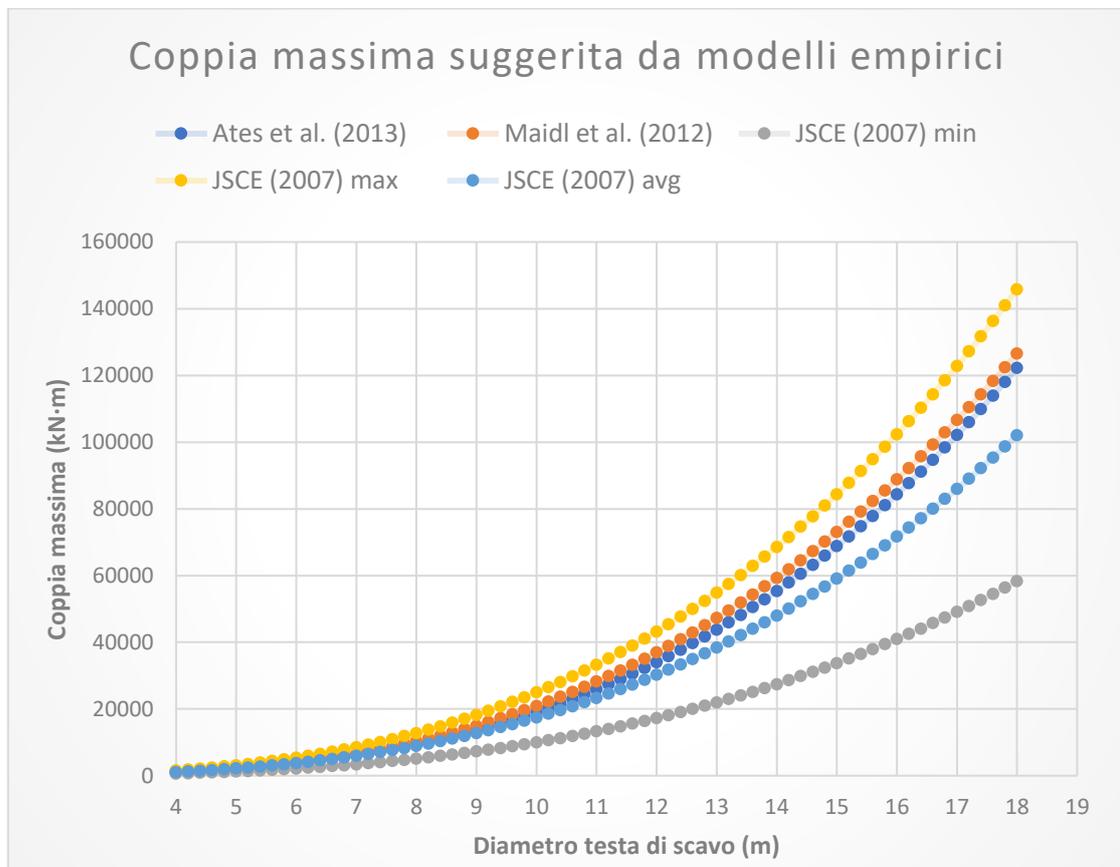


Grafico 6-2. Risultati ottenuti per la coppia in funzione del solo diametro di scavo

Sulla base di questa prima fase di confronto, è possibile sostenere come il legame tra coppia e diametro di scavo sia abbastanza forte da permettere una prima previsione attendibile, al contrario della spinta massima, per cui occorre necessariamente approfondire lo studio per mezzo di modelli più complessi. Tuttavia, occorre verificare tale interpretazione analizzando i risultati ottenuti dalle formulazioni che considerano parametri geotecnici anche per il calcolo della coppia agente sulla testa fresante.

6.2.2 Analisi dei risultati per attraversamento di ghiaie sabbiose

L'utilizzo di parametri geotecnici come dati iniziali, da affiancare alle specifiche strutturali della macchina EPBS considerata, è dunque necessario per l'esecuzione dei modelli di previsione più complessi, che non si accontentano di valutare i principali parametri di scavo solamente su base empirica. A tal fine, una prima esecuzione completa del programma di calcolo è stata portata avanti valutando un'unica sezione di scavo attraverso uno strato di ghiaia sabbiosa, impiegando come dati in ingresso gli stessi valori specificati in Tabella 6-1 e Tabella 6-2 (Capitolo 6.1). Considerando un fronte omogeneo e la realizzazione di una galleria al di sopra della quota piezometrica, si è descritto al programma un modello geometrico fittizio tramite l'inserimento di ipotetiche quote nel file "input_data.xlsx". L'esecuzione delle formule implementate ha permesso una seconda fase di analisi dei dati, in relazione all'utilizzo di parametri geotecnici. Suddividendo i dati ottenuti in funzione della natura fisica dei parametri previsti, è possibile innanzitutto osservare le principali differenze tra i risultati dei diversi modelli, utilizzando questo iniziale confronto per poter capire quanto i valori siano lontani tra di loro.

Nel caso della previsione della spinta, la Tabella 6-4 e il Grafico 6-3 mostrano come tutti i modelli implementati permettano di ottenere risultati compresi all'interno dei limiti indicati da Krause (1987), ad eccezione di Szechy (1969) (come già osservato nel Capitolo 6.2.1). Inoltre, si può notare come i risultati possano essere compresi all'interno di due gruppi, uno che si attesta nell'intorno del valore mediano tra i limiti considerati, l'altro molto più vicino al limite inferiore. Per quanto riguarda la previsione della coppia agente sulla testa fresante, i risultati sono riportati in Tabella 6-5 e rappresentati con il Grafico 6-4, dal quale è possibile osservare come alcuni valori siano sensibilmente maggiori rispetto al limite massimo suggerito dalle linee guida della JSCE (2007). In particolare, i risultati dei due modelli di Zhang et al. (2013) mostrano come tali formulazioni richiedano un approfondimento in merito alla loro struttura

concettuale, per capire se e come debbano essere corrette per poter ottenere valori più simili a quelli suggeriti dai modelli degli altri autori.

Tabella 6-4. Risultati ottenuti per spinta attraverso ghiaia sabbiosa

Risultati di previsione per spinta attraverso ghiaia sabbiosa	
Modello	Risultato
Ates et al. (2013) (kN)	49779
Krause min (1987) (kN)	30109
Krause max (1987) (kN)	72261
Krause avg (1987) (kN)	51185
Szechy (1969) (kN)	28377
Wittke et al. (2007) (kN)	31085
JSCE (2007) (kN)	35983
Maidl et al. (2012) (kN)	51045
Wang et al. (2012) (kN)	31990
Wang et al. (2012), dinamico (kN)	34876
Zhang et al. (2013) (kN)	46485
Zhang et al. (2013), fronte stratificato (kN)	47687

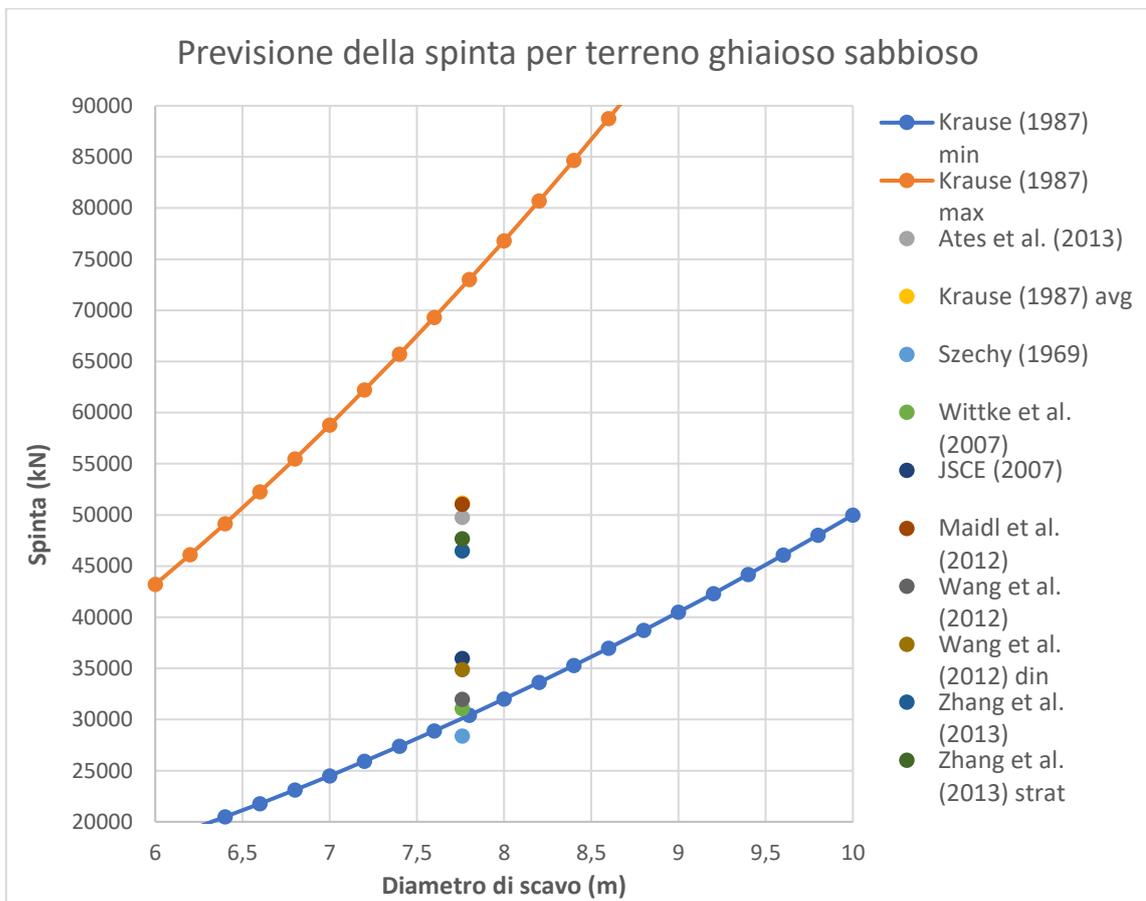


Grafico 6-3. Risultati ottenuti per la spinta attraverso ghiaia sabbiosa

Tabella 6-5. Risultati ottenuti per coppia attraverso ghiaia sabbiosa

Risultati di previsione per coppia attraverso ghiaia sabbiosa	
Modello	Risultato
Ates et al. (2013) (kN·m)	8609
Maidl et al. (2012) (kN·m)	9319
JSCE avg (2007) (kN·m)	8178
JSCE min (2007) (kN·m)	4673
JSCE max (2007) (kN·m)	11682

Risultati di previsione per coppia attraverso ghiaia sabbiosa	
Modello	Risultato
Godinez et al. (2015) (kN·m)	10981
Xiong et al. (2009) (kN·m)	13308
Wang et al. (2012) (kN·m)	7953
Ates et al. (2013), in funzione della spinta (kN·m)	6660
Zhang et al. (2013) (kN·m)	31372
Zhang et al. (2013), fronte stratificato (kN·m)	26873

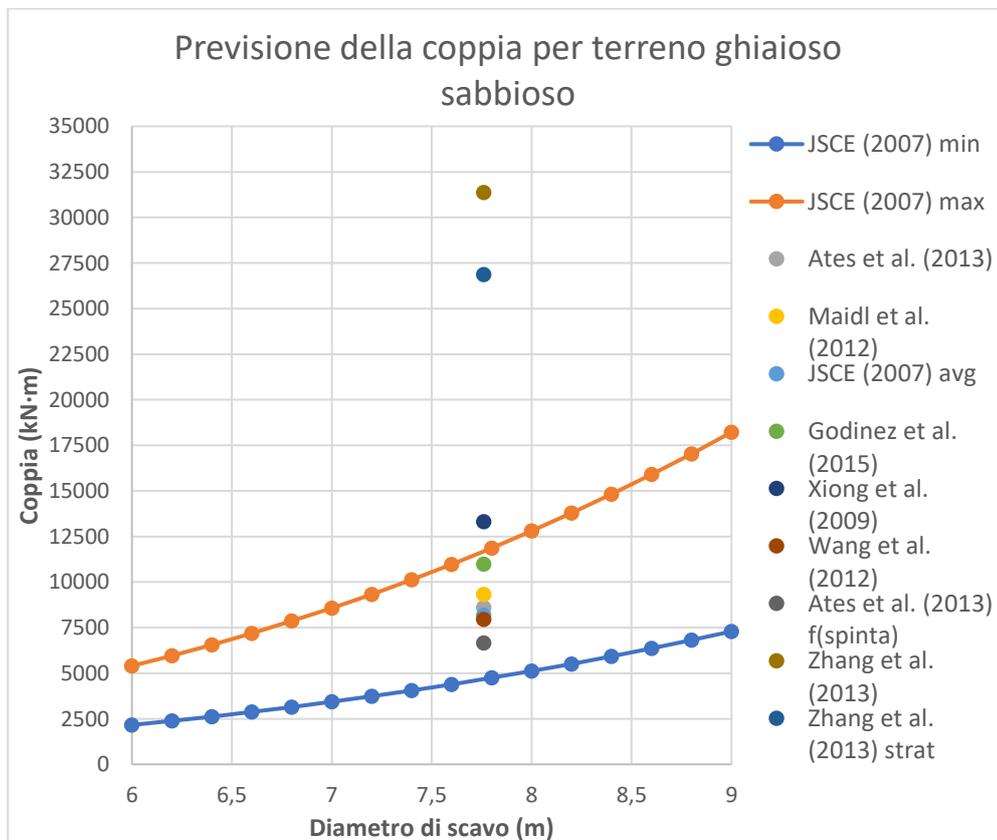


Grafico 6-4. Risultati ottenuti per coppia attraverso ghiaia sabbiosa

Considerando l'avanzamento, i due modelli utilizzati restituiscono valori nettamente diversi, tuttavia in linea con le aspettative. Se il modello di Burger (Herrenknecht AG) (2016) considera empiricamente quale dovrebbe essere l'avanzamento istantaneo della macchina utilizzata, quello di Bilgin et al. (2014) tiene in considerazione lo scavo complessivo della galleria, in funzione del tempo di utilizzazione della macchina EPBS. È dunque giusto che questo secondo valore risulti inferiore rispetto al primo. Non avendo altri riferimenti per un confronto approfondito, questi due modelli vengono considerati validi, sebbene occorra verificarne l'applicabilità ricorrendo a dati storici. Le stesse considerazioni possono essere mosse nei confronti dei risultati ottenuti per la previsione della velocità di rotazione della testa fresante. I valori riportati in tabella 6-6 sono il risultato di modelli puramente empirici, non confrontabili dal punto di vista fisico, e, per questo motivo, ai modelli che richiedono tale parametro come dato in ingresso viene fornito il loro valore medio.

Tabella 6-6. Risultati ottenuti per velocità di avanzamento attraverso ghiaia sabbiosa

Risultati di previsione per avanzamento attraverso ghiaia sabbiosa	
Modello	Risultato
Burger (Herrenknecht AG) (2016) (mm/min)	40,9
Bilgin et al. (2014) (mm/min)	21,0

Tabella 6-7. Risultati ottenuti per velocità di rotazione della testa fresante

Risultati di previsione per velocità di rotazione della testa di scavo in attraverso ghiaia sabbiosa	
Modello	Risultato
Bilgin et al. (2013) (rev/min)	1,9
Burger (Herrenknecht AG) (2016) (rev/min)	1,6
Valore medio (rev/min)	1,7

Nel caso dei modelli per la previsione dei parametri relativi alla rotazione della coclea, influenzata dalle caratteristiche del materiale trasportato e dalle dimensioni del sistema di trasporto, è interessante effettuare un'ulteriore analisi, ipotizzando la necessità di una variazione di pressione all'interno della camera di scavo entro un certo avanzamento. Per questo motivo, in riferimento ai dati in tabella 6-1 (Capitolo 6.1), viene considerato un avanzamento pari allo spessore dell'anello di rivestimento, $1,4\text{ m}$, e una variazione di pressione in camera di scavo pari a 0 kPa , a $+ 300\text{ kPa}$, e a $- 300\text{ kPa}$, eseguendo il calcolo ipotizzando tre diverse progressive di scavo. I dati ottenuti sono riportati in Tabella 6-8, e permettono di notare come la velocità di rotazione si modifichi in modo inversamente proporzionale rispetto alla variazione di pressione. Questo comportamento è certamente in linea con la teoria che caratterizza la modalità operativa del sistema di trasporto a coclea sulle macchine EPBS, ma, non avendo a disposizione risultati da formulazioni diverse, anche per questi parametri si rende necessaria una verifica tramite confronto con dati storici.

Tabella 6-8. Risultati ottenuti per parametri della coclea attraverso ghiaia sabbiosa

Risultati di previsione per parametri della coclea attraverso ghiaia sabbiosa			
Modello	Pressione costante	+300 kPa	-300 kPa
Merritt et al. (2008) (kN·m)	49	49	49
Li et al. (2014) (rev/min)	70,2	69,7	70,6
Li et al. (2014), $\Delta p = 0$ (rev/min)	70,2	70,2	70,2

Infine, per la previsione dell'energia specifica l'implementazione di un solo modello non consente l'esposizione di osservazioni critiche, in grado di valutarne l'applicabilità. Anche in questo caso, occorrerebbe valutare i risultati sulla base di dati storici, confrontandone i valori con quelli riferiti ad una situazione di scavo reale.

Tabella 6-9. Risultati ottenuti per energia specifica attraverso ghiaia sabbiosa

Risultati di previsione per energia specifica attraverso ghiaia sabbiosa	
Modello	Risultato
Cardu et al. (2011) (MJ/m³)	7,77

6.2.3 Confronto tra i risultati per formazioni geologiche differenti

Alcuni dei modelli utilizzati prevedono formulazioni concettualmente diverse in funzione dei parametri geotecnici considerati. Per poter completare l'analisi dei risultati e per intervenire eventualmente con miglioramenti, è stato necessario ipotizzare l'attraversamento di formazioni caratterizzate da proprietà meccaniche diverse, con l'obiettivo di osservare i risultati delle previsioni relativamente allo scavo attraverso geologie differenti. A tal fine, sono state considerate tre progressive di scavo, localizzate all'interno dello stesso modello geometrico fittizio valutato in precedenza, caratterizzate da un fronte di scavo in ghiaia sabbiosa, un fronte di scavo in sabbia limosa, e un fronte di scavo in sabbia argillosa. I parametri geotecnici utilizzati sono stati reperiti consultando il sito www.geotechdata.info [12], in relazione alla classificazione proposta da USCS, e possono essere visionati in Tabella 6-3 (Capitolo 6.1.1). I dati di input utilizzati vengono complessivamente mostrati in Appendice 2, avendo mantenuto gli stessi parametri strutturali e meccanici della macchina EPBS ipotizzata in precedenza.

Poiché l'interesse di questo confronto è relativo solamente a quei parametri direttamente dipendenti dalla conformazione fisica del fronte di scavo, e dalle interazioni tra macchina e terreno circostante, in questa fase di analisi non vengono considerati quei modelli di previsione basati su studi empirici, i cui risultati vengono ottenuti solamente in funzione del diametro di scavo. Per questo motivo, i valori previsti per avanzamento e velocità di rotazione della testa fresante non vengono discussi, non subendo variazioni qualora si consideri, come in questo caso, uno stesso diametro.

Andando ad analizzare i risultati ottenuti con i modelli di previsione influenzati dalla diversità di caratteristiche meccaniche, appare evidente come per spinta e coppia vi sia una tendenza generale alla diminuzione con l'affrontare terreni via via più ricchi di fini. Tuttavia, non tutte le formulazioni

presentano risultati caratterizzati da andamenti comuni, sottolineando la diversa natura fisica delle componenti considerate dai vari modelli, o la loro diversa concezione a livello analitico. In riferimento alla previsione della spinta, osservando il Grafico 6-5 si può notare come i due modelli di Wang et al. (2012) portino a valori molto bassi non appena la presenza di fini comporta l'esistenza di una debole coesione: tale previsione può risultare apparentemente poco attendibile, a causa della distanza rispetto ai valori dati dagli altri modelli, nonché per la lontananza dai limiti suggeriti dalle formulazioni empiriche.

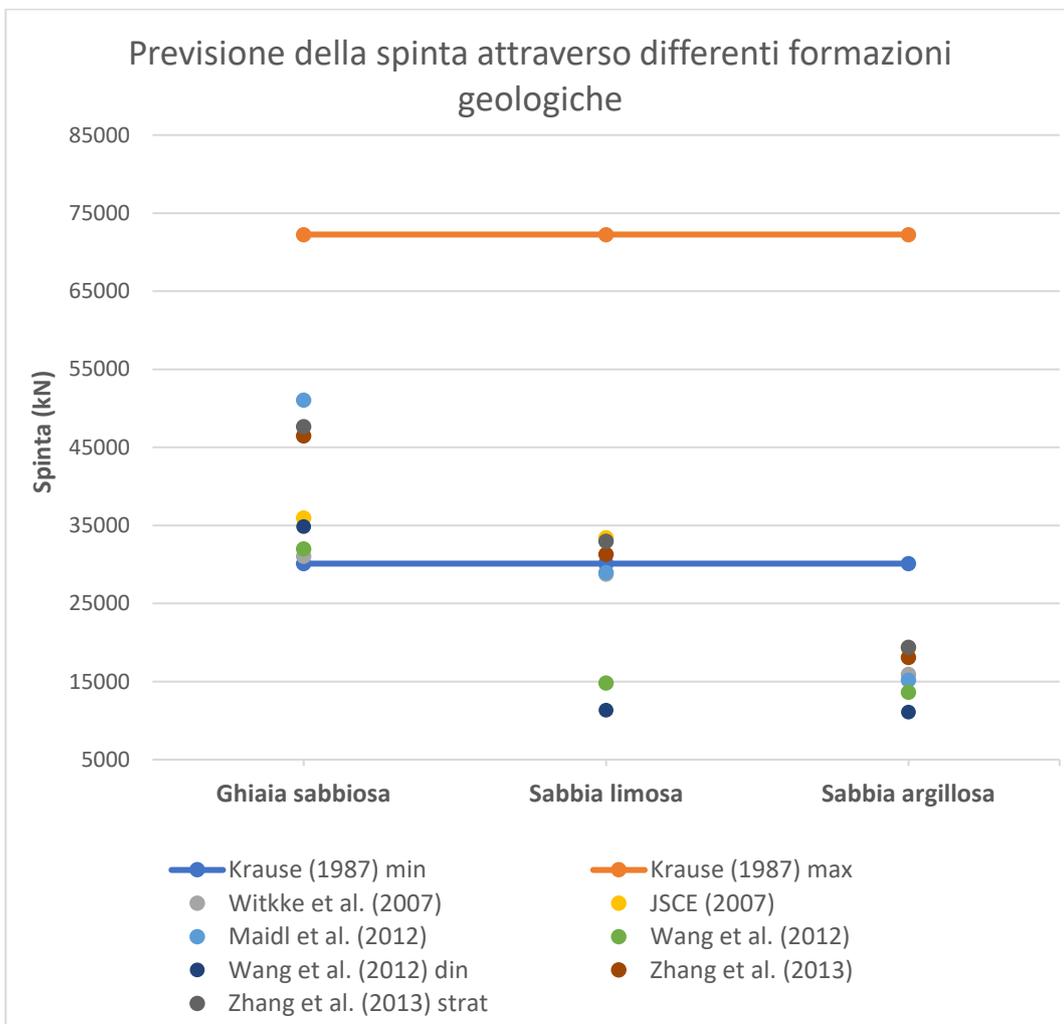


Grafico 6-5. Confronto tra i risultati per spinta attraverso differenti formazioni geologiche

Nel caso della coppia agente sulla testa di scavo, si può notare come i due modelli presentati da Zhang et al. (2013), che per la previsione in ghiaia sabbiosa hanno portato a risultati fuori dal coro, con la presenza di una certa coesione tornino velocemente ad uniformarsi con i valori ottenuti dalle altre formulazioni. L'unica anomalia che risulta dal confronto tra le previsioni, ottenute in relazione alle tre diverse formazioni, è data dal modello di Godinez et al. (2015), che, in controcorrente con tutte le altre formulazioni, non è caratterizzato da una costante tendenza alla diminuzione con il crescere del contenuto di fini. Infatti, si può notare dal Grafico 6-6 come il valore di coppia risultante dal modello di Godinez et al. nel caso di sabbia limosa sia superiore a quello relativo all'attraversamento di ghiaie sabbiose. Nonostante la controtendenza rispetto agli altri risultati, tale risultato è analiticamente esatto, perché dipende dalle tensioni laterali a quota asse della galleria, superiori nel caso delle sabbie limose a causa del k_a considerato.

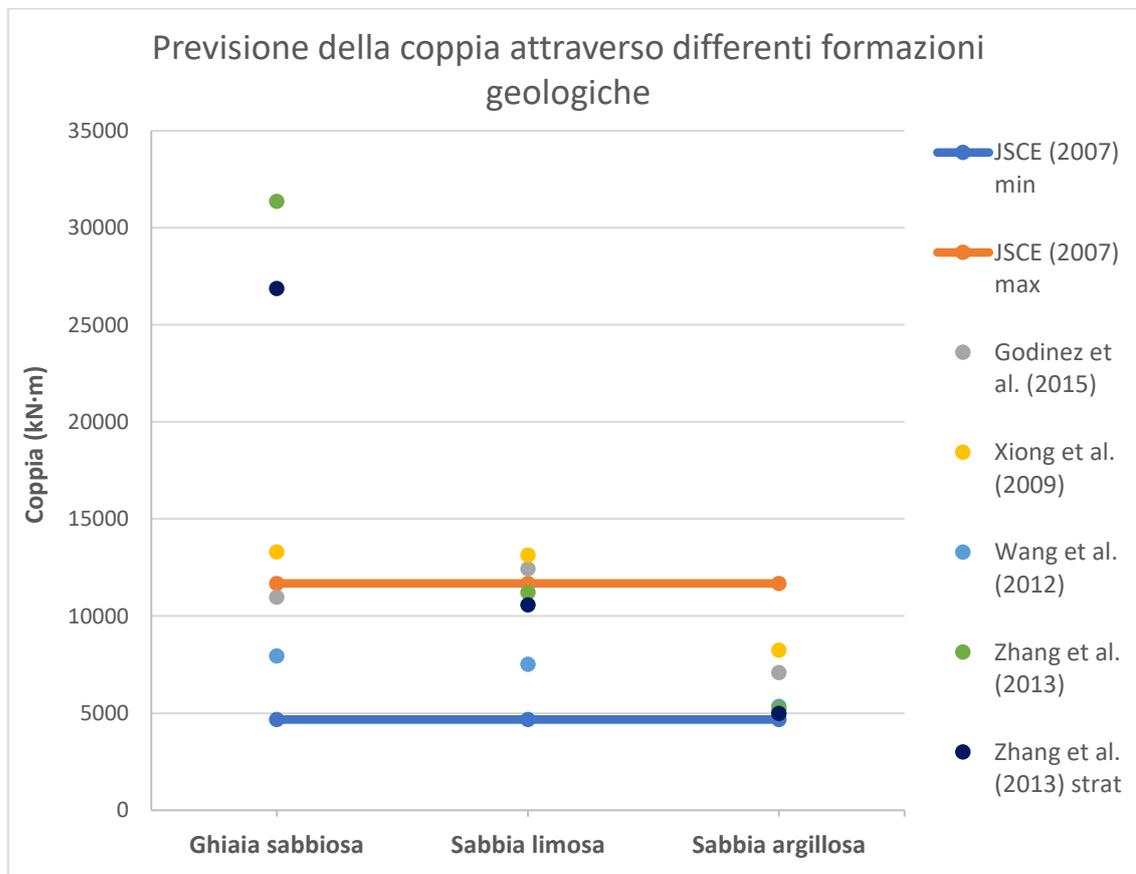


Grafico 6-6. Confronto tra i risultati per coppia attraverso differenti formazioni geologiche

Proseguendo con il confronto, il risultato che colpisce in modo particolare è quello relativo ai due modelli proposti da Bilgin et al. (2014) per la previsione della penetrazione. Come indicato più volte in precedenza, queste due formulazioni offrono due metodi di calcolo della penetrazione caratterizzati da complessità differente: il modello A si basa su un semplice rapporto tra avanzamento e velocità di rotazione della testa di scavo, mentre il modello B considera un calcolo sulla base di parametri più numerosi, legati alle interazioni tra fronte di scavo e utensili (Capitolo 4.4). Nonostante ciò, si può notare dai risultati indicati in Tabella 6-10 come i valori ottenuti dalle due formulazioni siano identici, fatta eccezione per il caso in cui l'assenza di coesione rende ineseguibile il modello B. È interessante osservare ciò possa permettere di usare

quest'ultima formulazione per compiere una valutazione a priori più realistica per quanto riguarda la previsione della durata totale dei lavori. Avendo specificato in ingresso un numero di ore totali di lavoro pari a 3000, per una lunghezza complessiva di 1700 m, si ottiene un numero di anelli da installare ogni giorno pari a 21, situazione difficilmente credibile nel caso di scavo con macchine EPBS in terreni. Ipotizzando il valore mediamente più realistico di 10 anelli per giorno, si ottiene un totale di 6500 ore lavorative circa.

Tabella 6-10. Risultati per velocità di rotazione della testa di scavo attraverso differenti formazioni geologiche

Risultati di previsione per velocità di rotazione della testa di scavo			
Parametro	Ghiaia sabbiosa	Sabbia limosa	Sabbia argillosa
Bilgin et al. (2014), A (mm/rev)	23,5	23,5	23,5
Bilgin et al. (2014), B (mm/rev)	Modello non eseguibile in assenza di coesione	23,5	23,5

Anche il confronto della previsione relativa ai parametri di rotazione della coclea mette in evidenza differenze significative, avendo nuovamente ipotizzato tre diverse situazioni di variazione della pressione in camera di scavo. Se si considera il mantenimento di una pressione costante, la velocità di rotazione della coclea risulta, come logico aspettarsi, uguale per tutte le situazioni, indipendentemente dalle caratteristiche del fronte di scavo. Questo poiché la formulazione si basa su un bilancio di volume, adatto a calcolare le dinamiche necessarie affinché la camera di scavo possa ospitare costantemente

nel tempo gli stessi m^3 di materiale condizionato. Ciò che cambia è la coppia da applicare alla vite per poterla mantenere correttamente in rotazione, che aumenta significativamente con l'aumentare del contenuto fine e della coesione, a causa delle interazioni tra materiale trasportato e superfici meccaniche della coclea. Nel considerare una certa variazione di pressione all'interno della camera di scavo, invece, il confronto tra le previsioni mette in evidenza velocità di rotazione diverse in funzione delle proprietà meccaniche del terreno condizionato, con una variazione via via maggiore con il crescere del contenuto di fini.

Tabella 6-11. Risultati per parametri della coclea attraverso differenti formazioni geologiche

Risultati di previsione per parametri della coclea attraverso ghiaia sabbiosa			
Strato	Merritt et al. (2008), (kN·m)	Li et al. (2014), (rev/min)	Li et al. (2014) $\Delta p = 0$, (rev/min)
Ghiaia sabbiosa	49	70,2	70,2
Ghiaia sabbiosa, +300	49	69,7	70,2
Ghiaia sabbiosa, -300	49	70,6	70,2
Sabbia limosa	171	70,2	70,2
Sabbia limosa, +300	171	67,9	70,2
Sabbia limosa, +300	171	72,4	70,2
Sabbia argillosa	285	70,2	70,2
Sabbia argillosa, +300	285	65,6	70,2
Sabbia argillosa, -300	285	74,7	70,2

Il confronto si conclude con le previsioni relative all'energia specifica, che, in linea con i risultati di spinta e coppia, non riservano sorprese, mostrando una diminuzione dell'energia necessaria per lo scavo con l'aumentare del contenuto di fini e della coesione.

Tabella 6-12. Risultati per energia specifica attraverso formazioni geologiche differenti

Risultati di previsione per energia specifica attraverso ghiaia sabbiosa	
Strato	Cardu et al. (2011) (MJ/m³)
Ghiaia sabbiosa	7,77
Sabbia limosa	7,59
Sabbia argillosa	6,11

6.2.4 Scavo al di sotto della superficie piezometrica

La tipologia di formazioni geologiche cui si fa riferimento in questo lavoro comporta quasi sempre la presenza di una falda acquifera, con la quale le operazioni di scavo spesso devono necessariamente interagire. In caso di scavo sotto la quota piezometrica, una macchina EPBS dev'essere in grado di offrire una pressione al fronte per controbilanciare anche la spinta idrostatica dell'acqua, impermeabilizzando il cantiere e minimizzando i cedimenti. Nonostante l'importanza di studiare in modo approfondito una simile situazione, per quanto riguarda la previsione dei parametri di scavo la presenza dell'acqua non condiziona globalmente i modelli implementati, e il suo contributo viene considerato unicamente all'interno di quelle formulazioni dove le forze dovute alla spinta idrostatica entrano in gioco come componenti non trascurabili.

Per comprendere in che modo la presenza della falda acquifera possa non essere considerata all'interno delle formulazioni, è interessante valutare la previsione della coppia agente sulla testa fresante, notando come nessuno dei modelli implementati nel programma faccia distinzione tra scavo sottofalda e non, ad eccezione delle formule presentate da Zhang et al. (2013). Sebbene il calcolo della coppia risenta fortemente delle interazioni tra parti meccaniche della macchina e terreno, la presenza dell'acqua non viene considerata, in quanto il suo contributo alle tensioni di attrito è del tutto trascurabile rispetto alle forze legate alle proprietà meccaniche del terreno. Tuttavia, è doveroso sottolineare come le formulazioni di Zhang et al. siano le uniche a considerare la pressione sviluppata all'interno della camera di scavo, proporzionale alla quota piezometrica, per valutare gli attriti tra terreno condizionato e retro della testa fresante. Questo comporta la necessità di una valutazione più approfondita per comprendere quanto questa differenza possa influenzare i diversi risultati.

Contrariamente a quanto detto in generale per il calcolo della coppia, per valutare la spinta che la macchina EPBS dev'essere in grado di offrire, è doveroso tenere in considerazione la componente di pressione sul fronte e in direzione radiale dovuta alla presenza dell'acqua, qualora lo scavo passasse al di sotto della quota piezometrica. Il contributo idrostatico della falda, infatti, risulta una componente molto rilevante, in alcuni casi maggiore di quella generata dalla presenza del terreno stesso. Sebbene i modelli per la previsione della spinta utilizzati nel programma creato siano in grado di fornire risultati in caso di scavo sotto superficie piezometrica, molte di queste formulazioni ne considerano il contributo in modo implicito, racchiuso all'interno della spinta di sostegno da applicare sul fronte di scavo; solamente i due modelli proposti da Wang et al. (2012) si servono esplicitamente dei dati geometrici che definiscono la presenza della falda. Per quanto sia stata precedentemente indicata l'esistenza nel programma di un codice di calcolo per la definizione della spinta

di sostegno (Capitolo 5.5), tale formulazione non è applicabile al caso di scavo sottofalda.

In mancanza di dati reali da poter inserire all'interno del programma, vengono proposti in Tabella 6-13 solamente i risultati ottenuti tramite i modelli di Wang et al. (2012) per la previsione della coppia, in modo da poterne verificare la corretta esecuzione. Sono stati considerati come dati iniziati gli stessi utilizzati per la previsione attraverso uno strato di ghiaia sabbiosa, mentre la superficie piezometrica è stata ipotizzata a quota 195 *m s. l. m.*.

Tabella 6-13. Risultati per coppia in caso di scavo sotto quota piezometrica, modello di Wang et al. (2012)

Risultati di previsione per coppia in caso di falda acquifera		
Modello	Soprafalda	Sottofalda
Wang et al. (2012) (kN)	31990	36389
Wang et al. (2012), dinamico (kN)	34876	39275

Anche per la previsione dei parametri operativi della coclea risulta necessario considerare le proprietà meccaniche del terreno legate alla presenza della falda acquifera: non avendo a disposizione dati in ingresso utili al fine di ottenere risultati per un confronto significativo, non è stato possibile eseguire i modelli di previsione nell'eventualità di uno scavo sottofalda. Per valutare l'attendibilità del modello in riferimento alla realizzazione di una galleria al di sotto della superficie piezometrica, occorre avere a disposizione dati realistici, o storici, in modo da quantificare e verificare le differenze rispetto alle condizioni di scavo in terreno drenato.

6.2.5 Risultati per fronte di scavo stratificato

Con i modelli di Zhang et al. (2013) a disposizione, studiati in particolare per il calcolo di coppia e spinta in caso di fronte di scavo stratificato, risulta interessante analizzare i risultati ottenuti sotto tale ipotesi. Considerando tre diversi strati, caratterizzati da proprietà meccaniche differenti, in Tabella 6-14 vengono riportati i dati utilizzati per definire al programma il modello geometrico da considerare, in riferimento al diametro di scavo utilizzato per l'intera analisi, pari a 7,76 m.

Tabella 6-14. Dati iniziali per la definizione del modello geometrico in caso di fronte di scavo stratificato

Modello geometrico stratificato			
Parametro	Ghiaia sabbiosa	Sabbia limosa	Sabbia argillosa
Quota s.l.m. superiore (m)	200	182	178
Quota s.l.m. inferiore (m)	182	178	0
Modulo di Young (kPa)	150000	20000	10000
Coefficiente di Poisson (-)	0,3	0,3	0,3
Modulo elastico di taglio (kPa)	57692	7692	3846
φ (°)	40	30	35
Coesione (kPa)	0	20	30
k_0 (-)	0,36	0,5	0,43
k_a (-)	0,22	0,33	0,27
γ (kN/m³)	21	21	19
Saturo	0	0	0
Impermeabile	0	0	1

Modello geometrico stratificato			
Parametro	Ghiaia sabbiosa	Sabbia limosa	Sabbia argillosa
OCR	1	1	1

Confrontando i valori ottenuti da entrambi i modelli di Zhang et al. per il calcolo della spinta, si può notare come i risultati indicati non siano molto distanti tra loro, e la differenza presente può essere del tutto trascurabile, se si considera l'eventuale applicazione di un fattore di sicurezza per l'ottenimento del risultato definitivo. Per quanto riguarda la previsione della coppia, la differenza tra i valori dati dalle due formulazioni è più significativa, tuttavia i risultati ottenuti sono ancora entrambi molto maggiori rispetto al limite superiore empiricamente definito da JSCE (2007). Anche il modello di Xiong et al. (2009) si allontana nella stessa direzione, ma questo aspetto dev'essere approfondito per mezzo di confronti con dati storici.

Tabella 6-15. Risultati per spinta attraverso fronte di scavo stratificato

Risultati di previsione per spinta attraverso fronte di scavo stratificato	
Modello	Risultato
Krause min (1987) (kN)	30109
Krause max (1987) (kN)	72261
Wittke et al. (2007) (kN)	29891
JSCE (2007) (kN)	34718
Maidl et al. (2012) (kN)	27438
Wang et al. (2012) (kN)	35166

Risultati di previsione per spinta attraverso fronte di scavo stratificato	
Modello	Risultato
Wang et al. (2012), dinamico (kN)	36981
Zhang et al. (2013) (kN)	34753
Zhang et al. (2013), fronte stratificato (kN)	34489

Tabella 6-16. Risultati per coppia attraverso fronte di scavo stratificato

Risultati di previsione per coppia attraverso fronte di scavo stratificato	
Modello	Risultato
JSCE min (2007) (kN·m)	4673
JSCE max (2007) (kN·m)	11682
Godinez et al. (2015) (kN·m)	10148
Xiong et al. (2009) (kN·m)	15562
Wang et al. (2012) (kN·m)	8378
Zhang et al. (2013) (kN·m)	17633
Zhang et al. (2013), fronte stratificato (kN·m)	16887

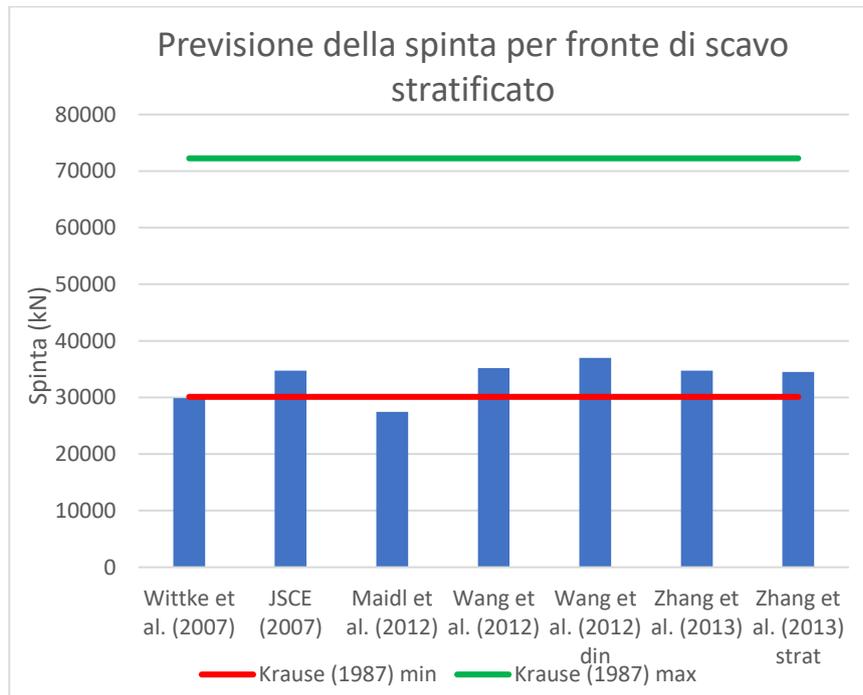


Grafico 6-7. Risultati per spinta attraverso fronte di scavo stratificato

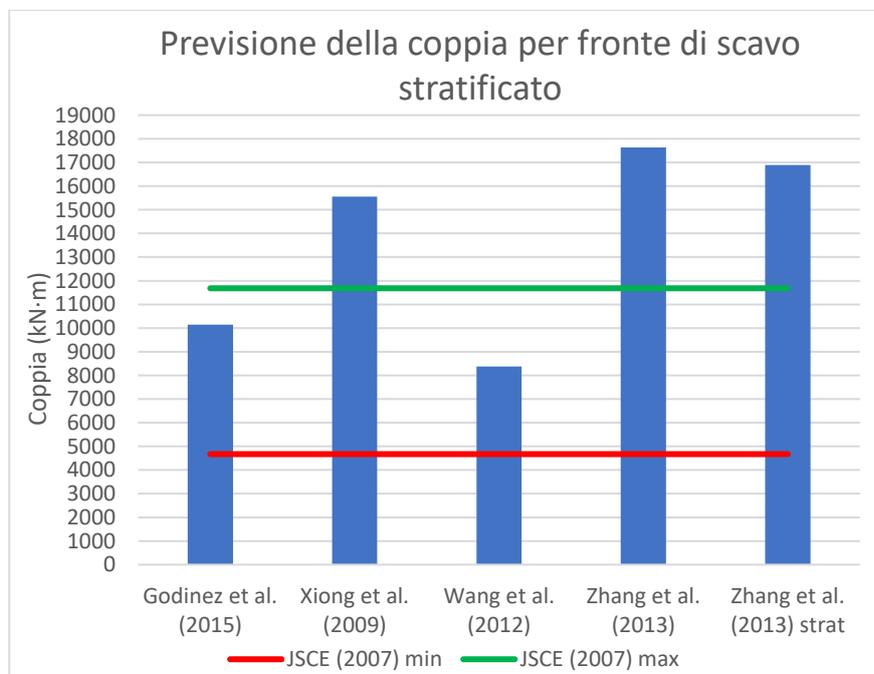


Grafico 6-8. Risultati per coppia attraverso fronte di scavo stratificato

6.3 Trascurabilità dei dati in ingresso

Dalla trattazione compiuta nel Capitolo 5, risulta evidente la richiesta di numerosi dati in ingresso per poter ottenere risultati da tutti i modelli implementati. L'analisi presentata in precedenza è stata portata a compimento utilizzando valori teorici per il completamento dei dati iniziali, non avendo a completa disposizione quelli relativi a scavi realmente effettuati. Per questo motivo, è interessante cercare di capire se sia eventualmente possibile trascurare l'inserimento dei parametri in ingresso di più difficile reperimento, agendo sul codice del programma ottimizzando le formulazioni utilizzate.

Per comprendere l'esistenza di una simile possibilità, è necessario valutare i risultati ottenuti, ricercando all'interno dei modelli più complessi eventuali componenti matematiche trascurabili, o approssimabili con fattori moltiplicativi e valori medi. Allo stesso modo, si possono confrontare i risultati di previsione restituiti dal programma facendo variare alcuni dei principali dati richiesti in ingresso.

6.3.1 Componenti poco significative per spinta e coppia

Il confronto tra i risultati dei modelli eseguiti all'interno del programma è stato utile per riconoscere eventuali errori grossolani di implementazione, e per iniziare a comprendere a quali modelli poter attribuire più peso nella definizione di un unico risultato finale, relativamente a ciascun parametro di scavo oggetto della previsione. Tuttavia, è interessante anche analizzare i contributi offerti dalle singole componenti che definiscono i modelli per il calcolo della spinta e della coppia, in modo da rendere evidente l'eventuale trascurabilità di alcune di esse, permettendo eventualmente di eseguire i modelli anche in mancanza di alcuni dati iniziali. Tale intenzione viene giustificata con la possibilità di applicare un fattore di sicurezza sui risultati

ultimi, che andrebbe ad inglobare e rendere impliciti i contributi meno importanti.

Utilizzando una stampa a video durante l'esecuzione del programma di calcolo, presentata in Appendice 3, è stato possibile osservare i valori delle singole componenti di spinta e coppia, per tutti quei modelli concettualmente formulati sulla base di un'analisi meccanica, ad eccezione delle formulazioni di Wang et al. (2012). Per accrescere la sicurezza nel considerare trascurabile un certo contributo, l'analisi è stata effettuata su tre diverse progressive di scavo, contestualizzate nelle tre differenti formazioni geologiche utilizzate per le esecuzioni dei modelli precedentemente commentate: ghiaia sabbiosa, sabbia limosa, e sabbia argillosa (Appendice 2). Le componenti legate a contributi non essenziali sono state identificate definendo come limite minimo di non trascurabilità il valore di 1000 kN per la spinta, e $500 \text{ kN} \cdot \text{m}$ per la coppia, affiancando tale considerazione al confronto diretto con i valori delle altre componenti restituite da ciascuna formula analizzata.

Per quanto riguarda la previsione della spinta, l'unico modello che ha rivelato un contributo dal valore molto basso, in relazione a quanto specificato in precedenza, è stato quello di Wittke et al. (2007): la spinta dovuta all'azione degli utensili sul fronte di scavo, infatti, si è rivelata essere nulla per attraversamento di formazioni prive di coesione, e minore di 100 kN nel caso dei terreni coesivi considerati dallo studio. Sebbene anche il modello di Maidl et al. (2012) tenga conto di una componente di spinta legata alle interazioni tra utensili e fronte di scavo, la formulazione adottata in questo modello è differente, e risolve su valori maggiori, che possono superare i 1000 kN , e perciò non trascurabili. In questa fase di analisi, la componente del modello pubblicato dalla JSCE nel 2007 dovuta alle pressioni laterali in fase di curvatura non è stata considerata, avendo ipotizzato un sovrascavo in grado di annullarla.

Tabella 6-17. Forza di spinta dovuta ad interazioni tra utensili e fronte di scavo

Componenti di spinta dovute a forza tra utensili e fronte di scavo		
Strato	Wittke et al. (2007) (kN)	Maidl et al. (2012) (kN)
Ghiaia sabbiosa	0	1015,6
Sabbia limosa	64,6	1015,6
Sabbia argillosa	72,5	918,8

Considerando i modelli di previsione della coppia agente sulla testa fresante, le componenti da poter considerare trascurabili appartengono a quattro modelli tra quelli implementati. Il primo di questi è quello di Godinez et al. (2015), all'interno del quale il contributo offerto dalle forze di attrito generate nella camera di scavo, a causa delle interazioni tra terreno condizionato e barre miscelatrici, risulta inferiore a $150 \text{ kN} \cdot \text{m}$ in tutti i casi considerati. Anche dalla formulazione di Xiong et al. (2009), la componente dovuta all'azione delle barre miscelatrici si aggira attorno ai $300 \text{ kN} \cdot \text{m}$ per tutte le progressive considerate, risultando sempre inferiore al limite scelto. Nel caso di Zhang et al. (2013), al contrario, sia per fronte di scavo omogeneo che per fronte stratificato questa componente torna a superare i $500 \text{ kN} \cdot \text{m}$, ma risulta invece più basso il contributo offerto dagli attriti tra superficie laterale dello scudo e terreno.

Tabella 6-18 Contributo alla coppia da parte degli attriti tra barre miscelatrici, supporti della testa di scavo, e terreno condizionato

Componenti di coppia dovute agli attriti tra barre miscelatrici e terreno condizionato			
Modello	Ghiaia sabbiosa	Sabbia limosa	Sabbia argillosa
Godinez et al. (2015) (kN·m)	105,78	148,1	114,2
Xiong et al. (2009) (kN·m)	309,8	309,8	280,3
Zhang et al. (2013) (kN·m)	643,2	521,3	341,6
Zhang et al. (2013), fronte stratificato (kN·m)	643,2	521,3	341,6

Tabella 6-19. Contributo alla coppia da parte degli attriti tra lato testa fresante e terreno

Componenti di coppia dovute ad attriti tra terreno e superficie laterale della testa di scavo		
Strato	Zhang et al. (2013) (kN)	Zhang et al. (2012) (kN), fronte stratificato
Ghiaia sabbiosa	316,6	316,6
Sabbia limosa	179,6	179,6
Sabbia argillosa	155,2	155,2

Poiché i parametri meccanici e geotecnici relativi al calcolo delle forze di interazione tra terreno condizionato, barre miscelatrici e supporti della testa di

scavo non provengono da situazioni reali, in questa fase non è possibile garantire con certezza la loro trascurabilità, soprattutto osservando come questi dati vengano utilizzati dai modelli di Zhang et al. per ottenere valori il cui contributo non può essere omissivo. Infatti, sebbene queste formulazioni prevedano, nel caso di ghiaia sabbiosa, un valore complessivo di coppia (Capitolo 6.2.2) molto superiore al contributo offerto dagli attriti sulle barre miscelatrici, considerando terreni con una maggiore coesione e presenza di fini la differenza tra i valori diventa minima, impedendo di trascurare tale componente.

6.3.2 Analisi dei risultati variando i parametri iniziali

Lo studio dei risultati separati in componenti ha permesso di osservare come alcuni contributi possano essere considerati trascurabili rispetto ad altri, senza però permettere di associare globalmente tale trascurabilità ad alcuni particolari dati inizialmente noti. Per approfondire lo studio dell'importanza rivestita dai singoli valori letti in ingresso dal programma, è stato necessario eseguire la previsione facendo variare progressivamente i singoli dati, in modo da poter osservare come i risultati ottenuti dai diversi modelli ne risentissero. Questa operazione non è stata eseguita sulla base di un determinato significato fisico, poiché aumentare la dimensione di testa di scavo e scudo, per esempio, non è realmente concepibile senza prevedere diverse caratteristiche per tutte le altre parti meccaniche della macchina, indicando conseguentemente anche pesi superiori. Tuttavia, avendo come obiettivo il riconoscimento dei dati in grado di influenzare i valori finali più o meno di altri, la loro variazione permette di studiare la dinamica di risposta dei modelli.

Questo significa che non è possibile in questa analisi riconoscere un dato come trascurabile, ma si può evidenziare la rapidità di risposta da parte dei modelli, conseguentemente alla modifica di determinati valori iniziali. Nel caso

fosse identificabile un comportamento relativamente statico, si potrebbe pensare di sostituire il dato in questione con un coefficiente, studiato su base empirica, in grado di approssimarne il contributo all'interno dei calcoli. Inoltre, studiando i risultati ottenuti facendo variare il diametro di scavo, è possibile un confronto tra i modelli empirici per la previsione di coppia e spinta e quelli basati su modelli meccanici.

Partendo da tale riferimento, è possibile osservare dai Grafici mostrati in seguito la progressione dei diversi risultati per la previsione di spinta e coppia, in seguito alla variazione del diametro di scavo e, implicitamente, della lunghezza dello scudo. Il crescere in intensità delle forze calcolate proporzionalmente alle dimensioni considerate non sorprende, essendo la stessa risposta offerta dai modelli empirici, e l'importanza di questi dati iniziali nella variazione dei risultati ottenibili risulta evidente. Tuttavia, questo confronto è interessante poiché permette una seconda osservazione: tutti i modelli implementati che offrono la previsione della spinta in funzione di parametri geotecnici, restituiscono valori più vicini al modello empirico di Szechy (1969) e al limite inferiore proposto da Krause (1987), per l'attraversamento di ghiaia sabbiosa, mentre risultati ancora più bassi si hanno nei casi di sabbia limosa e sabbia argillosa. Al contrario, i risultati per la coppia rispecchiano i valori suggeriti empiricamente. Queste osservazioni sono un utile completamento per l'analisi effettuata nel Capitolo 6.2.2.

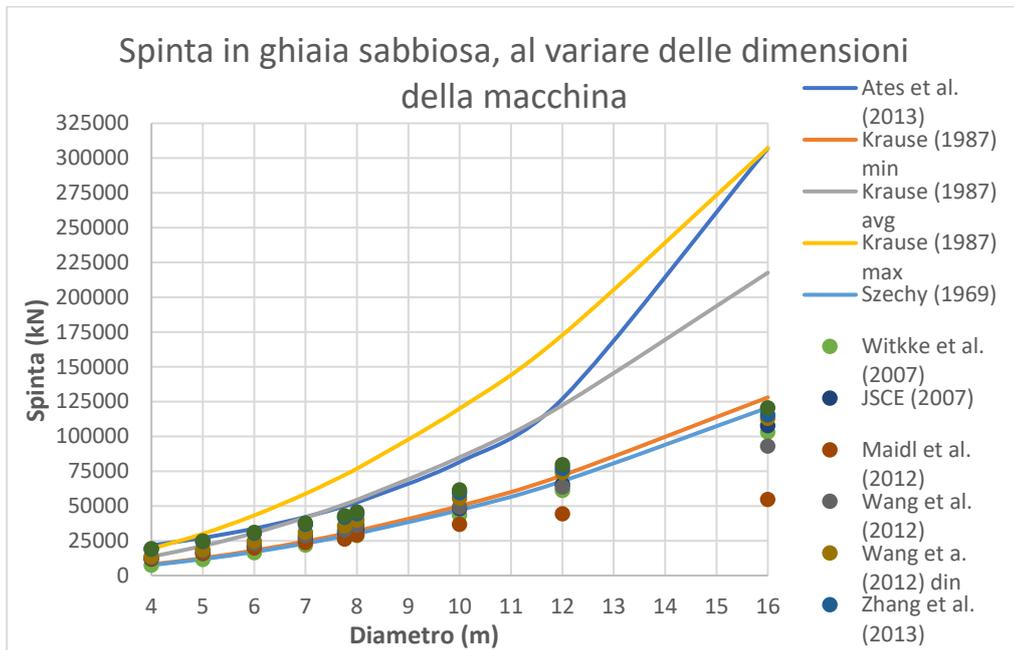


Grafico 6-9. Confronto dei risultati per la spinta attraverso ghiaia sabbiosa, in funzione delle dimensioni della macchina

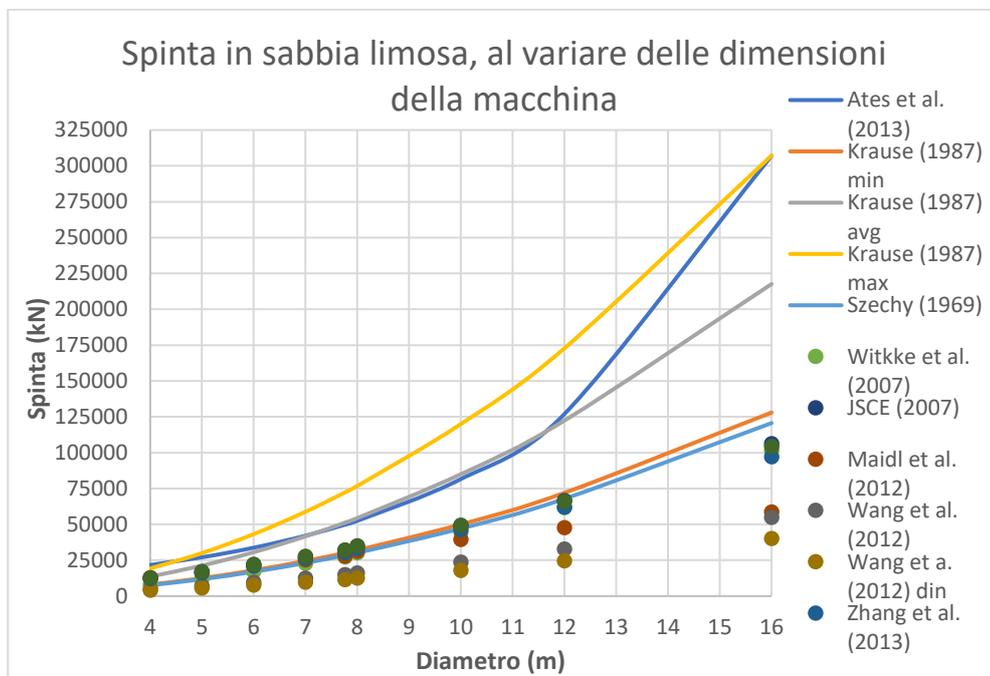


Grafico 6-10. Confronto dei risultati per la spinta attraverso sabbia limosa, in funzione delle dimensioni della macchina

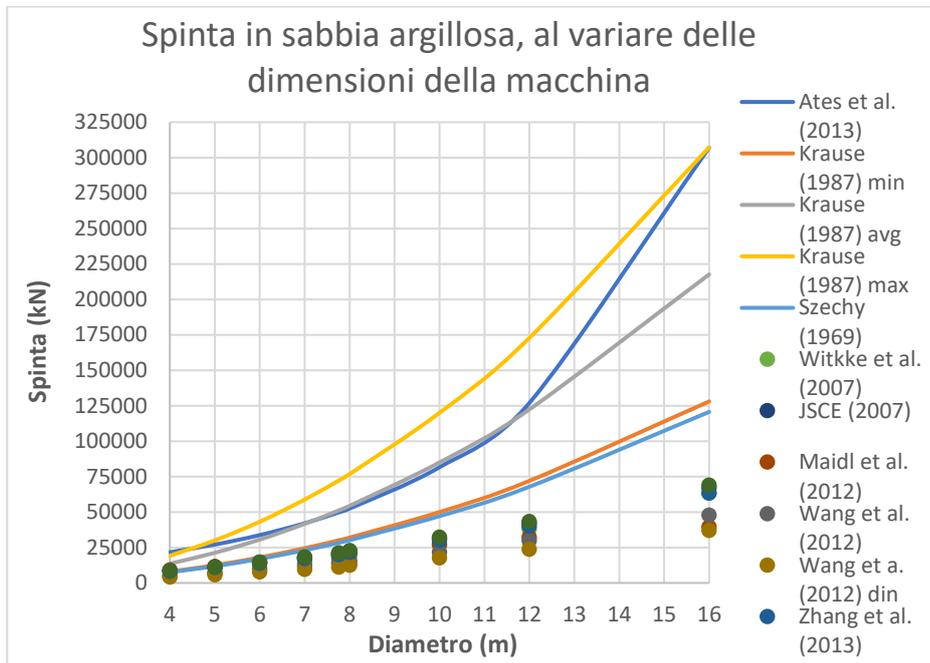


Grafico 6-11. Confronto dei risultati per la spinta attraverso sabbia argillosa, in funzione delle dimensioni della macchina

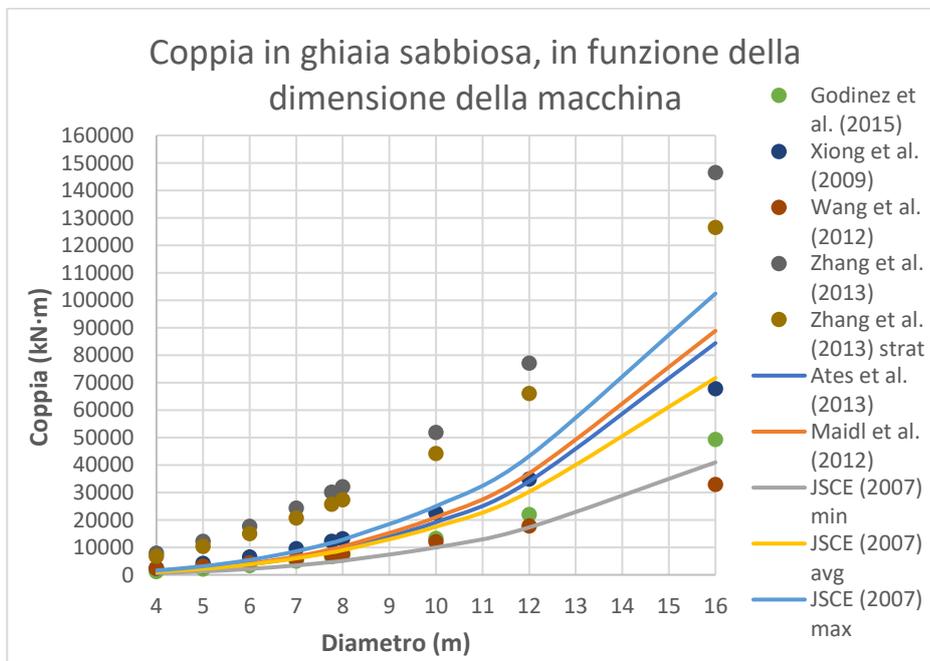


Grafico 6-12. Confronto dei risultati per coppia attraverso ghiaia sabbiosa, in funzione delle dimensioni della macchina

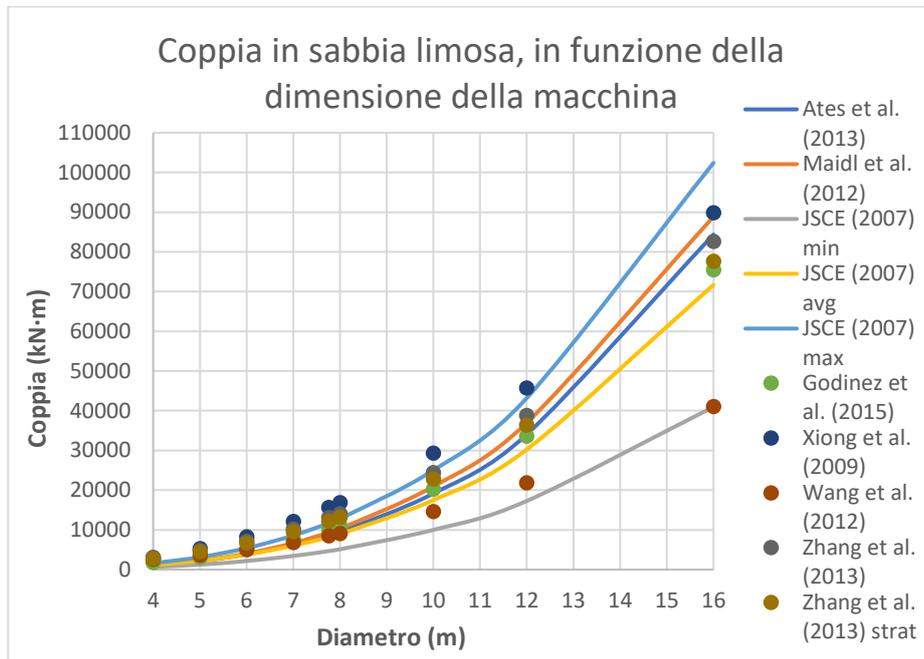


Grafico 6-13. Confronto dei risultati per coppia attraverso sabbia limosa, in funzione delle dimensioni della macchina

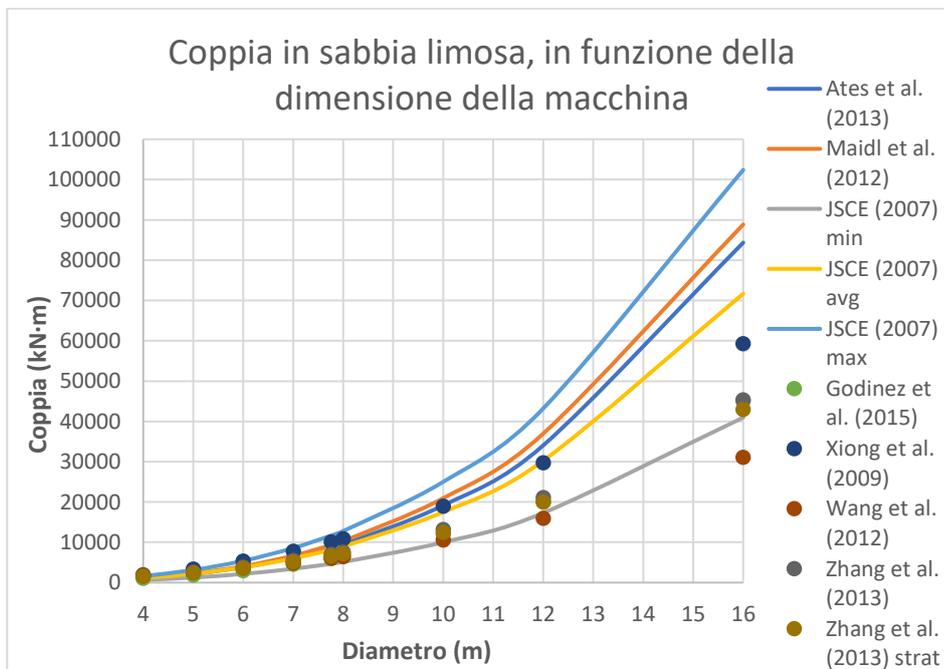


Grafico 6-14. Confronto dei risultati per coppia attraverso sabbia argillosa, in funzione delle dimensioni della macchina

Una seconda osservazione interessante è scaturita a seguito del confronto tra i risultati dei modelli con la variazione dello spessore della testa fresante. Sebbene la precedente analisi delle componenti avesse individuato un valore poco influente nei modelli di Zhang et al. (2013) per il calcolo della coppia, lo studio del comportamento dinamico dei risultati in funzione del contatto tra testa rotante e terreno, mostrato nei Grafici sottostanti, ha rivelato come non sia possibile trascurare questa dimensione fisica, o sostituirla con un coefficiente statico, vista l'intensità della variazione nella coppia dovuta al valore di tale parametro.

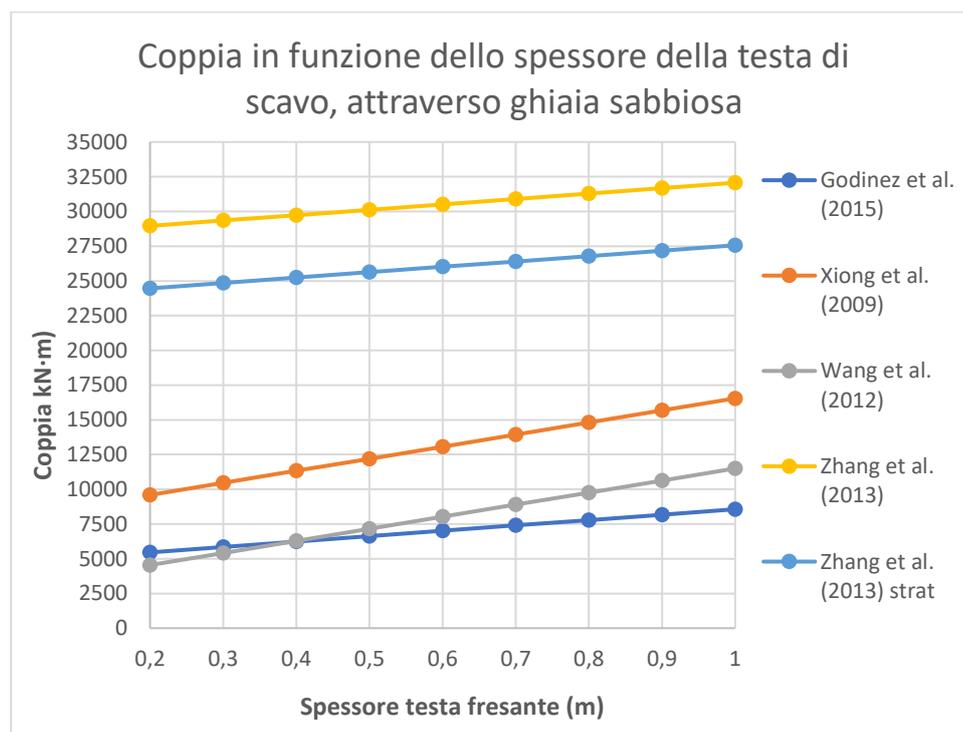


Grafico 6-15. Confronto dei risultati per coppia attraverso ghiaia sabbiosa, in funzione dello spessore della testa di scavo

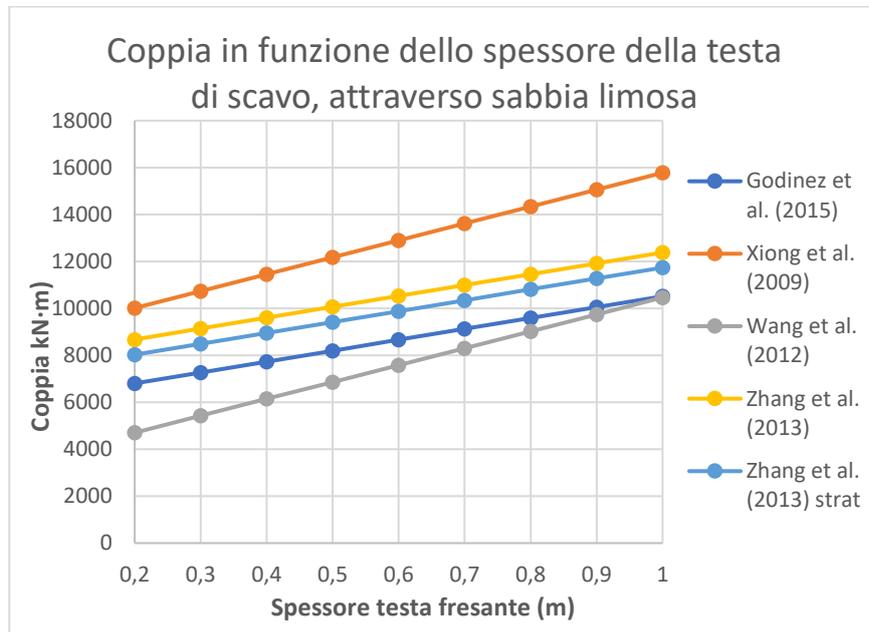


Grafico 6-16. Confronto dei risultati per coppia attraverso sabbia limosa, in funzione dello spessore della testa di scavo

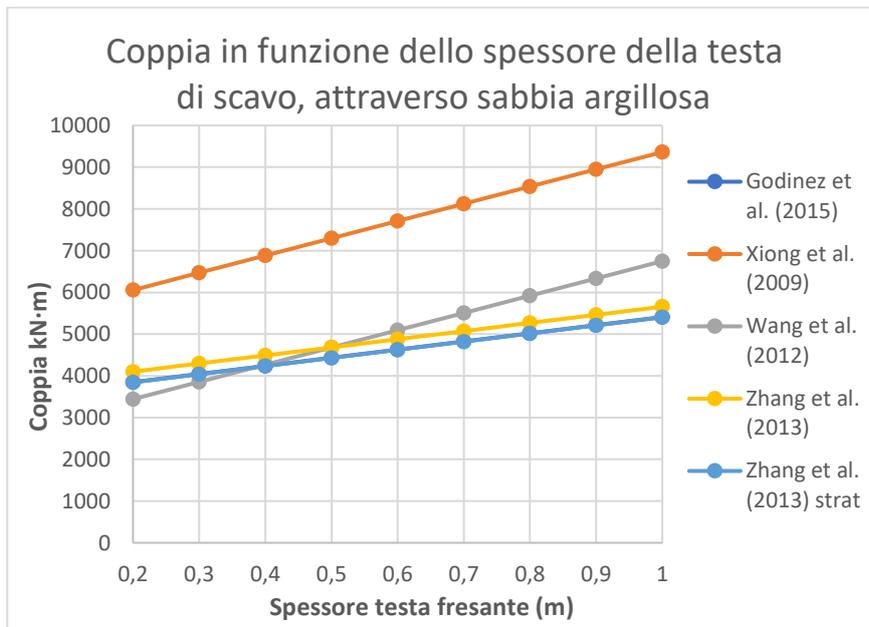


Grafico 6-17. Confronto dei risultati per coppia attraverso sabbia argillosa, in funzione dello spessore della testa di scavo

Il confronto tra i risultati ottenuti in funzione dell'apertura della testa di scavo merita un approfondimento, poiché ha reso evidente come, nel caso della spinta, il contributo offerto da questo dato è relativamente statico, non connesso, cioè, a variazioni non trascurabili dei valori di previsione. Inoltre, diversi autori, tra cui Maidl et al. (2012), sostengono che il supporto meccanico offerto dalla testa fresante per sostenere il fronte di scavo dev'essere del tutto trascurato nel caso di scavo attraverso terreni. Per quanto riguarda la coppia, il contributo connesso all'apertura della testa rotante è più importante, essendo dovuto agli attriti tra superfici chiusa e terreno (Appendice 4). È dunque realistico pensare di poter sostituire il dato in ingresso relativo all'apertura con un coefficiente empirico, ma solamente per i modelli di calcolo della spinta. Tuttavia, questo parametro sarebbe comunque richiesto in fase iniziale per l'esecuzione delle formulazioni di previsione della coppia, e generalmente non si tratta di un dato di difficile reperimento.

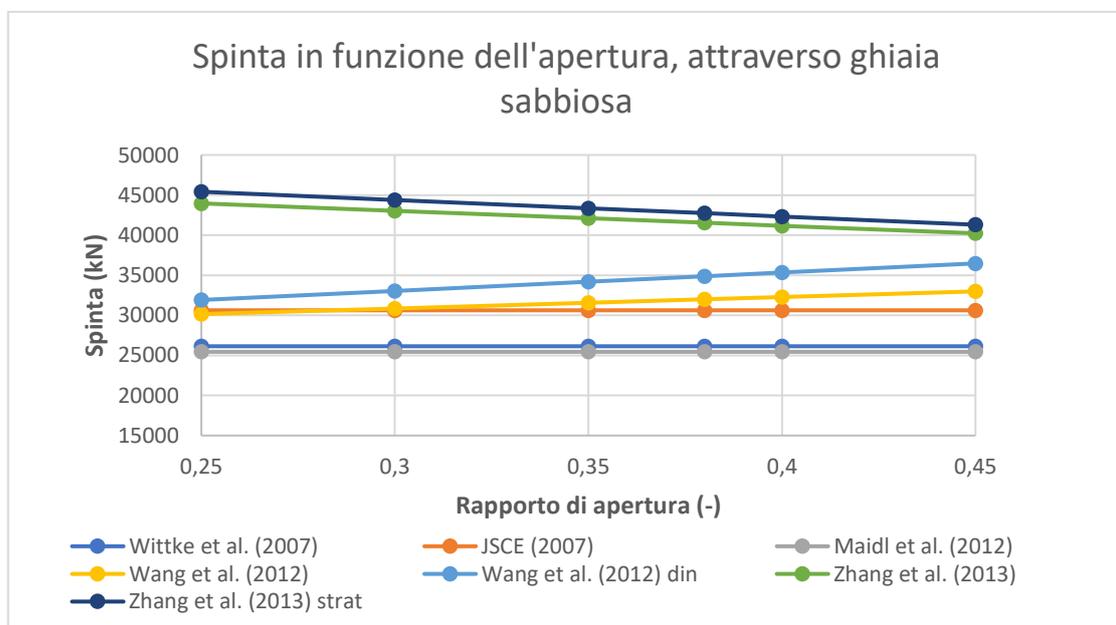


Grafico 6-18. Confronto dei risultati per spinta attraverso ghiaia sabbiosa, in funzione dell'apertura della testa di scavo

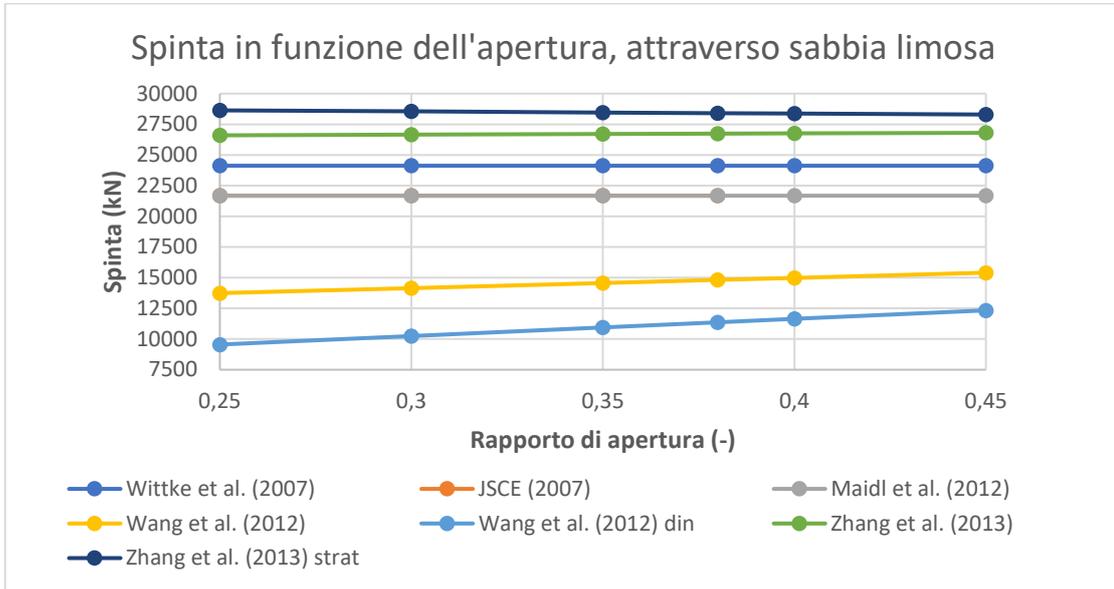


Grafico 6-19. Confronto dei risultati per spinta attraverso sabbia limosa, in funzione dell'apertura della testa di scavo

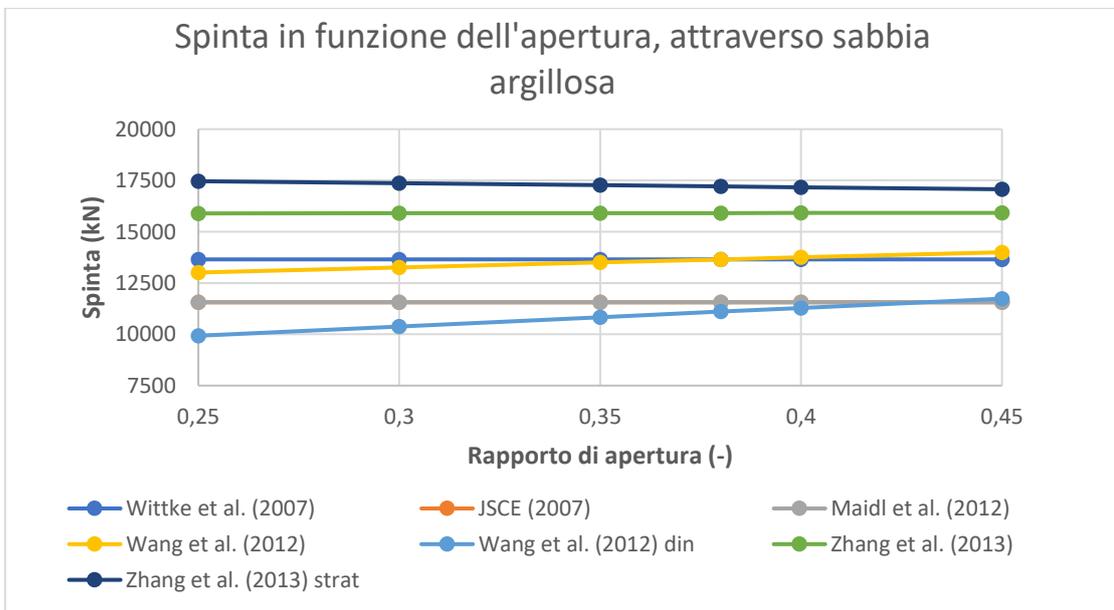


Grafico 6-20. Confronto dei risultati per spinta attraverso sabbia argillosa, in funzione dell'apertura della testa di scavo

Le semplificazioni possibili più significative scaturite da questa fase di analisi riguardano i dati relativi alle interazioni tra anelli di rivestimento e spazzole di coda, e alle forze di attrito generate tra terreno condizionato, barre miscelatrici e supporti della testa fresante. Nel primo caso, è risultato evidente, facendo variare dimensioni degli anelli (peso) e lunghezza di contatto tra conci e spazzole di coda, come i risultati dei modelli interessati non subissero variazioni significative, indicando contributi approssimabili tramite l'applicazione di coefficienti empirici o fattori di sicurezza. Per quanto riguarda le tensioni tangenziali d'interazione tra barre miscelatrici e terreno condizionato, si è notato come anche a seguito della variazione di questi parametri non si riscontrino rapide differenze nei risultati della previsione di spinta e coppia. Per questo motivo, anche per tener conto di queste componenti risulta possibile l'utilizzo di coefficienti definiti su base empirica. Inoltre, solamente il modello di Godinez et al. (2015) considera la presenza dei supporti per la testa rotante, trascurata dagli altri autori, per il quale, inoltre, il contributo offerto dagli attriti generati in camera di scavo è risultato trascurabile nello studio descritto nel Capitolo 6.3.1.

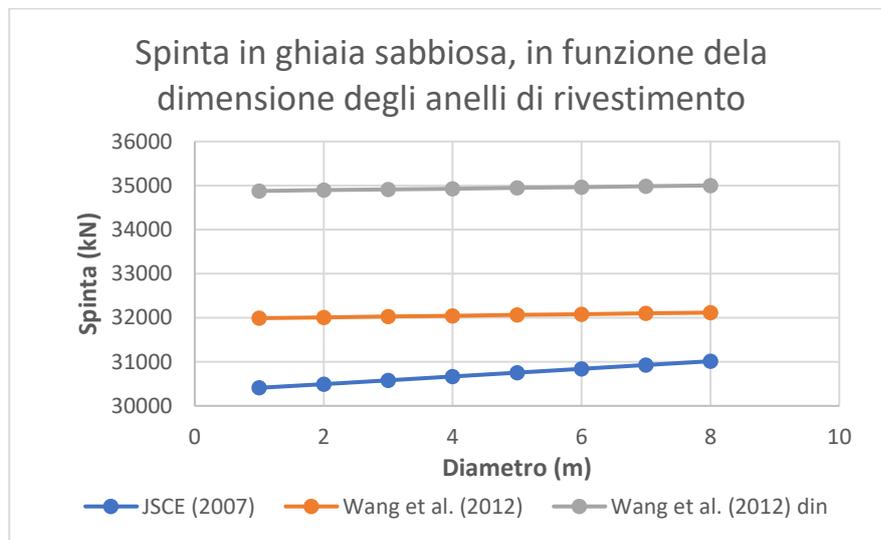


Grafico 6-21. Confronto dei risultati per spinta attraverso ghiaia sabbiosa, in funzione della dimensione degli anelli di rivestimento

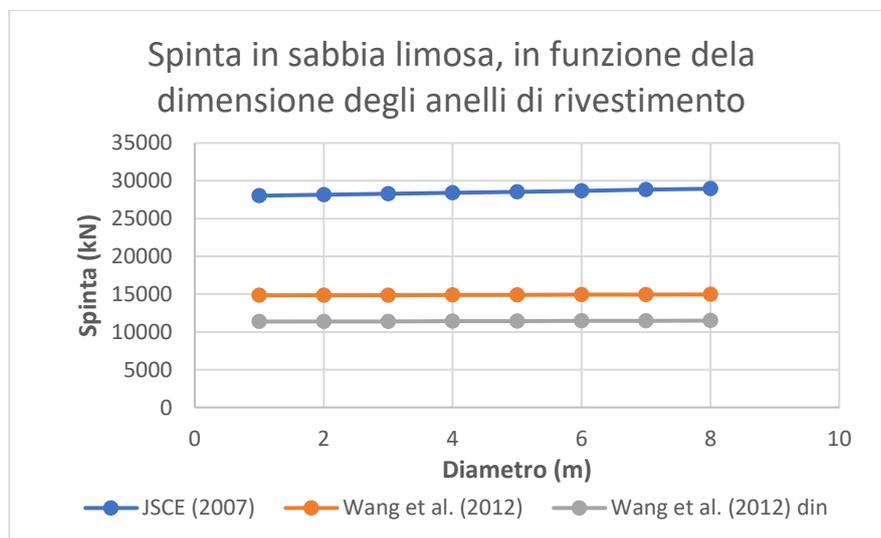


Grafico 6-22. Confronto dei risultati per spinta attraverso sabbia limosa, in funzione della dimensione degli anelli di rivestimento

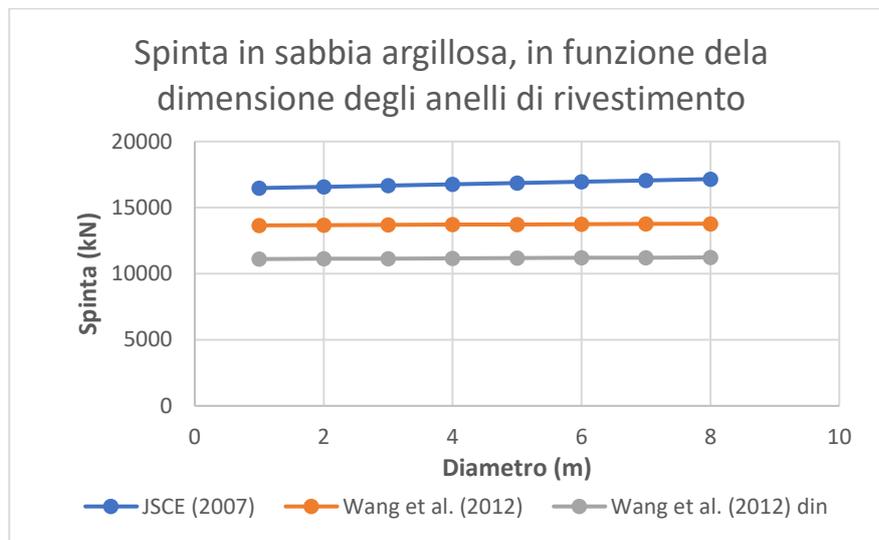


Grafico 6-23. Confronto dei risultati per spinta attraverso sabbia argillosa, in funzione della dimensione degli anelli di rivestimento

Anche le caratteristiche degli utensili sono parametri il cui utilizzo merita un approfondimento. In particolare, si è notato come il numero degli scrapers presenti sulla testa di scavo sia un dato utilizzato solamente dal modello di Maidl et al. (2012) per la previsione della spinta, e con un contributo dinamico sicuramente trascurabile, vista la minima variazione del risultato in funzione del numero di utensili indicato (Appendice 4). Tuttavia, considerando la stessa formulazione, il contributo alla spinta dato dall'interazione tra fronte di scavo e utensili è significativo, come visto nel Capitolo 6.3.1. Confrontando i risultati facendo variare la superficie di contatto utensile-terreno, infatti, si ottiene una variazione maggiore del risultato (Appendice 4). Questo può indicare che, sebbene questa componente matematica non possa essere trascurata, il numero di utensili può essere sostituito da un coefficiente empirico.

Per quanto riguarda tutti i dati restanti, non discussi in questo Capitolo, lo studio dei risultati in funzione della loro variabilità non ha evidenziato possibilità di approssimazione, indicando un rapporto di proporzionalità diretta tra valori in entrata e risultati dei modelli previsionali.

6.4 Definizione dei risultati complessivi del modello previsionale

Sulla base dell'analisi svolta nei Capitoli precedenti, risulta evidente come l'eventuale definizione di approssimazioni in grado di limitare i dati necessari per l'esecuzione del programma richieda un'analisi empirica, basata su dati storici. La stessa osservazione è valida per la definizione dei risultati ultimi della previsione, ovvero per l'ottenimento di un unico valore per ciascun tipo di parametro previsto. A tal fine, occorre definire un criterio da applicare per unire i diversi risultati in modo da restituire singoli valori utilizzabili in fase preliminare di progetto, possibilmente a favore di sicurezza. Sulla base dell'analisi svolta nel corso della trattazione, una possibilità è quella di attribuire un peso matematico a ciascun modello implementato, in relazione all'attendibilità dei loro risultati. Come anticipato, questa fase di definizione dei risultati della previsione viene affrontata in questo capitolo dal punto di vista qualitativo, poiché necessita di successive verifiche, per mezzo di controlli e confronti utilizzando dati relativi a casi storici.

Per poter ottenere una previsione in grado di restituire risultati univoci, quindi, si considerano i valori ottenuti dall'esecuzione delle singole formulazioni implementate all'interno del programma, attribuendo a ciascuno di essi un peso in grado di condizionare il calcolo di un valore medio, che si farà carico di definire il risultato della previsione ottenuta per ciascun tipo di parametro di scavo in uscita. Le eccezioni riguardano quei risultati ottenuti da un'unica formulazione, indicati direttamente dal programma come valori conclusivi per la previsione del parametro corrispondente.

I parametri ottenuti, in caso di inserimento completo dei dati iniziali, saranno:

- Spinta massima (kN)
- Spinta per ciascuna progressiva di scavo considerata (kN)

- Coppia massima (kN)
- Coppia per ciascuna progressiva di scavo considerata (kN)
- Avanzamento istantaneo (mm/min), in funzione del diametro
- Avanzamento complessivo (mm/min)
- Ore totali di lavoro (h), in funzione del numero di anelli installati al giorno
- Numero di anelli installati al giorno (day^{-1}), in funzione delle ore totali di lavoro previste
- Penetrazione (mm/rev)
- Massima velocità di rotazione della testa di scavo (rpm)
- Velocità di rotazione della coclea (rpm), in funzione della variazione di pressione necessaria in camera di scavo
- Coppia agente sulla coclea (kN·m)
- Energia specifica (MJ/m^3)

6.4.1 Risultato di previsione per la spinta

I modelli implementati per il calcolo della spinta che la macchina EPBS dev'essere in grado di sviluppare sono, come visto, di due tipi: quelli basati su studi empirici, e quelli definiti studiando un modello meccanico delle interazioni tra TBM-S e terreno. I risultati ottenuti dalle diverse formulazioni mantengono una distinzione concettuale, facendo riferimento gli uni alla massima spinta applicabile dalla macchina, gli altri alla spinta richiesta per l'avanzamento attraverso una determinata progressiva di scavo.

Sulla base di questa osservazione, che verrà ripetuta analizzando i risultati per la coppia agente sulla testa fresante, si è deciso di definire in uscita dal programma di calcolo due valori: uno indicante la massima spinta suggerita dai modelli empirici, l'altro il valore più attendibile di spinta relativo ad una determinata sezione del percorso della galleria. A tal fine, per quanto riguarda

la prima soluzione, il programma restituisce il valore di spinta massimo previsto da Krause (1987) per diametri di scavo inferiori o uguali a 16 m, e un valore medio tra il limite massimo di Krause e la previsione di Ates et al. (2012) per diametri superiori, dando ad entrambi i modelli lo stesso peso. Questa scelta è stata guidata dalla volontà di affiancare ad un modello di 30 anni fa uno studio più giovane, considerandone l'incertezza attribuitagli dagli stessi autori, per tenere conto della prassi relativamente recente riguardo all'impiego di grandi diametri di scavo. Questa definizione per quanto riguarda la spinta massima può risultare estremamente cautelativa, soprattutto in relazione ai risultati messi in luce nel Capitolo 6.3.2. Tuttavia, proprio la lontananza riscontrata tra i risultati dei modelli empirici e quelli ottenuti con le formulazioni più complesse giustifica la prudenza, nell'attesa di un'interpretazione più approfondita, sulla base di situazioni di scavo reali.

Per le soluzioni direttamente connesse alle diverse progressive di scavo, con riferimento particolare al Grafico 6-5 del Capitolo 6.2.3, si ritiene opportuno attribuire un peso maggiore ai modelli di Zhang et al. (2013), e al modello di Maidl et al. (2012), visto l'andamento più regolare. Anche i modelli Wittke et al. (2007) e JSCE (2007) sono da tenere in forte considerazione, trovando un punto di convergenza con le formulazioni precedentemente richiamate. Per quanto riguarda le soluzioni offerte da Wang et al. (2012), sebbene non trascurabili nella definizione del valore finale, si suggerisce di limitarne il contributo con l'attribuzione di un peso nettamente inferiore. Avendo stabilito dei pesi matematici indicativi per l'esecuzione del modello, sulla base di quanto discusso in precedenza, e utilizzando i dati in ingresso relativi alle tre formazioni geologiche precedentemente considerate (Appendice 2), i valori ottenuti vengono presentati in Tabella 6-20.

Tabella 6-20. Previsione della spinta

Risultati per la previsione della spinta			
Modello	Ghiaia sabbiosa	Sabbia limosa	Sabbia argillosa
Ates et al. (2013) (kN)	49779	49779	49779
Krause min (1987) (kN)	30109	30109	30109
Krause max (1987) (kN)	72261	72261	72261
Szechy (1969) (kN)	28377	28377	28377
Wittke et al. (2007) (kN)	26140	24123	13651
JSCE (2007) (kN)	30623	28350	16717
Maidl et al. (2012) (kN)	51045	28993	15218
Wang et al. (2012) (kN)	31990	14823	13652
Wang et al. (2012), dynamic (kN)	34876	11360	11104
Zhang et al. (2013) (kN)	41539	26732	15910
Zhang et al. (2013), interbedded (kN)	42741	28415	17208
Spinta max (kN)	72261	72261	72261
Spinta istantanea (kN)	40016	26873	15689

6.4.2 Risultato di previsione per la coppia

Anche la previsione della coppia agente sulla testa fresante si avvale di due tipi di modelli analitici, basati gli uni su studi empirici, gli altri su formulazioni derivate da analisi meccaniche delle forze di interazione tra terreno e macchina. Come per il calcolo della spinta, questa distinzione rimane concettualmente presente all'interno dei risultati forniti dai diversi modelli, che fanno riferimento

o alla massima coppia che la macchina EPBS deve imporre alla testa fresante, o alla coppia da sviluppare relativamente alle singole progressive di scavo.

Per valorizzare questa distinzione, anche nel caso della coppia si è deciso di far restituire al modello previsionale due risultati: uno, su base empirica, relativo alla massima coppia che la TBM-S deve poter sviluppare, l'altro indicante la coppia agente sulla testa di fresante durante lo scavo delle singole sezioni considerate. Sebbene sia stato osservato come i modelli implementati basati su dati empirici offrano risultati vicini e dal simile andamento in funzione del diametro di scavo (Capitolo 6.2.1), la prima soluzione viene indicata considerando solamente il limite massimo suggerito da JSCE (2007). I risultati ottenuti con i modelli teorici, infatti, hanno mostrato come questo massimo non sia sempre rispettato, e come i risultati di previsione non se ne allontanino velocemente al variare delle proprietà meccaniche del terreno attraversato. A tale valore, quindi, può venire associato un fattore di sicurezza pari a 1,1, in modo da suggerire una coppia massima più elevata, giustificata dai risultati ottenuti con tutti i modelli implementati.

La seconda soluzione, relativa alla previsione della coppia per ciascuna progressiva di scavo considerata, viene definita attraverso una media pesata di tutti i modelli su base teorica, ad eccezione delle due formulazioni di Zhang et al. (2013). Queste, a causa dei risultati fortemente diversi in caso di elevati valori del modulo di taglio del terreno, vengono considerati nel calcolo del risultato globale solamente qualora questo dato in ingresso connesso alle proprietà meccaniche del terreno sia inferiore o uguale a 20000 kPa . I pesi per il calcolo del valore medio scelto a conclusione della previsione devono essere attribuiti sulla base del Grafico 6-6, presentato nel Capitolo 6.2.3: in particolare, si ritiene di attribuire i pesi maggiori ai modelli di Xiong et al. (2009), e di Godinez et al. (2015). Poiché i risultati ottenuti, e ritenuti validi, non sono lontani dal limite massimo indicato empiricamente da JSCE (2007), anche questo risultato deve essere tenuto in considerazione per la definizione della coppia agente relativamente alle singole progressive di scavo, confermando l'interpretazione

di Ates et al. (2013), secondo cui la valutazione empirica della coppia agente sulla testa fresante risulta affidabile e può non implicare la necessità di considerare parametri diversi dal diametro di scavo.

Un modello di previsione implementato all'interno del programma e fino ad ora non analizzato è quello di Ates et al. (2013), in funzione della forza di spinta sviluppata dalla macchina EPBS. Lo studio del risultato relativo a tale formulazione può essere a questo punto possibile, avendo a disposizione il valore finale di spinta, risultato del modello previsionale. Avendo stabilito dei pesi matematici indicativi per l'esecuzione del modello, sulla base di quanto discusso in precedenza, e utilizzando i dati in ingresso relativi alle tre formazioni geologiche precedentemente considerate (Appendice 2), i valori ottenuti vengono presentati in Tabella 6-21. Si può osservare come i risultati di questo modello siano generalmente inferiori rispetto a quelli relativi alle altre formulazioni, ad eccezione del caso di attraversamento di ghiaia sabbiosa, per il quale il valore ottenuto si avvicina al risultato di Godinez et al. (2015). Per questo motivo, si ritiene che questo modello possa essere trascurato nel computo della previsione finale.

Tabella 6-21. Previsione della coppia

Risultati per la previsione della coppia			
Modello	Ghiaia sabbiosa	Sabbia limosa	Sabbia argillosa
Ates et al. (2013) (kN·m)	8609	8609	8609
Maidl et al. (2012) (kN·m)	9319	9319	9319
JSCE min (2007) (kN·m)	4673	4673	4673
JSCE max (2007) (kN·m)	11682	11682	11682
Godinez et al. (2015) (kN·m)	6620	8196	4433

Risultati per la previsione della coppia			
Modello	Ghiaia sabbiosa	Sabbia limosa	Sabbia argillosa
Xiong et al. (2009) (kN·m)	12196	12175	7294
Wang et al. (2012) (kN·m)	7152	6864	4682
Zhang et al. (2013) (kN·m)	30123	10064	4685
Zhang et al. (2013), fronte di scavo stratificato (kN·m)	25624	9419	4431
Ates et al. (2013), in funzione della spinta (kN·m)	6160	3645	1793
Coppia max (kN·m)	12850	12850	12850
Coppia istantanea (kN·m)	11597	11483	7752

6.4.3 Risultato di previsione per i restanti parametri di scavo

L'implementazione di numerosi modelli analitici di previsione per spinta e coppia ha richiesto un lavoro complesso per la scelta dei valori conclusivi da ricavare attraverso il programma di calcolo creato. Nel caso degli altri parametri, la mancata o limitata possibilità di confronto, dovuta all'implementazione di modelli di previsione unici, permette una definizione univoca dei risultati più semplice, senza la necessità di dare una diversa importanza ai valori ottenuti. L'unico parametro a richiedere una mediazione tra le previsioni ottenute da 2 diversi modelli è la massima velocità di rotazione della testa di scavo, per la quale si è scelto come valore finale il risultato definito dalla media aritmetica. Poiché le due formulazioni differiscono semplicemente per la velocità massima dell'utensile considerata, senza l'ausilio di dati reali non è possibile portare avanti un confronto più approfondito. Per i restanti

parametri di scavo, riportati in Tabella 6-22, i risultati considerati sono quelli direttamente ottenuti dai singoli modelli di previsione dedicati.

Tabella 6-22. Risultati di previsione ottenuti con l'esecuzione del programma, sulla base di dati iniziali teorici

Risultati di previsione complessivi			
Parametro	Ghiaia sabbiosa	Sabbia limosa	Sabbia argillosa
Velocità di rotazione della testa fresante (rev/min)	1,7	1,7	1,7
Avanzamento istantaneo (mm/min)	40,9	40,9	40,9
Avanzamento complessivo (mm/min)	21	21	21
Penetrazione (mm/rev)	23,5	23,5	23,5
Coppia agente su coclea (kN·m)	49	171	285
Velocità di rotazione coclea (rev/min)	70,2	70,2	70,2
Velocità di rotazione coclea, a pressione costante in camera di scavo (rev/min)	70,2	70,2	70,2
Energia specifica (MJ/m³)	10,63	10,51	7,04
Numero di anelli al giorno, in funzione di ore lavorative indicate (day⁻¹)	22	22	22
Ore lavorative totali, in funzione di numero anelli giornalieri indicato (h)	6476	6476	6476
Coppia max (kN·m)	12850	12850	12850

Risultati di previsione complessivi			
Parametro	Ghiaia sabbiosa	Sabbia limosa	Sabbia argillosa
Coppia istantanea (kN·m)	11597	11483	7752
Spinta max (kN)	72261	72261	72261
Spinta istantanea (kN)	40016	26873	15689

6.5 Definizione di pesi e fattori di sicurezza

Nel Capitolo 4 sono stati descritti tutti i modelli di calcolo implementati all'interno del programma creato, spiegandone nel dettaglio la loro struttura concettuale e il significato fisico dei parametri iniziali da essi richiesti. Durante tale approfondimento, è stato sottolineato in diverse occasioni come gli autori delle formulazioni indicassero la necessità di adottare fattori di sicurezza per tener conto di tutte quelle componenti che, seppure trascurabili, forniscono un certo contributo nello sviluppo delle forze dovute alle interazioni tra TBM-S e terreno. Tuttavia, nessuno degli autori ha indicato valori utilizzabili per questi fattori di sicurezza, lasciando la decisione agli eventuali utilizzatori dei loro modelli, sulla base di esperienze passate e dati storici.

La definizione di questi fattori moltiplicativi non è stata affrontata prima nel corso della trattazione, poiché, non avendo a disposizione dati sufficienti per una loro corretta valutazione, si è data priorità all'ottenimento di un unico risultato per ciascun parametro di scavo calcolato dal modello di previsione, studiando qualitativamente il peso dei diversi modelli per il raccoglimento di tutti i valori con stesso significato fisico all'interno di un risultato mediato. La scelta di non affrontare quantitativamente la definizione dei fattori di sicurezza

è stata anche dettata dalla volontà di assegnare proprio a questi risultati conclusivi un coefficiente moltiplicatore in grado di offrire una certa sicurezza all'utilizzatore della previsione. Tuttavia, anche in questo caso sarebbe necessario un confronto con dati relativi a situazioni di scavo reali, in modo da poter scegliere l'entità dei fattori di sicurezza sulla base di uno studio empirico, tenendo sempre in considerazione le approssimazioni alla base di formulazioni analitiche per la previsione dei parametri di scavo attraverso terreni (Capitolo 2.1).

Il modello unico presentato è stato fino a qui analizzato utilizzando dati iniziali scelti dall'autore di questo studio su base teorica, e la definizione dei risultati conclusivi della previsione è stata effettuata unicamente confrontando tra di loro i valori teorici ottenuti con l'esecuzione di tutte le formulazioni implementate, nel tentativo di riconoscere una maggiore affidabilità, o una scarsa attendibilità di un risultato rispetto ad un altro. Tuttavia, la veridicità di queste scelte non può essere confermata senza un'analisi approfondita che comprenda il confronto con casi storici, in numero tanto maggiore quanto più si voglia ottenere precisione nella definizione dei fattori di sicurezza e dei pesi per il calcolo dei valori medi. Per questo motivo, il codice informatico è stato delineato in modo da rendere possibile una facile correzione dei valori usati come fattori di sicurezza e pesi per il calcolo di medie matematiche.

7. Confronto dei risultati con dati storici

Il modello di previsione per i principali parametri di scavo relativi all'uso di una macchina EPBS in terreni, sviluppato tramite implementazione delle formulazioni raccolte all'interno del Capitolo 4, è stato validato utilizzando dati teorici, che hanno portato a risultati non lontani tra loro, salvo alcune eccezioni identificate e discusse. Il lavoro di analisi condotto confrontando i diversi valori ottenuti, ha permesso di individuare a priori i modelli apparentemente più affidabili, sulla base di un andamento più o meno comune, identificato variando i dati in ingresso (Capitolo 6.2 e Capitolo 6.3).

Tuttavia, lo scopo di questa trattazione è comprendere l'affidabilità di un'eventuale applicazione pratica del programma di calcolo creato, valutando la coerenza dei risultati ottenibili con i valori misurati durante le attività di scavo. Per questo motivo, è indispensabile effettuare un confronto con dati relativi a casi storici, in riferimento all'uso di macchine EPBS attraverso formazioni geologiche identificabili come terreni, secondo la definizione fornita nell'Introduzione di questa trattazione. Gli scopi pratici di un confronto tale sono molteplici, legati certamente alla definizione dei fattori di sicurezza da applicare ai valori finali, ma soprattutto alla definizione dei pesi matematici da attribuire ai singoli risultati, verificando la veridicità delle interpretazioni date nel Capitolo 6.4.

In seguito, vengono presentati i dati relativi a due situazioni reali di scavo, cortesemente forniti all'autore di questa tesi per effettuare questa operazione di confronto e verifica dei risultati.

7.1 Dati di input

La difficoltà maggiore riscontrata è stata la mancanza di dati da utilizzare come input per il programma. Questa situazione non deve sorprendere, vista la complessità delle formulazioni meccaniche implementate, relativamente ai parametri richiesti per i calcoli. Tale considerazione porta ad un'osservazione, possibile ancora prima dell'ottenimento dei risultati di previsione: l'applicabilità di un modello analitico per le previsioni di parametri nei difficili contesti considerati richiede la conoscenza di numerose nozioni iniziali relative alla struttura della macchina EPBS e alla geologia attraversata, che spesso non sono di facile reperibilità.

Per poter ottenere dei risultati idonei per un primo lavoro di confronto, quindi, si è deciso di provare ad utilizzare dati teorici di input, qualora non disponibili quelli reali. Il programma di calcolo è stato eseguito considerando due diversi casi storici, che nel corso della trattazione verranno identificati come "Galleria 1" e "Galleria 2", per ciascuno dei quali il programma viene eseguito una prima volta con i soli dati a disposizione, e successivamente con l'aggiunta dei dati teorici per l'esecuzione completa dei modelli implementati.

7.1.1 Galleria 1

Non avendo a disposizione dati sufficienti per una previsione dei parametri in riferimento alle progressive di scavo in studio, l'analisi condotta in questo Capitolo si basa sul confronto tra i parametri previsti e i loro valori misurati lungo l'estensione dello scavo. In Tabella 7-1 vengono mostrati i dati di *input* comuni a tutte le progressive considerate, indicativamente definite dai numeri 10, 11 e 12, avendo indicato su colonne diverse i valori reali e quelli teorici, aggiunti successivamente per un'esecuzione completa del modello. In Appendice 5 vengono presentati i dati relativi al modello geologico e

geometrico coinvolto, mostrando anche i dati relativi alle altre due progressive considerate per l'analisi dei risultati con l'immissione completa dei dati iniziali: in questo caso, tutti i valori utilizzati rispecchiano la situazione reale dell'attività di scavo.

Tabella 7-1. Dati iniziali utilizzati per la previsione dei parametri di scavo relativi a Galleria 1

Dati in input per Galleria 1		
Parametro	Valore reale	Valore teorico
Progressiva di riferimento	10	10
Diametro testa di scavo (m)	7,76	
Spessore testa di scavo (m)		0,7
Apertura (-)	0,38	
Lunghezza scudo (m)	7,68	
Numero di spazzole di coda (-)	3	
Lunghezza di contatto tra spazzole di coda e conci (m)		1
Spessore lama dello scudo (m)		
Resistenza di picco del terreno alla penetrazione (kPa)		
Volume camera di scavo (m³)		95
Diametro esterno anello di rivestimento (m)	7,76	
Profondità anello di rivestimento (m)	1,4	
Peso anello di rivestimento (kN)		170
Peso backup (kN)	5700	
Peso della macchina (zona scudo) (kN)	6000	
Copertura (rispetto calotta) (m)		

Dati in input per Galleria 1		
Parametro	Valore reale	Valore teorico
Tensione radiale media (kPa)		
Peso edifici (kPa)		0
Carichi applicati (kPa)		0
Pressione di supporto al fronte (kPa)		
Pressione media in camera di scavo (kPa)		
Rapporto tra pressione media sul retro e sul fronte della testa di scavo (-)	0,85	
Pressione quota calotta (kPa)	182	
Pressione quota arco rovescio (kPa)	395	
Adesione argilla – scudo (kPa)	0	
Coesione non drenata (kPa)		
Diametro interno coclea (m)	0,9	
Diametro albero coclea (m)		0,2
Lunghezza coclea (m)		4,5
Efficienza volumetrica coclea (-)		0,7
Passo tra eliche (mm)		700
Spessore delle eliche (m)		0,03
Variazione di pressione in camera di scavo (kPa)		0
Distanza di riferimento (m)		1,4
Modulo secante del terreno condizionato (kPa)		50000
Numero di barre miscelatrici (-)		5

Dati in input per Galleria 1		
Parametro	Valore reale	Valore teorico
Numero di supporti per la testa fresante (-)		4
Lunghezza media barre miscelatrici (m)		0,7
Lunghezza media supporti (m)		1,5
Distanza media tra barre miscelatrici e asse della galleria (m)		3
Distanza media tra supporti e asse della galleria (m)		0,5
Dimensione trasversale media barre miscelatrici (m)		0,25
Dimensione trasversale media supporti (m)		0,3
Coefficiente di attrito backup (-)		0,2
Coefficiente di attrito spazzole di coda – conci (-)		0,3
Coefficiente di attrito barre miscelatrici – terreno condizionato (-)		0,2
Angolo di attrito utensile – terreno (°)		28
Coefficiente di attrito retro della testa fresante – terreno condizionato (-)		0,2
Coefficiente di attrito dinamico testa fresante – terreno (-)		0,4
Coefficiente di attrito terreno – scudo (-)		0,45

Dati in input per Galleria 1		
Parametro	Valore reale	Valore teorico
Coefficiente di attrito terreno condizionato – aperture (-)		0,35
Coefficiente di attrito dinamico lato della testa fresante – terreno (-)		0,45
Lunghezza media <i>scrapers</i> (mm)		150
Larghezza media <i>scrapers</i> (m)		0,1
Numero di <i>scrapers</i> (-)		200
Superficie di contatto utensile – terreno (m²)		0,03
Carico normale su singolo utensile (kN)		
Velocità tangenziale massima dell'utensile esterno (m/min)		
<i>Rake angle</i> (°)		30
Pressione laterale in fase di curvatura (kPa)		0
Lunghezza galleria (m)	1700	
Ore lavorative totali (h)		3000
<i>Machine Utilization Time</i> (-)		0,45
Numero di anelli per giorno (day⁻¹)		10

7.1.2 Galleria 2

Per la Galleria 2, i dati storici forniti all'autore, hanno permesso l'analisi di un'unica progressiva di scavo, indicativamente identificata con il numero 20, e i valori usati come input sono presentati in Tabella 7-2. In Appendice 5 vengono mostrati i dati relativi al modello geologico e geometrico coinvolto dalla progressiva considerata: in questo caso, tutti i valori utilizzati rispecchiano la situazione reale dell'attività di scavo.

Tabella 7-2. Dati iniziali utilizzati per la previsione dei parametri di scavo relativi a Galleria 2

Dati in input per Galleria 2		
Parametro	Valore reale	Valore teorico
Progressiva di riferimento	20	20
Diametro testa di scavo (m)	6,34	
Spessore testa di scavo (m)	0,5	
Apertura (-)	0,4	
Lunghezza scudo (m)	8,87	
Numero di spazzole di coda (-)		3
Lunghezza di contatto tra spazzole di coda e conci (m)		1
Spessore lama dello scudo (m)		
Resistenza di picco del terreno alla penetrazione (kPa)		
Volume camera di scavo (m³)		57
Diametro esterno anello di rivestimento (m)	6,06	
Profondità anello di rivestimento (m)	1,4	
Peso anello di rivestimento (kN)	171	

Dati in input per Galleria 2		
Parametro	Valore reale	Valore teorico
Peso backup (kN)	7650	
Peso della macchina (zona scudo) (kN)	3250	
Quota s.l.m. piano campagna (m)	113,7	
Quota s.l.m. asse galleria (m)	100,8	
Copertura (rispetto calotta) (m)		
Quota piezometrica s.l.m. (m)	105,0	
Tensione radiale media (kPa)		
Peso edifici (kPa)		0
Carichi applicati (kPa)		0
Pressione di supporto al fronte (kPa)		
Pressione media in camera di scavo (kPa)		
Rapporto tra pressione media sul retro e sul fronte della testa di scavo (-)	0,85	
Pressione quota calotta (kPa)	83	
Pressione quota arco rovescio (kPa)	166	
Adesione argilla – scudo (kPa)	0	
Coazione non drenata (kPa)		
Diametro interno coclea (m)		0,9
Diametro albero coclea (m)		0,2
Lunghezza coclea (m)	12	
Efficienza volumetrica coclea (-)		0,7
Passo tra eliche (mm)		700
Spessore delle eliche (m)		0,03

Dati in input per Galleria 2		
Parametro	Valore reale	Valore teorico
Variazione di pressione in camera di scavo (kPa)		0
Distanza di riferimento (m)		1,4
Modulo secante del terreno condizionato (kPa)		50000
Numero di barre miscelatrici (-)		5
Numero di supporti per la testa fresante (-)		4
Lunghezza media barre miscelatrici (m)		0,7
Lunghezza media supporti (m)		1,5
Distanza media tra barre miscelatrici e asse della galleria (m)		3
Distanza media tra supporti e asse della galleria (m)		0,5
Dimensione trasversale media barre miscelatrici (m)		0,25
Dimensione trasversale media supporti (m)		0,3
Coefficiente di attrito backup (-)		0,2
Coefficiente di attrito spazzole di coda – conci (-)		0,3
Coefficiente di attrito barre miscelatrici – terreno condizionato (-)		0,2
Angolo di attrito utensile – terreno (°)		28

Dati in input per Galleria 2		
Parametro	Valore reale	Valore teorico
Coefficiente di attrito retro della testa fresante – terreno condizionato (-)		0,2
Coefficiente di attrito dinamico testa fresante – terreno (-)		0,4
Coefficiente di attrito terreno – scudo (-)		0,45
Coefficiente di attrito terreno condizionato – aperture (-)		0,35
Coefficiente di attrito dinamico lato della testa fresante – terreno (-)		0,45
Lunghezza media <i>scrapers</i> (mm)		150
Larghezza media <i>scrapers</i> (m)		0,1
Numero di <i>scrapers</i> (-)		200
Superficie di contatto utensile – terreno (m²)		0,03
Carico normale su singolo utensile (kN)		
Velocità tangenziale massima dell'utensile esterno (m/min)		
<i>Rake angle</i> (°)		30
Pressione laterale in fase di curvatura (kPa)		0
Lunghezza galleria (m)		
Ore lavorative totali (h)		3000
<i>Machine Utilization Time</i> (-)		0,45
Numero di anelli per giorno (day⁻¹)		10

7.2 Analisi dei risultati per Galleria 1

I dati iniziali relativi al caso storico considerato sono stati in parte utilizzati per le prime fasi di validazione e analisi del programma di calcolo costruito, soprattutto per quanto riguarda i parametri strutturali della macchina EPBS. Anche le formazioni geologiche coinvolte sono caratterizzate da proprietà geotecniche simili a quelle utilizzate per i confronti presentati nel Capitolo 6, sebbene la stratigrafia fosse differente. Queste prime considerazioni permettono di ipotizzare come risultati dei valori con ordini di grandezza non diversi da quelli ottenuti durante le esecuzioni precedenti del modello. Come si può notare dalle Tabelle sottostanti, i valori reali di spinta e coppia relativi alle progressive di scavo considerate sono molto inferiori rispetto a quelli ottenuti dalla previsione nel corso della sperimentazione del programma.

Tabella 7-3. Parametri di scavo storici, relativi a Galleria 1, progressiva 10

Galleria 1: valori misurati per progressiva 10	
Parametro	Valore
Spinta (kN)	15745
Coppia (kN·m)	10588
Velocità di rotazione (rpm)	1,3
Penetrazione (mm/rev)	26
Avanzamento (mm/min)	31

Tabella 7-4. Parametri di scavo storici, relativi a Galleria 1, progressiva 11

Galleria 1: valori misurati per progressiva 11	
Parametro	Valore
Spinta (kN)	10541

Galleria 1: valori misurati per progressiva 11	
Parametro	Valore
Coppia (kN·m)	6409
Velocità di rotazione (rpm)	1,3
Penetrazione (mm/rev)	35
Avanzamento (mm/min)	43

Tabella 7-5. Parametri di scavo storici, relativi a Galleria 2, progressiva 12

Galleria 1: valori misurati per progressiva 12	
Parametro	Valore
Spinta (kN)	10326
Coppia (kN·m)	4777
Velocità di rotazione (rpm)	1,3
Penetrazione (mm/rev)	39
Avanzamento (mm/min)	49

A seguito dell'esecuzione del programma con l'inserimento dei soli dati reali a disposizione, il risultato che si può ottenere per quanto riguarda la spinta è solamente quello relativo ai modelli di calcolo empirici, in funzione del solo diametro di scavo. I dati inseriti, infatti, non sono sufficienti per l'esecuzione delle formulazioni più complesse. La stessa osservazione è valida anche per la previsione della coppia, per la quale, tuttavia, è possibile ottenere anche il risultato legato alla progressiva considerata, a causa del peso attribuito al modello JSCE (2007) per la definizione di tale valore.

Dalla previsione ottenuta per la spinta, quindi, si può solamente notare come i valori risultanti siano nettamente maggiori rispetto alla forza generata

dalla macchina EPBS per l'attraversamento della progressiva 10, e tale considerazione rimane valida anche confrontando la massima forza di spinta suggerita dalla previsione, definita dal limite massimo di Krause (1987), con la spinta generata lungo tutto il tratto noto della Galleria 1 (Grafico 7-1). Anche il valore suggerito dal modello di Szechy (1969) si dimostra nettamente superiore, nonostante sia stato osservato come il meno cautelativo rispetto a tutte le formulazioni su base empirica per il calcolo della spinta massima.

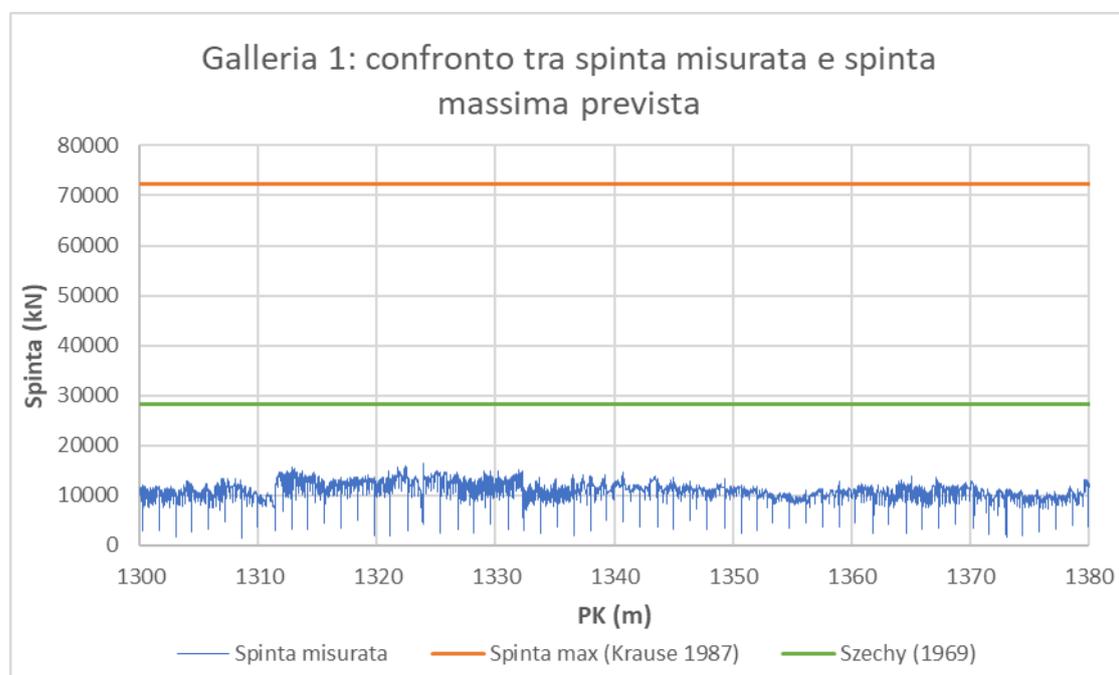


Grafico 7-1. Confronto tra spinta massima prevista e spinta misurata durante la realizzazione di Galleria 1

Per quanto riguarda la coppia, è interessante notare come il valore risultante come limite massimo dal modello JSCE (2007) (Tabella 7-6) sia generalmente vicino ai valori più elevati misurati, e il risultato globale indicato, $11682 \text{ kN} \cdot \text{m}$, anche privo di fattori moltiplicativi può essere effettivamente considerato accettabile e in favore di sicurezza. Inoltre, confrontando questo

valore con le misurazioni della coppia complessive lungo la tratta considerata, si può osservare come questo possa essere ritenuto un indicatore della massima coppia di cui la macchina EPBS dovrebbe disporre, anche senza l'applicazione di un fattore di sicurezza. Tuttavia, applicando un fattore di sicurezza pari a 1,1, dal Grafico 7-2 si può notare come l'indicazione di coppia massima potrebbe essere ritenuta ancora valida, seppure più elevata: prevedere una coppia massima di circa $12900 \text{ kN} \cdot \text{m}$ può essere di aiuto nei casi più critici, senza comportare una sovrastima economicamente dannosa.

Tabella 7-6. Risultati di previsione della coppia per Galleria 1

Galleria 1: previsione per coppia	
Riferimento	Valore
Progressiva di riferimento	10
Ates et al. (2013) (kN·m)	8609
Maidl et al. (2012) (kN·m)	9317
JSCE (2007) (kN·m) min	4673
JSCE (2007) (kN·m) max	11682
Coppia max (kN·m)	12850
Coppia istantanea (kN·m)	11682

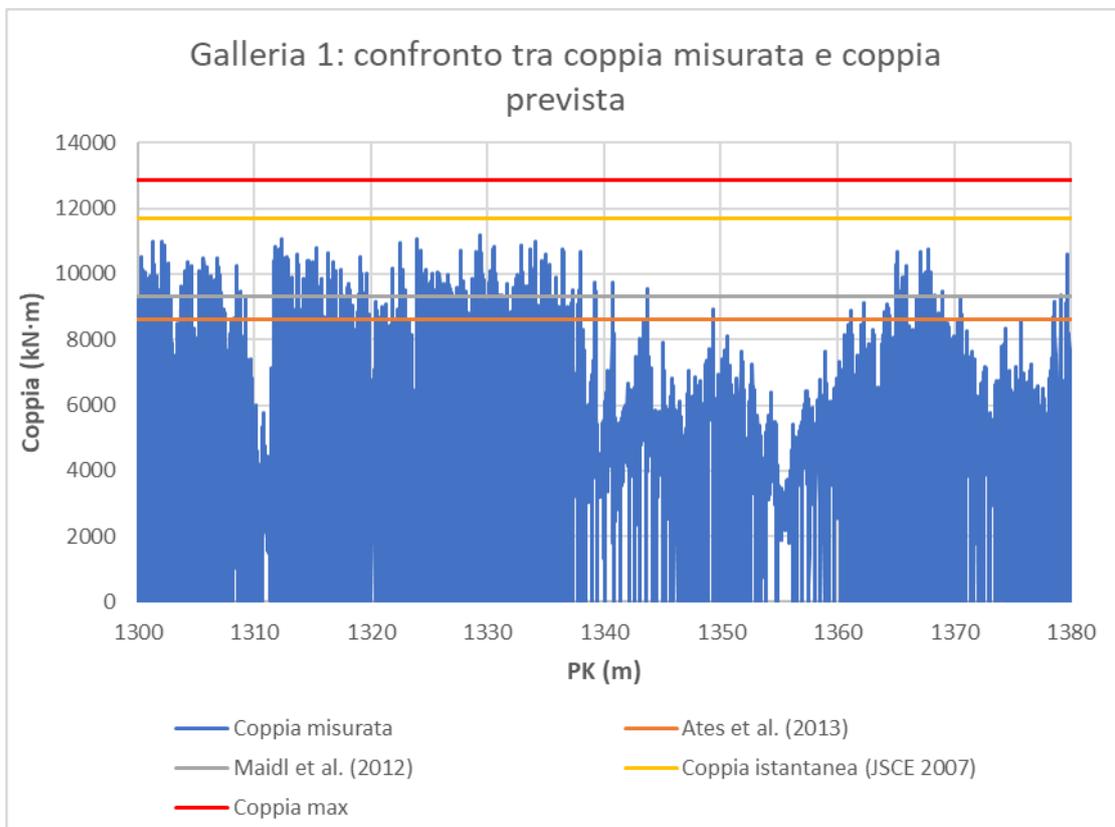


Grafico 7-2. Confronto tra coppia prevista e coppia misurata durante la realizzazione di Galleria 1

Anche il confronto relativo all'avanzamento permette un'interpretazione ottimistica dei risultati. Il Grafico 7-3 mostra come la previsione dell'avanzamento, seppur su base empirica e in funzione del solo diametro di scavo, fornisca un risultato pari a 41 mm/min che, confrontato con i dati reali a disposizione, appare approssimare i valori massimi misurati lungo il percorso di scavo.

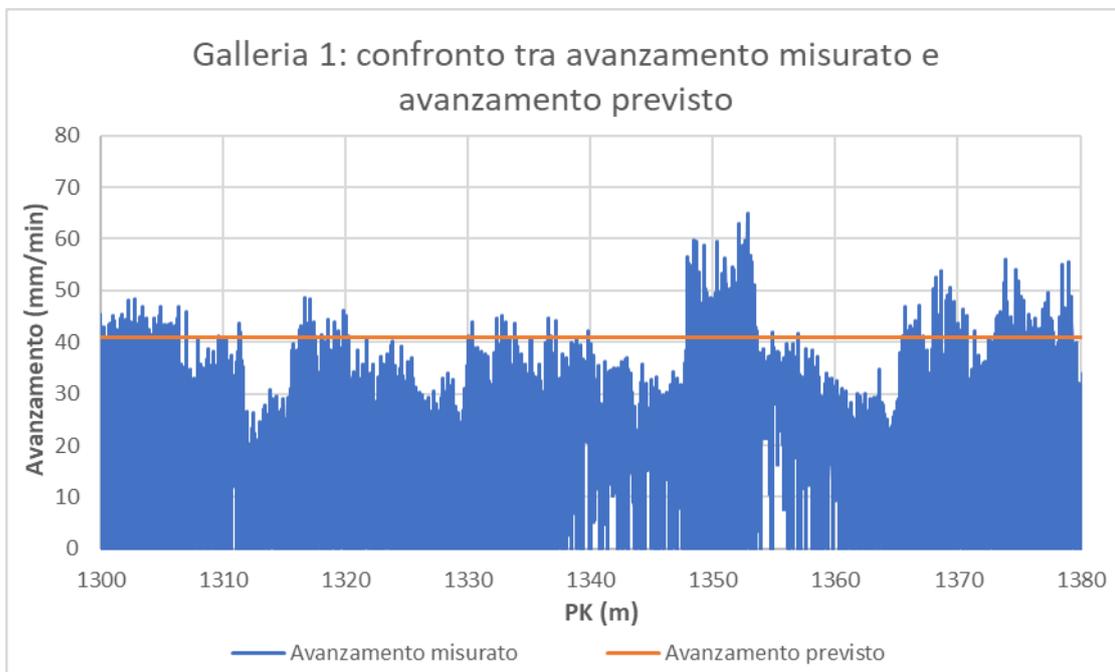


Grafico 7-3. Confronto tra velocità di avanzamento prevista e velocità di avanzamento misurata durante la realizzazione di Galleria 1

La velocità di rotazione massima indicata come risultato della previsione, pari a $1,7 \text{ rev/min}$, se confrontata con i valori misurati durante lo scavo della tratta considerata, risulta un limite superiore sempre rispettato, ad eccezione di rare occasioni probabilmente legate a necessità particolari. Siccome questo parametro viene utilizzato all'interno del programma di calcolo come dato in ingresso per alcuni modelli, potrebbe venire valutato l'impiego di un fattore correttivo per considerarne un valore più basso e più vicino alla velocità di rotazione reale.

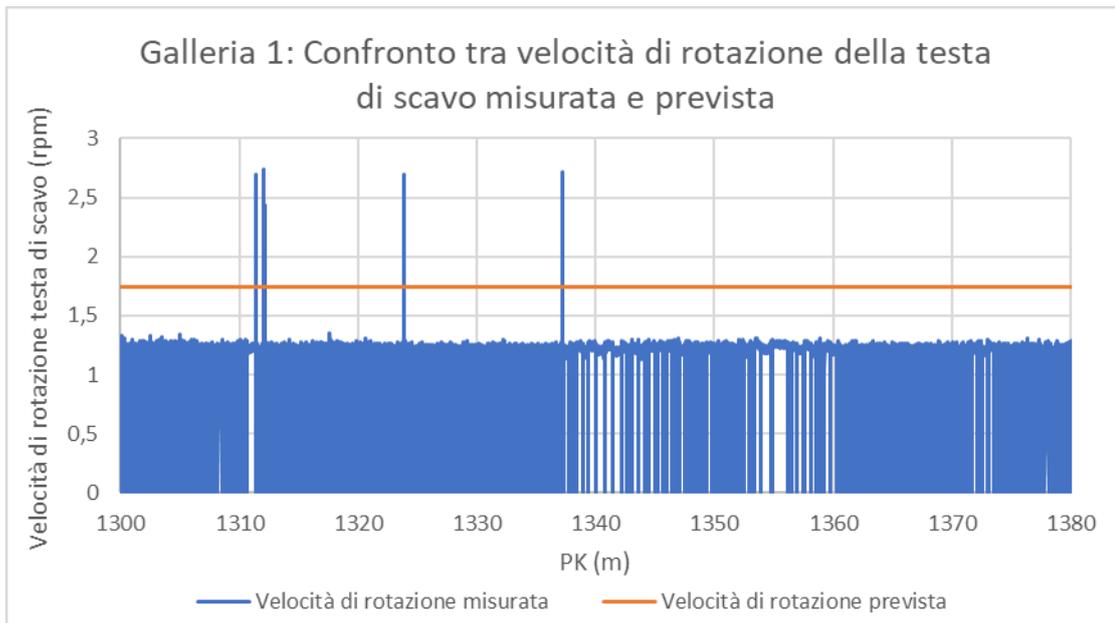


Grafico 7-4. Confronto tra velocità di rotazione della testa fresante prevista e velocità di rotazione misurata durante la realizzazione di Galleria 1

La previsione della penetrazione fornisce il risultato di 24 mm/rev , indipendentemente dai dati iniziali inseriti, essendo calcolato con un rapporto tra due parametri entrambi ottenuti dal programma in funzione del solo diametro di scavo. Questo valore, confrontato con le misurazioni effettuate durante lo scavo della galleria, riesce apparentemente ad approssimare un valore medio di penetrazione. Occorre approfondire lo studio di questo valore di penetrazione tramite il confronto con altri casi storici.

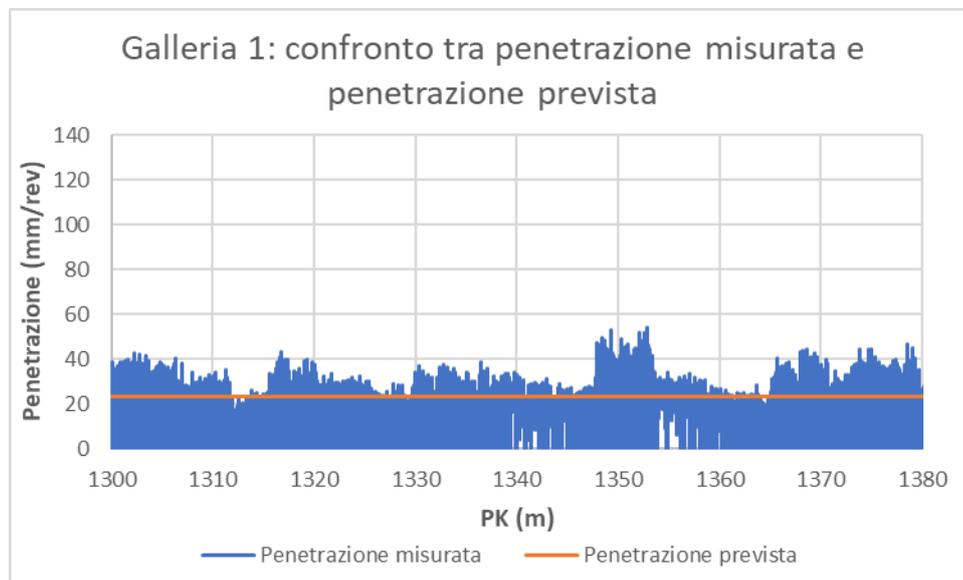


Grafico 7-5. Confronto tra penetrazione prevista e penetrazione misurata durante la realizzazione di Galleria 1

7.3 Analisi dei risultati per Galleria 2

I dati relativi alla Galleria 2 non sono stati utilizzati in precedenza per la validazione del modello, perciò non è possibile fare considerazioni a priori relativamente ai risultati attesi. In Tabella 7-7 vengono indicati i parametri di scavo riferiti alla progressiva 20, utilizzati in seguito per il confronto con i risultati della previsione.

Tabella 7-7. Parametri di scavo storici, relativi a Galleria 2, progressiva 20

Galleria 2: valori misurati per progressiva 20	
Parametro	Valore
Spinta (kN)	17192
Coppia (kN·m)	3894
Velocità di rotazione (rpm)	2,1
Penetrazione (mm/rev)	25
Avanzamento (mm/min)	44

Come per la Galleria 1, a seguito dell'esecuzione del programma con l'inserimento dei soli dati reali a disposizione, il risultato che si può ottenere per quanto riguarda la spinta è solamente quello relativo ai modelli di calcolo empirici, in funzione del solo diametro di scavo. I dati inseriti, infatti, non sono sufficienti per l'esecuzione delle formulazioni più complesse. La stessa osservazione è valida anche per la previsione della coppia, per la quale, tuttavia, è possibile ottenere anche il risultato legato alla progressiva considerata, a causa del peso attribuito al modello JSCE (2007) per la definizione di tale valore.

Dalla previsione ottenuta per la spinta, si può notare come i valori risultanti (Tabella 7-8) siano maggiori rispetto alla forza generata dalla macchina EPBS per l'attraversamento della progressiva 20, ma alcune formulazioni propongono valori più vicini rispetto alla previsione per la progressiva 10 della Galleria 1. Considerando che i modelli su base empirica vengono utilizzati con l'obiettivo di suggerire un valore massimo di spinta che la TBM-S deve poter essere in grado di sviluppare, è necessario approfondire, confrontando tali risultati con i dati relativi all'intera lunghezza nota dello scavo. Dal Grafico 7-6 si può osservare come il valore di spinta indicato da Szechy (1969) appaia come un limite massimo sufficiente per la forza di spinta, sebbene senza un certo margine di

sicurezza. È dunque possibile che sia necessario rivalutare l'attendibilità dei modelli empirici caratterizzati da un valore di spinta minore, ai quali, al contrario, è stato attribuito un peso inferiore nell'analisi portata avanti in precedenza.

Tabella 7-8. Risultati di previsione della spinta per galleria 2

Galleria 2: previsione per spinta	
Riferimento	Valore
Progressiva di riferimento	20
Ates et al. (2013) (kN)	36381
Krause min (1987) (kN)	20098
Krause max (1987) (kN)	48235
Szechy (1969) (kN)	18942
Spinta max (kN)	48235



Grafico 7-6. Confronto tra spinta prevista con modello di Szechy (1967) e spinta misurata durante la realizzazione di Galleria 2

Valutando i risultati ottenuti per la previsione della coppia, è stato nuovamente possibile ottenere sia il valore massimo, che quello relativo alla progressiva considerata. Tuttavia, a differenza della previsione per Galleria 1, i modelli in funzione del diametro di scavo che più si avvicinano al valore legato alla sezione considerata sono quelli di Ates et al. (2013) e Maidl et al. (2012), i cui risultati sono riportati in Tabella 7-9. Relativamente alla coppia massima suggerita dal modello previsionale, si può notare come tale parametro sia abbondantemente a favore di sicurezza, a tal punto da poter suggerire la necessità di considerare l'applicazione di un fattore correttivo in grado di ridimensionarne il valore, o una diversa interpretazione per la definizione della previsione finale.

Tabella 7-9. Risultati di previsione della coppia per Galleria 2

Galleria 2: previsione per coppia	
Riferimento	Valore
Progressiva di riferimento	20
Ates et al. (2013) (kN·m)	4551
Maidl et al. (2012) (kN·m)	4837
JSCE (2007) (kN·m) min	2548
JSCE (2007) (kN·m) max	6371
Coppia max (kN·m)	7008
Coppia istantanea (kN·m)	6371

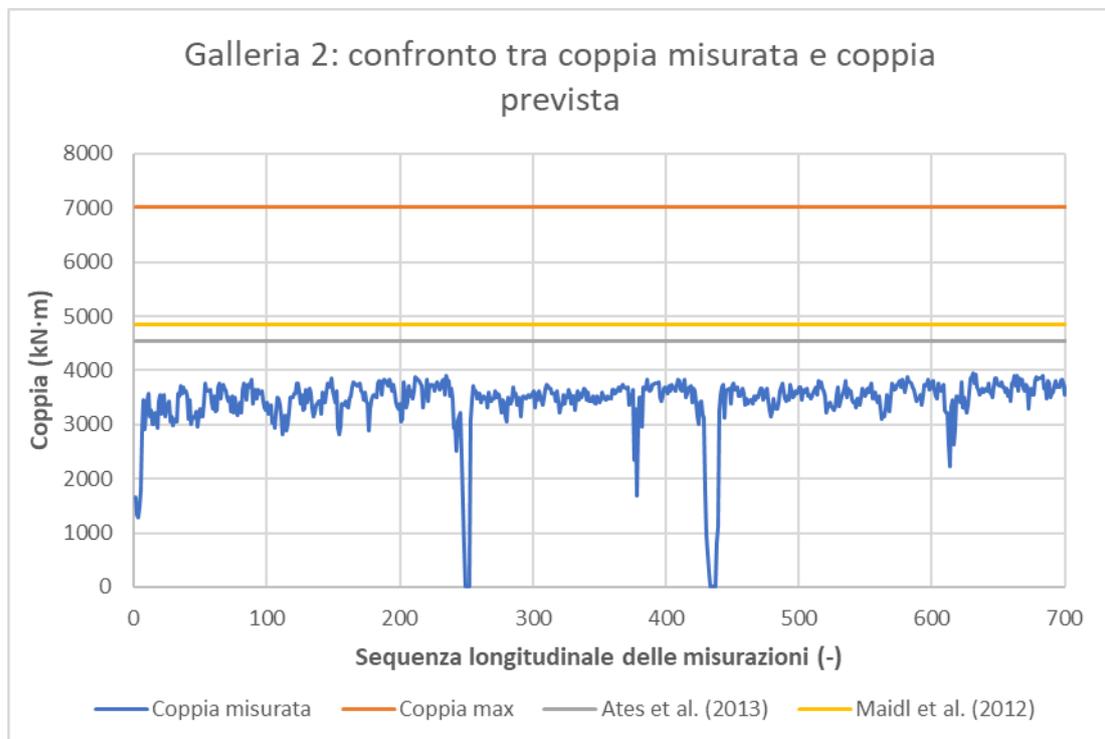


Grafico 7-7. Confronto tra coppia prevista e coppia misurata durante la realizzazione di Galleria 2

Confrontando i valori relativi all'avanzamento, si può osservare come il risultato ottenuto dal modello di previsione, pari a 50 mm/min , non sia distante dal parametro effettivamente misurato in corrispondenza della progressiva 20. Tuttavia, la formulazione utilizzata per questa previsione si basa unicamente sul diametro di scavo, e, confrontando il risultato con l'avanzamento misurato lungo tutto il tragitto noto (Grafico 7-8), si può notare come, similmente alla Galleria 1, la previsione ottenuta si avvicina ad approssimare l'andamento misurato lungo tutta la progressione di avanzamento, seppure senza poter considerare le discontinuità che caratterizzano il parametro reale.

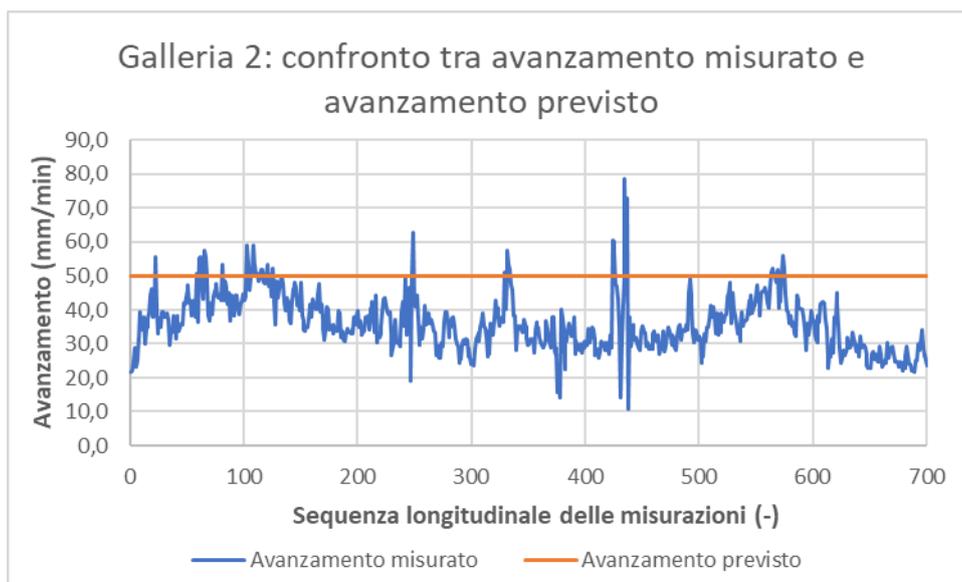


Grafico 7-8. Confronto tra velocità di avanzamento prevista e velocità di avanzamento misurata durante la realizzazione di Galleria 2

Come per Galleria 1, la velocità di rotazione massima indicata al termine della previsione, se confrontata con i valori misurati durante lo scavo della tratta considerata, risulta un limite superiore sempre rispettato, ad eccezione di un unico picco. Nel caso della Galleria 2, però, il valore previsto di $2,1 \text{ rev/min}$ non

è distante da quello misurato durante le operazioni di scavo, e questo mette in discussione la validità dell'osservazione precedentemente portata avanti durante la valutazione del risultato relativo alla Galleria 1, che proponeva di considerare un fattore moltiplicativo per ridurre il valore.



Grafico 7-9. Confronto tra velocità di rotazione della testa di scavo prevista e velocità di rotazione misurata durante la realizzazione di Galleria 2

Come per Galleria 1, la previsione della penetrazione risulta coerente con le misurazioni registrate durante le operazioni di scavo, e permette di considerare valida tale approssimazione, sulla base dei due casi storici considerati.

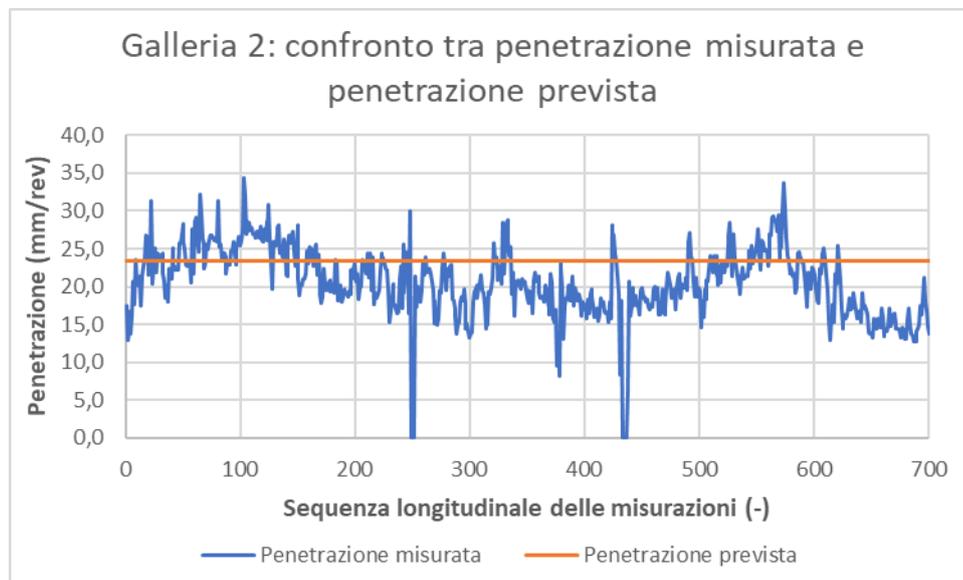


Grafico 7-10. Confronto tra penetrazione prevista e penetrazione misurata durante la realizzazione di Galleria 2

7.4 Applicabilità del modello

La validità della previsione ottenuta con il modello presentato è stata messa in discussione dal confronto dei risultati ottenuti in relazione ai due casi storici considerati. Le osservazioni mosse all'interno dei Capitoli 7.2 e 7.3 rendono evidente la necessità di apportare modiche e miglioramenti al programma di calcolo, soprattutto per quanto riguarda i parametri di spinta e coppia, che rivestono il maggiore interesse in ambito previsionale. Tuttavia, il confronto effettuato ha permesso di notare come alcuni dei risultati abbiano saputo approssimare con discreta correttezza i valori reali corrispondenti, lasciando presagire la possibilità di ottimizzare il programma di calcolo in modo da renderne le previsioni effettivamente valide e applicabili.

Senza dare peso particolare ai risultati ottenuti con il completamento dei dati iniziali tramite valori teorici, mostrati in Appendice 7 e Appendice 8, non necessariamente legati ai casi reali analizzati, si è visto come i valori di previsione per la spinta siano risultati superiori rispetto a quelli reali, sia nel caso della Galleria 1, che della Galleria 2. Nonostante ciò, in riferimento a questo secondo scavo si è notato come i risultati teorici ottenuti dai modelli più complessi siano stati in parte in grado di approssimare il valore reale di spinta applicata dalla macchina EPBS. La previsione relativa alla coppia, invece, ha mostrato risultati contraddittori tra i due scavi, essendosi dimostrata attendibile per la Galleria 1, ma più lontana dalla realtà nel caso della Galleria 2. Tuttavia, i risultati ottenuti nel primo caso non possono essere trascurati, e permettono di sostenere che il modello in esame possa essere applicabile, sebbene sia necessario intervenire per migliorarne la precisione.

Risultati migliori sono stati osservati nel caso di tutti gli altri parametri ottenuti dalla previsione, ad eccezione dei dati relativi alla coclea e all'energia specifica, per cui non si hanno a disposizione termini di confronto. In particolare, per entrambe le progressive considerate si è visto come la velocità di rotazione massima indicata possa essere considerata un limite globalmente rispettato nella realtà, e, qualora si allontanano dai valori di velocità relativi alle singole progressive di scavo, in essa può considerarsi compreso un fattore di sicurezza che può rientrare all'interno di quei calcoli che utilizzano tale parametro per ottenere i valori di spinta e coppia.

Sulla base dei risultati osservati e del confronto portato avanti in questo Capitolo, risulta chiaro come un approfondimento maggiore sia necessario per poter valutare l'applicabilità del programma di previsione creato. Le differenze tra i casi storici utilizzati per l'analisi, infatti, non permettono di riconoscere le giuste modalità di intervento per l'ottimizzazione del programma di calcolo, pur tuttavia dimostrandone i limiti e le potenzialità. La mancanza di dati iniziali completi, relativamente alle necessità dei diversi modelli implementati, è un forte limite per poterne valutare la correttezza di previsione, ma è un segnale

che dimostra la difficoltà di reperibilità connessa a molti parametri richiesti in ingresso.

Per tale motivo, si ritiene che il modello di previsione presentato sia caratterizzato da una complessità che ne richiede uno studio di verifica più approfondito, per cui è necessaria la disponibilità di una banca dati ricca di parametri reali da poter utilizzare come confronto. Inoltre, affinché questo programma possa rivelarsi effettivamente applicabile in fase preliminare di progetto, occorre ottimizzarne la struttura, prevedendo pesi per le formulazioni e fattori di sicurezza definiti empiricamente, e in grado di approssimare dati di difficile reperimento, la cui richiesta in ingresso dev'essere possibilmente trascurata: nel Capitolo 6.3 si è visto come alcuni parametri abbiano un'influenza minore sulla previsione finale.

Il potenziale del modello presentato è elevato, e i risultati ottenuti dal confronto con i dati reali permettono un certo ottimismo, pur con la consapevolezza di un miglioramento necessario. Va considerato che le formulazioni implementate promettono previsioni in funzione di parametri geotecnici molteplici, che i dati a disposizione dell'autore non hanno permesso di considerare. Il lavoro svolto e presentato in questa trattazione può certamente essere considerato un valido punto di partenza per l'ottenimento di un modello di previsione analitico, in grado di fornire risultati attendibili, ma il suo successo è legato alla disponibilità di dati reali con cui sperimentarlo ed ottimizzarlo. Tale considerazione non sorprende, poiché il contesto per cui si è tentato di offrire una modalità analitica di previsione è caratterizzato da una variabilità e un'incertezza tali da richiedere l'affiancamento di risultati empirici alla teoria.

8. Conclusioni

L'utilizzo sempre maggiore di macchine EPBS (*Earth Pressure Balance Shields*) per la realizzazione di gallerie a livello globale è stata la principale motivazione per questo lavoro, considerandone l'impiego per la realizzazione di gallerie attraverso formazioni superficiali, caratterizzate spesso da scarsa coesione, e granulometria eterogenea. Lo scavo attraverso simili strutture geologiche, definibili come terreni, può incontrare criticità e problematiche complesse, spesso imprevedibili durante le fasi iniziali di progetto. Eppure, la costruzione e l'utilizzo di una TBM (*Tunnel Boring Machine*), scudata o meno, richiede al progettista una conoscenza il più possibile dettagliata di quelli che saranno i parametri di scavo che caratterizzeranno l'avanzamento, siccome la macchina dovrà essere in grado, in ogni caso, di continuare la propria progressione.

La rapidità necessaria per l'ottenimento di informazioni è il secondo aspetto che ha portato al tentativo di costruzione di un programma di previsione basato su formule analitiche, in grado di fornire i valori dei principali parametri di scavo senza dover attendere i tempi di preparazione ed esecuzione tipici dei modelli numerici, generalmente unica fonte di informazioni relative alla geologia considerata. Tuttavia, questa intenzione è stata fin da subito accompagnata dalla consapevolezza delle difficoltà ad essa connesse, proprio dovute al contesto in cui si è voluto operare, ricco di incertezze e di complessità matematiche, difficilmente superabili analiticamente senza l'individuazione e l'applicazione di approssimazioni.

All'interno dei Capitoli 4 e 5, la trattazione presenta le modalità di costruzione e definizione del programma di calcolo per la previsione, creato con

il supporto di SWS Engineering. In particolare, viene messa in evidenza l'utilizzo di quei modelli analitici già esistenti in letteratura tecnica, riguardanti la previsione di singoli parametri di scavo, connessi all'uso di macchine EPBS in terreni. Lo studio di queste formulazioni, suddivisibili in empiriche e teoriche, ha permesso di individuare quelle implementabili all'interno di un programma di calcolo, utilizzando il linguaggio di programmazione Python. Inoltre, è stato necessario interpretare i diversi risultati in modo da poter definire un flusso logico, adatto a fornire tutti i risultati della previsione in seguito ad un'unica esecuzione del modello.

La raccolta di informazioni da poter usare come dati iniziali è stato il passaggio che ha permesso di verificare la correttezza del codice e l'assenza di errori matematici all'interno delle formulazioni implementate. Questa fase di verifica è stata possibile grazie all'utilizzo di parametri teorici e reali dal chiaro significato fisico, in funzione dei quali è stato possibile analizzare e commentare i risultati ottenuti. In seguito, si sono associati preliminarmente dei pesi matematici alle diverse previsioni, in modo da ricondursi a risultati mediati, per definire univocamente ciascun parametro di scavo in uscita. Nel Capitolo 7, grazie all'utilizzo di dati storici relativi a due diverse operazioni di scavo, è stato possibile un confronto parziale tra i risultati ottenuti con il modello previsionale definito e i valori realmente misurati nelle situazioni considerate.

L'applicabilità del programma di calcolo presentato non è confermabile a priori, a causa delle complessità legate alla natura dei terreni, descritte nei Capitoli iniziali di questa tesi. La possibilità di utilizzare il modello in riferimento a casi storici è stata di fondamentale importanza per un'analisi approfondita, ma i dati parziali a disposizione hanno permesso solamente considerazioni superficiali, dimostrando, tuttavia, la necessità di ottimizzare il programma di calcolo, riducendo la richiesta di dati in ingresso, spesso di non facile reperimento. Per farlo, concentrandosi in particolare sulla trascurabilità dei dati individuati nel Capitolo 6.3, l'unica possibilità è l'approfondimento per mezzo di valori empirici, in modo da poter definire l'entità di fattori di sicurezza e pesi

matematici da attribuire ai risultati ottenuti, approssimando le componenti più complesse delle formule implementate.

Sulla base del lavoro svolto, e dell'analisi dei risultati ottenuti sia con dati teorici, che con dati reali, è possibile sostenere che il programma di previsione presentato sia caratterizzato da un elevato potenziale, essendo funzionante e in grado di restituire risultati fisicamente accettabili, seppur talvolta distanti da quelli misurati durante le operazioni di scavo considerate. L'ottimizzazione del programma è necessaria per poterlo applicare nella pratica, con l'obiettivo in particolare di ridurre i dati richiesti per la sua esecuzione. Per poter conseguire questo risultato, è d'obbligo considerare un numero maggiore di casi storici, partendo dall'avvenuta implementazione di modelli di previsione analitici che necessitano unicamente di un aggiustamento dei risultati su base empirica, prima di poter essere effettivamente applicati con successo.

Bibliografia

- [1] AITES-ITA. *Why go underground*, URL: <http://tunnel.ita-aites.org/en/why-go-underground>, ultimo accesso: 30 marzo 2018.
- [2] AITES-ITA Working Group No. 14 (2000). Recommendations and Guidelines for Tunnel Boring Machines (TBMs), pp. 1-118, URL: http://tunnel.ita-aites.org/media/k2/attachments/public/Recommendations_ITA_TBM.pdf, ultimo accesso: 17 giugno 2018.
- [3] ASTM (American Society for Testing and Materials) (1985). *Classification of Soils for Engineering Purposes: Annual Book of ASTM Standards*, D 2487-83, 04.08, pp. 395-408.
- [4] Ates U., Bilgin N., Copur H. (2013). Estimating torque, thrust and other design parameters of different type TBMs with some criticism to TBMs used in Turkish tunneling projects, *Tunnelling and Underground Space Technology*, Elsevier Ltd., 40, 46-63.
- [5] Bezuijen A., van Lottum H. (2006). *Tunnelling. A decade of progress*, Taylor & Francis Group plc, Londra, UK, pp. 43-49, 157-170.
- [6] Bilgin N., Copur H., Balci C. (2014). *Mechanical Excavation in Mining and Civil Industries*, CRC Press, Taylor & Francis Group, Boca Raton, USA, Capitolo 3, pp. 35-41, Capitolo 10, pp. 211-246.
- [7] Bilgin N., Copur H., Balci C. (2016). *TBM Excavation in Difficult Ground Conditions. Case Studies from Turkey*, Wilhelm Ernst & Sohn, Berlino, Germania, Capitolo 4, pp. 91-108.

- [8] Burger W. (2016). *Slurry, hybrid and large tbms*, Herrenknecht AG, URL: <https://tunnelingshortcourse.com/2016-presentations/burger-slurry-hybrid-large-tbms.pdf>, ultimo accesso: 17 giugno 2018.
- [9] Cardu M., Oreste P. (2011). Tunnelling in urban areas by EPB machines: technical evaluation of the system, *Earth Sci. Res. SJ*. Vol 15, No 1, 5-11.
- [10] Evett J., Cheng L. (2000), *Soils and Foundations* (7 ed.), Prentice Hall, pp. 9-29.
- [11] fine, civil engineering software. *Secant Modulus of Soil Es*, URL: <https://www.finesoftware.eu/help/geo5/en/secant-modulus-of-soil-es-02/>, ultimo accesso: 31 maggio 2018.
- [12] Geotechdata.info. *Geotechnical parameters*, URL: <http://www.geotechdata.info/parameter/parameter.html>, ultimo accesso: 31 maggio 2018.
- [13] Godinez R., Yu H., Mooney M., Gharahbagh E., Frank G. (2015). Earth pressure balance machine cutterhead torque modeling: Learning from machine data, *RETC 2015*, 1261-1271.
- [14] Guglielmetti V., Mahtab A., Xu S., Grasso P. (2007). *Mechanized tunnelling in urban areas. Design methodology and construction control*, Taylor & Francis Group, Londra, UK, Capitolo 1, pp. 1-18, Capitolo 4, p. 80, pp. 98-110, Appendice, pp. 363-371, pp. 381-382, p. 392.
- [15] Herrenknecht AG. *Excavation tools. Durability pays off*, URL: <https://www.herrenknecht.com/en/products/additional-equipment/tunnelling-logistics/excavation-tools.html>, ultimo accesso: 4 maggio 2018.

- [16] JSCE (Japan Society of Civil Engineers) (2007). *Standard Specifications For Tunneling – Shield Tunnels*.
- [17] Li S., Sun W., Shangguan Z., Duan H. (2009). Controlling earth pressure of shield machine with optimization algorithm, *International Conference on Environmental Science and Information Application Technology*, IEEE, 656-659.
- [18] Li S., Yu S., Qu F. (2014). Modeling approaches to pressure balance dynamic system in shield tunneling, *J. Cent. South Univ.*, Springer, 21, 1206-1216.
- [19] Maidl B., Herrenknecht M., Maidl U., Wehrmeyer G. (2012). *Mechanised Shield Tunnelling. 2nd Edition*, Wilhelm Ernst & Sohn, Berlino, Germania, pp. 1-116.
- [20] Maidl B., Thewes M., Maidl U. (2013). *Handbook of Tunnel Engineering. Volume I: Structures and Methods*, Wilhelm Ernst & Sohn, Berlino, Germania, Capitolo 6, pp. 285-338.
- [21] Merritt A. S., Mair R. J. (2006). Mechanics of tunnelling machine screw conveyors: model tests, *Géotechnique*, ICE Publishing, 56, No. 9, 605-615.
- [22] Merritt A. S., Mair R. J. (2008). Mechanics of tunnelling machine screw conveyors: a theoretical model, *Géotechnique*, ICE Publishing, 58, No. 2, 79-94.
- [23] Shi H., Yang H., Gong G., Wang L. (2011). Determination of the cutterhead torque for EPB shield tunneling machine, *Automation in Construction*, Elsevier B.V., 20, 1087-1095.
- [24] Vinai R., Oggeri C., Peila D. (2008). Soil conditioning of sand for EPB applications. A laboratory research, *Tunnelling and Underground Space Technology*, 23, 308-317.

- [25] Wang L., Gong G., Shi H., Yang H. (2012 a). A new calculation model of cutterhead torque and investigation of its influencing factors, *Sci China Tech Sci*, 55, 1581-1588.
- [26] Wang L., Gong G., Shi H., Yang H. (2012 b). Modeling and analysis of thrust force for EPB shield tunneling machine, *Automation in Construction*, Elsevier B.V., 27, 138-146.
- [27] Wittke W., Druffel R., Erichsen C., Gattermann J., Kiehl J., Schmitt D., Tegelkamp M., Wittke M., Wittke-Gattermann P., Wittke-Schmitt B. (2007). *Stability Analysis and Design for Mechanized Tunneling*, WBI-PRINT 6, Essen, Germania, Capitolo 2, pp. 19-33, Capitolo 5, pp. 233-250.
- [28] Xinggao L., Dajun Y., Qingfei H. (2017). Cutterhead and Cutting Tools Configurations in Coarse Grain Soils, *The Open Construction and Building Technology Journal*, Bentham Open, 11, 182-199.
- [29] Zhang Q., Huang T., Huang G., Cai Z., Kang, Y. (2013). Theoretical model for loads prediction on shield tunneling machine with consideration of soil-rock interbedded ground, *Sci China Tech Sci*, 56, 2259-2267.
- [30] Zhang Q., Kang Y., Zheng Z., Wang L. (2013). Inverse Analysis and Modeling for Tunneling Thrust on Shield Machine, *Mathematical Problems in Engineering*, Hindawi Publishing Corporation, articolo 975703.

APPENDICI

1 – Risultati teorici in funzione del solo diametro di scavo

Risultati ottenuti dai modelli di previsione di spinta e coppia massima, in funzione del solo diametro di scavo.

SPINTA					
diametro	Ates et al. (2013)	Krause (1987)			Szechy (1969)
		min	max	medio	
m	kN	kN	kN	kN	kN
4.0	21701	8000	19200	13600	7540
4.2	22681	8820	21168	14994	8313
4.4	23705	9680	23232	16456	9123
4.6	24776	10580	25392	17986	9971
4.8	25894	11520	27648	19584	10857
5.0	27063	12500	30000	21250	11781
5.2	28285	13520	32448	22984	12742
5.4	29562	14580	34992	24786	13741
5.6	30897	15680	37632	26656	14778
5.8	32292	16820	40368	28594	15852
6.0	33750	18000	43200	30600	16965
6.2	35274	19220	46128	32674	18114
6.4	36866	20480	49152	34816	19302
6.6	38531	21780	52272	37026	20527

SPINTA					
diametro	Ates et al. (2013)	Krause (1987)			Szechy (1969)
		min	max	medio	
m	kN	kN	kN	kN	kN
6.8	40270	23120	55488	39304	21790
7.0	42089	24500	58800	41650	23091
7.2	43989	25920	62208	44064	24429
7.4	45975	27380	65712	46546	25805
7.6	48051	28880	69312	49096	27219
7.8	50220	30420	73008	51714	28670
8.0	52488	32000	76800	54400	30159
8.2	54857	33620	80688	57154	31686
8.4	57334	35280	84672	59976	33251
8.6	59923	36980	88752	62866	34853
8.8	62628	38720	92928	65824	36493
9.0	65456	40500	97200	68850	38170
9.2	68411	42320	101568	71944	39886
9.4	71500	44180	106032	75106	41639
9.6	74728	46080	110592	78336	43429
9.8	78102	48020	115248	81634	45258
10.0	81628	50000	120000	85000	47124
10.2	85314	52020	124848	88434	49028
10.4	89166	54080	129792	91936	50969
10.6	93191	56180	134832	95506	52948
10.8	97399	58320	139968	99144	54965
11.0	101796	60500	145200	102850	57020
11.2	106393	62720	150528	106624	59112
11.4	111196	64980	155952	110466	61242
11.6	116217	67280	161472	114376	63410
11.8	121464	69620	167088	118354	65615
12.0	126948	72000	172800	122400	67858

SPINTA					
diametro	Ates et al. (2013)	Krause (1987)			Szechy (1969)
		min	max	medio	
m	kN	kN	kN	kN	kN
12.2	132679	74420	178608	126514	70139
12.4	138670	76880	184512	130696	72458
12.6	144931	79380	190512	134946	74814
12.8	151474	81920	196608	139264	77208
13.0	158313	84500	202800	143650	79639
13.2	165461	87120	209088	148104	82109
13.4	172931	89780	215472	152626	84616
13.6	180739	92480	221952	157216	87160
13.8	188900	95220	228528	161874	89743
14.0	197428	98000	235200	166600	92363
14.2	206342	100820	241968	171394	95021
14.4	215658	103680	248832	176256	97716
14.6	225395	106580	255792	181186	100449
14.8	235572	109520	262848	186184	103220
15.0	246208	112500	270000	191250	106029
15.2	257324	115520	277248	196384	108875
15.4	268942	118580	284592	201586	111759
15.6	281085	121680	292032	206856	114681
15.8	293775	124820	299568	212194	117640
16.0	307039	128000	307200	217600	120637
16.2	320902	131220	314928	223074	123672
16.4	335390	134480	322752	228616	126744
16.6	350533	137780	330672	234226	129855
16.8	366360	141120	338688	239904	133002
17.0	382901	144500	346800	245650	136188
17.2	400188	147920	355008	251464	139411
17.4	418257	151380	363312	257346	142672

SPINTA					
diametro	Ates et al. (2013)	Krause (1987)			Szechy (1969)
		min	max	medio	
m	kN	kN	kN	kN	kN
17.6	437141	154880	371712	263296	145971
17.8	456878	158420	380208	269314	149307
18.0	477505	162000	388800	275400	152681

COPPIA					
diametro	Ates et al. (2013)	Maidl et al. (2012)	JSCE (2007)		
			min	max	medio
m	kN·m	kN·m	kN·m	kN·m	kN·m
4.0	1065	1308	640	1600	1120
4.2	1242	1451	741	1852	1297
4.4	1438	1622	852	2130	1491
4.6	1655	1819	973	2433	1703
4.8	1892	2045	1106	2765	1935
5.0	2152	2301	1250	3125	2188
5.2	2436	2586	1406	3515	2461
5.4	2743	2903	1575	3937	2756
5.6	3077	3252	1756	4390	3073
5.8	3437	3634	1951	4878	3414
6.0	3825	4049	2160	5400	3780
6.2	4242	4500	2383	5958	4171
6.4	4688	4987	2621	6554	4588
6.6	5166	5510	2875	7187	5031
6.8	5676	6071	3144	7861	5503
7.0	6220	6671	3430	8575	6003

COPPIA					
diametro	Ates et al. (2013)	Maidl et al. (2012)	JSCE (2007)		
			min	max	medio
m	kN·m	kN·m	kN·m	kN·m	kN·m
7.2	6798	7310	3732	9331	6532
7.4	7411	7990	4052	10131	7091
7.6	8062	8711	4390	10974	7682
7.8	8750	9475	4746	11864	8305
8.0	9477	10282	5120	12800	8960
8.2	10245	11133	5514	13784	9649
8.4	11054	12030	5927	14818	10372
8.6	11905	12972	6361	15901	11131
8.8	12801	13962	6815	17037	11926
9.0	13741	15000	7290	18225	12758
9.2	14727	16087	7787	19467	13627
9.4	15761	17223	8306	20765	14535
9.6	16843	18411	8847	22118	15483
9.8	17975	19650	9412	23530	16471
10.0	19157	20942	10000	25000	17500
10.2	20392	22287	10612	26530	18571
10.4	21680	23687	11249	28122	19685
10.6	23022	25143	11910	29775	20843
10.8	24420	26655	12597	31493	22045
11.0	25875	28225	13310	33275	23293
11.2	27389	29853	14049	35123	24586
11.4	28961	31540	14815	37039	25927
11.6	30594	33287	15609	39022	27316
11.8	32289	35095	16430	41076	28753
12.0	34046	36966	17280	43200	30240
12.2	35869	38899	18158	45396	31777
12.4	37756	40897	19066	47666	33366

COPPIA					
diametro	Ates et al. (2013)	Maidl et al. (2012)	JSCE (2007)		
			min	max	medio
m	kN·m	kN·m	kN·m	kN·m	kN·m
12.6	39710	42959	20004	50009	35007
12.8	41733	45087	20972	52429	36700
13.0	43824	47282	21970	54925	38448
13.2	45986	49545	23000	57499	40249
13.4	48220	51876	24061	60153	42107
13.6	50526	54277	25155	62886	44020
13.8	52907	56749	26281	65702	45991
14.0	55363	59291	27440	68600	48020
14.2	57896	61907	28633	71582	50108
14.4	60508	64595	29860	74650	52255
14.6	63198	67358	31121	77803	54462
14.8	65969	70196	32418	81045	56731
15.0	68822	73110	33750	84375	59063
15.2	71758	76101	35118	87795	61457
15.4	74778	79170	36523	91307	63915
15.6	77884	82318	37964	94910	66437
15.8	81077	85546	39443	98608	69025
16.0	84359	88855	40960	102400	71680
16.2	87729	92245	42515	106288	74402
16.4	91191	95719	44109	110274	77192
16.6	94745	99276	45743	114357	80050
16.8	98392	102917	47416	118541	82979
17.0	102134	106644	49130	122825	85978
17.2	105972	110457	50884	127211	89048
17.4	109907	114358	52680	131701	92190
17.6	113941	118347	54518	136294	95406
17.8	118075	122425	56398	140994	98696

COPPIA					
diametro	Ates et al. (2013)	Maidl et al. (2012)	JSCE (2007)		
			min	max	medio
m	kN·m	kN·m	kN·m	kN·m	kN·m
18.0	122311	126594	58320	145800	102060

2 – Dati di input per 3 diverse formazioni geologiche

Parametri utilizzati per il confronto tra fronti di scavo caratterizzati da proprietà geotecniche differenti, in particolare con riferimento a tre diverse formazioni geologiche: ghiaia sabbiosa, sabbia limosa, e sabbia argillosa. Con il colore verde vengono indicati i parametri facoltativi, il cui mancato inserimento non implica la mancata esecuzione di tutti i modelli implementati.

Dati in input per foglio “parameters”			
Parametro	Ghiaia sabbiosa	Sabbia limosa	Sabbia argillosa
Diametro testa di scavo (m)	7,76	7,76	7,76
Spessore testa di scavo (m)	0,5	0,5	0,5
Apertura (-)	0,38	0,38	0,38
Lunghezza scudo (m)	7,68	7,68	7,68
Numero di spazzole di coda (-)	3	3	3
Lunghezza di contatto tra spazzole di coda e conci (m)	1	1	1
Spessore lama dello scudo (m)			
Resistenza di picco del terreno alla penetrazione (kPa)			
Volume camera di scavo (m³)	94	94	94
Diametro esterno anello di rivestimento (m)	7,48	7,48	7,48
Profondità anello di rivestimento (m)	1,4	1,4	1,4
Peso anello di rivestimento (kN)	170	170	170
Peso <i>backup</i> (kN)	5700	5700	5700
Peso della macchina (zona scudo) (kN)	6000	6000	6000
Quota s.l.m. piano campagna (m)	200	200	200

Dati in input per foglio "parameters"			
Parametro	Ghiaia sabbiosa	Sabbia limosa	Sabbia argillosa
Quota s.l.m. asse galleria (m)	180	180	180
Copertura (rispetto calotta) (m)			
Quota piezometrica s.l.m. (m)	100	100	100
Tensione radiale media (kPa)			
Peso edifici (kPa)	0	0	0
Carichi applicati (kPa)	0	0	0
Pressione di supporto al fronte (kPa)			
Pressione media in camera di scavo (kPa)			
Rapporto tra pressione media sul retro e sul fronte della testa di scavo (-)	0,8	0,8	0,8
Pressione quota calotta (kPa)			
Pressione quota arco rovescio (kPa)			
Adesione argilla – scudo (kPa)	0	0	0
Coesione non drenata (kPa)			
Diametro interno coclea (m)	0,7	0,7	0,7
Diametro albero coclea (m)	0,2	0,2	0,2
Lunghezza coclea (m)	8	8	8
Efficienza volumetrica coclea (-)	0,7	0,7	0,7
Passo tra eliche (mm)	700	700	700
Spessore delle eliche (m)	0,03	0,03	0,03
Variazione di pressione in camera di scavo (kPa)	0	0	0
Distanza di riferimento (m)	1,4	1,4	1,4
Modulo secante del terreno condizionato (kPa)	50000	10000	5000
Numero di barre miscelatrici (-)	5	5	5

Dati in input per foglio "parameters"			
Parametro	Ghiaia sabbiosa	Sabbia limosa	Sabbia argillosa
Numero di supporti per la testa fresante (-)	4	4	4
Lunghezza media barre miscelatrici (m)	0,7	0,7	0,7
Lunghezza media supporti (m)	1,5	1,5	1,5
Distanza media tra barre miscelatrici e asse della galleria (m)	3	3	3
Distanza media tra supporti e asse della galleria (m)	0,5	0,5	0,5
Dimensione trasversale media barre miscelatrici (m)	0,25	0,25	0,25
Dimensione trasversale media supporti (m)	0,3	0,3	0,3
Coefficiente di attrito backup (-)	0,2	0,2	0,2
Coefficiente di attrito spazzole di coda – conchi (-)	0,3	0,3	0,3
Coefficiente di attrito barre miscelatrici – terreno condizionato (-)	0,2	0,2	0,2
Angolo di attrito utensile – terreno (°)	28	33	40
Coefficiente di attrito retro della testa fresante – terreno condizionato (-)	0,2	0,2	0,2
Coefficiente di attrito dinamico testa fresante – terreno (-)	0,4	0,3	0,2
Coefficiente di attrito terreno – scudo (-)	0,45	0,35	0,2
Coefficiente di attrito terreno condizionato – aperture (-)	0,35	0,25	0,2
Coefficiente di attrito dinamico lato della testa fresante – terreno (-)	0,45	0,35	0,2

Dati in input per foglio "parameters"			
Parametro	Ghiaia sabbiosa	Sabbia limosa	Sabbia argillosa
Lunghezza media <i>scrapers</i> (mm)	150	150	150
Larghezza media <i>scrapers</i> (m)	0,1	0,1	0,1
Numero di <i>scrapers</i> (-)	200	200	200
Superficie di contatto utensile – terreno (m ²)	0,03	0,03	0,03
Carico normale su singolo utensile (kN)			
Velocità tangenziale massima dell'utensile esterno (m/min)			
<i>Rake angle</i> (°)	30	30	30
Pressione laterale in fase di curvatura (kPa)	0	0	0
Lunghezza galleria (m)	1700	1700	1700
Ore lavorative totali (h)	3000	3000	3000
<i>Machine Utilization Time</i> (-)	0,45	0,45	0,45
Numero di anelli per giorno (day ⁻¹)	10	10	10

Dati in input per foglio "layers"			
Parametro	Ghiaia sabbiosa	Sabbia limosa	Sabbia argillosa
Quota s.l.m. limite superiore dello strato (m)	200	200	200
Quota s.l.m. limite inferiore dello strato (m)	0	0	0
Modulo di Young (kPa)	150000	20000	10000
Coefficiente di Poisson (-)	0,3	0,3	0,3

Dati in input per foglio "layers"			
Parametro	Ghiaia sabbiosa	Sabbia limosa	Sabbia argillosa
Modulo elastico di taglio (kPa)	57692	3846	57692
Angolo di attrito interno (°)	40	30	35
Coesione (kPa)	0	20	30
K₀ (-)	0,36	0,50	0,43
K_a (-)	0,26	0,35	0,26
Peso specifico del terreno (kN/m³)	21	21	19
Saturazione	0	0	0
Impermeabilità	0	0	1
OCR	1	1	1

3 – Risultati teorici presentati per componenti

Risultati per la previsione di spinta e coppia relativi a 3 progressive di scavo, rispettivamente in ghiaia argillosa (*CHAINAGE_ID: 1*), sabbia limosa (*CHAINAGE_ID: 2*), e sabbia argillosa (*CHAINAGE_ID: 3*).

CHAINAGE_ID: 1

ATES THRUST:

total thrust: 49778.51619002265

KRAUSE THRUST:

f_min: 30108.8 f_max: 72261.12

total thrust: 51184.96

SZECHY THRUST:

total thrust: 28376.87546652131

JSCE THRUST:

f1: 15340.409179971546 f2: 18444.96905323885 f3: 0.0 f4: 1057.6659671457435 f5: 1140.0

total thrust: 35983.04420035614

MAIDL THRUST:

f1: 22054.7461690281 f2: 1015.5600000000002 f3: 2376.9290017060375 f4: 25597.696941449638

total thrust: 51044.93211218378

WANG THRUST:

ciclo 1

k1: 107.22253474700634 k2: 2775.82113576372 k3: 3993.0

total thrust: 31990.055721907796

ATES TORQUE:

total torque: 8609.114929982516

HERRENKNECHT TORQUE:

total torque: 9318.671039743997

JSCE TORQUE:

t_min: 4672.88576 t_max: 11682.214399999999

average torque: 8177.550079999999

GODINEZ TORQUE:

t1: 4551.7801348208895 t2: 3193.0200272323955 t3: 2275.8900674104448 t5:
854.3764728867435 t6: 105.77058877181572
total torque: 10980.837291122289

WANG THRUST DYN:

ciclo 1
k1: 107.22253474700634 k2: 2775.82113576372 k3: 3993.0
a1: 0.41475333547639776 a2: 1.3821721371321876
rc: 0.1563256504426281
total thrust: 34876.24965522596

WITTKER THRUST:

fn: 0.0 fs: 18444.96905323885 ff: 12640.409179971546
total thrust: 31085.378233210395 SF: 1.2 with SF: 37302.45387985247

ZHANG THRUST:

f1: 30004.584796119496 f2: 15340.409179971546 f3: 1140.0
total thrust: 46484.99397609104

ZHANG INTERBEDDED THRUST:

entering layer in layers
f1: 18596.22451836471 f2: 5601.327126217182 f3: 7009.088240230763 f4:
15340.409179971546 f5: 1140.0
total thrust: 47687.0490647842

XIONG TORQUE:

t1: 6603.722619598148 t2: 2048.305666530891 t3: 4345.857357397514 t4:
309.8282198254225
total torque: 13307.713863351975

WANG TORQUE:

total torque: 7953.112036713992

BILGIN TORQUE:

total torque: 6659.64883048263

ZHANG TORQUE:

t1: 27219.42391940914 t2: 316.57343613696463 t3: 3193.0200272323955 t4:
643.2410958225103
total torque: 31372.258478601012

ZHANG INTERBEDDED TORQUE:

entering layer in layers

t1: 22720.329817306658 t2: 316.57343613696463 t3: 3193.0200272323955 t4:
643.2410958225103
total torque: 26873.16437649853

#####

CHAINAGE_ID: 2

ATES THRUST:
total thrust: 49778.51619002265

KRAUSE THRUST:
f_min: 30108.8 f_max: 72261.12
total thrust: 51184.96

SZECHY THRUST:
total thrust: 28376.87546652131

JSCE THRUST:
f1: 15861.32187572332 f2: 14948.793819757946 f3: 0.0 f4: 1480.4441220776541 f5: 1140.0
total thrust: 33430.559817558926

MAIDL THRUST:
f1: 18737.4381477495 f2: 1015.5600000000002 f3: 1926.3909561543746 f4:
7313.627697557038
total thrust: 28993.016801460915

WANG THRUST:
ciclo 2
k1: 162.50613833272612 k2: 482.5486315913922 k3: 1293.0
total thrust: 14823.307016813971

ATES TORQUE:
total torque: 8609.114929982516

HERRENKNECHT TORQUE:
total torque: 9318.671039743997

JSCE TORQUE:
t_min: 4672.88576 t_max: 11682.214399999999
average torque: 8177.550079999999

GODINEZ TORQUE:
t1: 4778.438813558455 t2: 3476.1672446488597 t3: 3185.625875705637 t5:
854.2101642517131 t6: 148.04999999999998

total torque: 12442.492098164665

WANG THRUST DYN:

ciclo 2

k1: 162.50613833272612 k2: 482.5486315913922 k3: 1293.0

a1: 0.41950760311168905 a2: 0.580492396888311

rc: 0.1563256504426281

total thrust: 11359.865214469788

WITTKER THRUST:

fn: 64.5515278480181 fs: 14948.793819757946 ff: 13761.321875723323

total thrust: 28774.667223329285 SF: 1.2 with SF: 34529.60066799514

ZHANG THRUST:

f1: 14317.820230192283 f2: 15861.32187572332 f3: 1140.0

total thrust: 31319.142105915605

ZHANG INTERBEDDED THRUST:

entering layer in layers

f1: 2479.496602448628 f2: 7840.331519998382 f3: 5680.54165150802 f4:

15861.32187572332 f5: 1140.0

total thrust: 33001.69164967835

XIONG TORQUE:

t1: 6932.559030710608 t2: 2298.1272690063784 t3: 3602.3024560975477 t4:

309.8282198254225

total torque: 13142.816975639957

WANG TORQUE:

total torque: 7521.579472575729

BILGIN TORQUE:

total torque: 4419.315443215149

ZHANG TORQUE:

t1: 7045.203192017279 t2: 179.5952628949456 t3: 3476.16724464886 t4:

521.3171401964158

total torque: 11222.282839757501

ZHANG INTERBEDDED TORQUE:

entering layer in layers

t1: 6400.442920733269 t2: 179.5952628949456 t3: 3476.16724464886 t4:

521.3171401964158

total torque: 10577.522568473489

#####

CHAINAGE_ID: 3

ATES THRUST:

total thrust: 49778.51619002265

KRAUSE THRUST:

f_min: 30108.8 f_max: 72261.12

total thrust: 51184.96

SZECHY THRUST:

total thrust: 28376.87546652131

JSCE THRUST:

f1: 7267.74891866986 f2: 9795.300540225728 f3: 0.0 f4: 1142.345610292429 f5: 1140.0

total thrust: 19345.395069188016

MAIDL THRUST:

f1: 9379.748615715846 f2: 918.840000000001 f3: 1262.2809974517693 f4:
3656.813848778519

total thrust: 15217.683461946133

WANG THRUST:

ciclo 2

k1: 111.95667665030183 k2: 723.8229473870883 k3: 1293.0

total thrust: 13651.62844358102

ATES TORQUE:

total torque: 8609.114929982516

HERRENKNECHT TORQUE:

total torque: 9318.671039743997

JSCE TORQUE:

t_min: 4672.88576 t_max: 11682.214399999999

average torque: 8177.550079999999

GODINEZ TORQUE:

t1: 2458.1040789565363 t2: 1532.7386591431678 t3: 2458.1040789565363 t5:
527.3029717761602 t6: 114.23887270155475

total torque: 7090.488661533956

WANG THRUST DYN:

ciclo 2

k1: 111.95667665030183 k2: 723.8229473870883 k3: 1293.0
a1: 0.44788706572872233 a2: 0.5521129342712777
rc: 0.1563256504426281
total thrust: 11104.113108191706

WITTKER THRUST:

fn: 72.51261669918317 fs: 9795.300540225728 ff: 6067.748918669859
total thrust: 15935.562075594771 SF: 1.2 with SF: 19122.674490713725

ZHANG THRUST:

f1: 9713.452349854168 f2: 7267.74891866986 f3: 1140.0
total thrust: 18121.201268524026

ZHANG INTERBEDDED THRUST:

entering layer in layers

f1: 1239.748301224314 f2: 6049.784764951588 f3: 3722.214205285777 f4:
7267.74891866986 f5: 1140.0
total thrust: 19419.49619013154

XIONG TORQUE:

t1: 3566.217397750144 t2: 2334.2276726483674 t3: 2066.2385826157215 t4:
280.3207703182394
total torque: 8247.004423332472

WANG TORQUE:

total torque: 5355.351443313288

BILGIN TORQUE:

total torque: 2087.818849513824

ZHANG TORQUE:

t1: 3213.692205109478 t2: 155.24184797228233 t3: 1532.7386591431675 t4:
341.5966616815355
total torque: 5243.269373906463

ZHANG INTERBEDDED TORQUE:

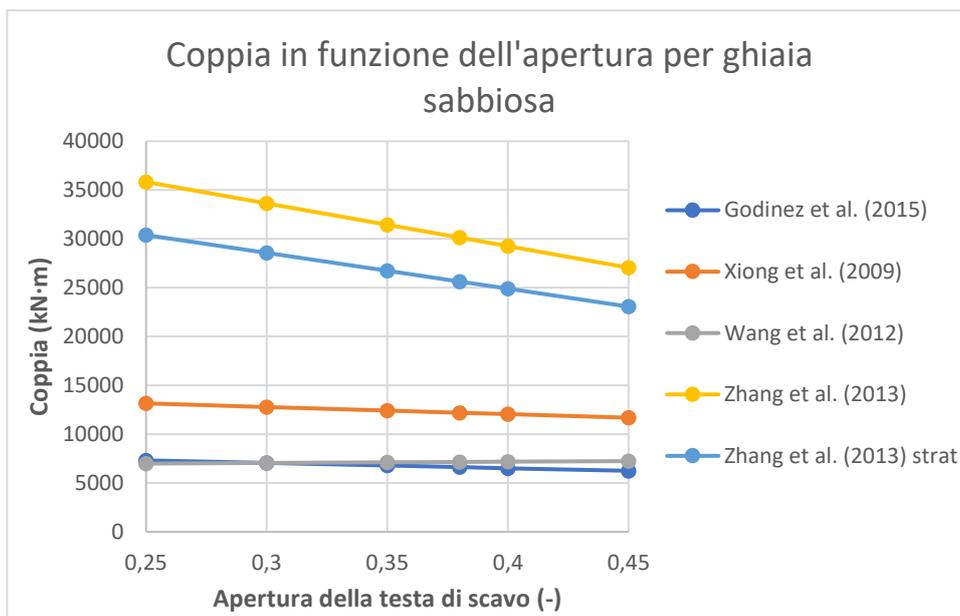
entering layer in layers

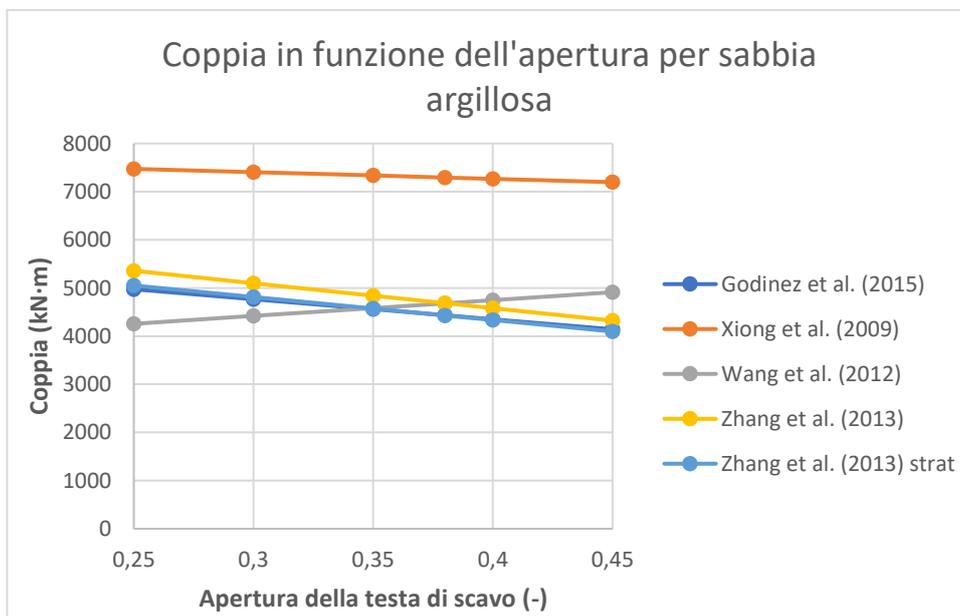
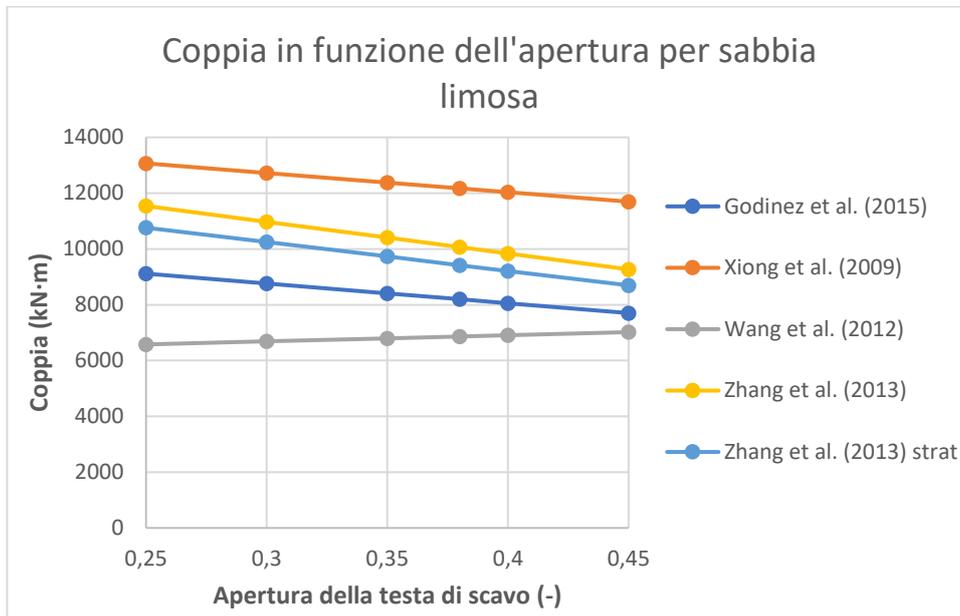
t1: 2959.7731433678346 t2: 155.24184797228233 t3: 1532.7386591431675 t4:
341.5966616815355
total torque: 4989.35031216482

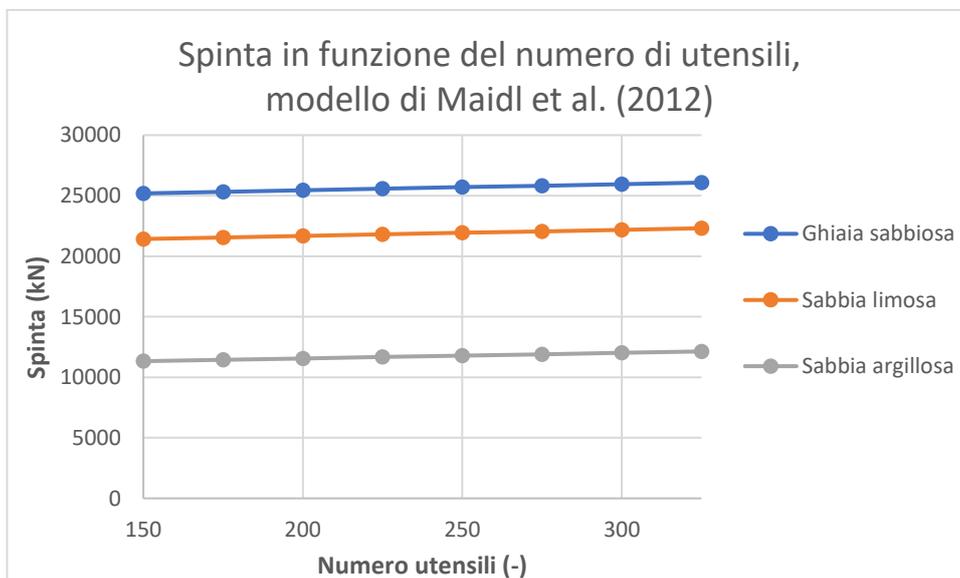
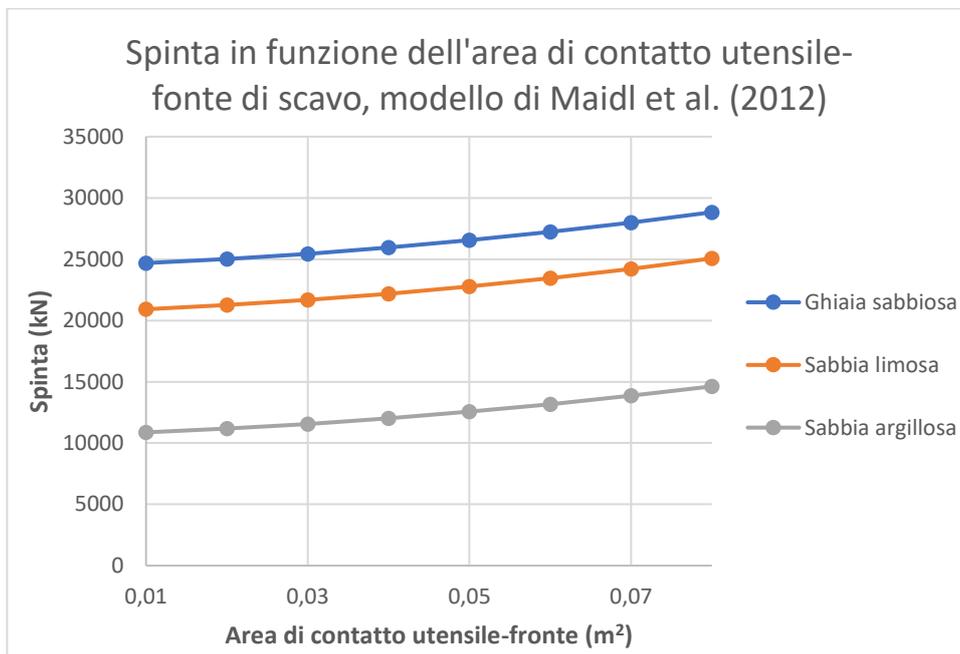
Process finished with exit code 0

4 – Grafici di confronto riferiti al Capitolo 6.3.2

Grafici di confronto in funzione della variazione dei dati in ingresso, in relazione ai riferimenti inseriti all'interno della trattazione.







5 – Modelli geometrici relativi a Galleria 1 e Galleria 2

Dati relativi alle altre 3 progressive di scavo per Galleria 1, e risultati relativi

Modello geometrico per Galleria 1, progressiva 10						
Parametro	Strati					
Quota s.l.m. limite superiore dello strato (m)	230,7	225,8	220,9	214,4	213,6	206,2
Quota s.l.m. limite inferiore dello strato (m)	225,8	220,9	214,4	213,6	206,2	0
Modulo di Young (kPa)	150000	10000	150000	10000	150000	10000
Coefficiente di Poisson (-)	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3
Modulo elastico di taglio (kPa)	57692	3846	57692	3846	57692	3846
Angolo di attrito interno (°)	36	29	36	29	36	29
Coesione (kPa)	10	0	10	0	10	0
K₀ (-)	0,41	0,52	0,41	0,52	0,41	0,52
K_a (-)	0,26	0,35	0,36	0,35	0,26	0,35
Peso specifico del terreno (kN/m³)	20	19	20	19	20	19
Saturazione	1	1	1	1	1	1
Impermeabilità	0	0	0	0	0	0
OCR	1	1	1	1	1	1
Quota s.l.m. asse galleria	210,7					

Modello geometrico per Galleria 1, progressiva 10	
Parametro	Strati
Quota s.l.m. superficie piezometrica	222,4

Modello geometrico per Galleria 1, progressiva 11						
Parametro	Strati					
Quota s.l.m. limite superiore dello strato (m)	233,0	226,5	222,4	214,3	212,6	208,1
Quota s.l.m. limite inferiore dello strato (m)	226,5	222,4	214,3	212,6	208,1	0
Modulo di Young (kPa)	150000	10000	150000	10000	150000	10000
Coefficiente di Poisson (-)	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3
Modulo elastico di taglio (kPa)	57692	3846	57692	3846	57692	3846
Angolo di attrito interno (°)	36	29	36	29	36	29
Coesione (kPa)	10	0	10	0	10	0
K₀ (-)	0,41	0,52	0,41	0,52	0,41	0,52
K_a (-)	0,26	0,35	0,36	0,35	0,26	0,35
Peso specifico del terreno (kN/m³)	20	19	20	19	20	19
Saturazione	1	1	1	1	1	1
Impermeabilità	0	0	0	0	0	0
OCR	1	1	1	1	1	1

Modello geometrico per Galleria 1, progressiva 11	
Parametro	Strati
Quota s.l.m. asse galleria	211,4
Quota s.l.m. superficie piezometrica	222,0

Modello geometrico per Galleria 1, progressiva 12						
Parametro	Strati					
Quota s.l.m. limite superiore dello strato (m)	233,1	229,0	226,1	222,6	215,3	212,4
Quota s.l.m. limite inferiore dello strato (m)	229,0	226,1	222,6	215,3	212,4	0
Modulo di Young (kPa)	17000	150000	10000	150000	10000	150000
Coefficiente di Poisson (-)	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3
Modulo elastico di taglio (kPa)	57692	3846	57692	3846	57692	3846
Angolo di attrito interno (°)	36	29	36	29	36	29
Coesione (kPa)	10	0	10	0	10	0
K_0 (-)	0,41	0,52	0,41	0,52	0,41	0,52
K_a (-)	0,26	0,35	0,36	0,35	0,26	0,35
Peso specifico del terreno (kN/m ³)	20	19	20	19	20	19
Saturazione	1	1	1	1	1	1
Impermeabilità	0	0	0	0	0	0

Modello geometrico per Galleria 1, progressiva 12						
Parametro	Strati					
OCR	1	1	1	1	1	1
Quota s.l.m. asse galleria	212,2					
Quota s.l.m. superficie piezometrica	221,6					

Modello geometrico per Galleria 2, progressiva 20		
Parametro	Strati	
Quota s.l.m. limite superiore dello strato (m)	113,7	110,96
Quota s.l.m. limite inferiore dello strato (m)	110,9	0
Modulo di Young (kPa)	360000	40000
Coefficiente di Poisson (-)	0,3	0,3
Modulo elastico di taglio (kPa)	138462	15385
Angolo di attrito interno (°)	28	35
Coesione (kPa)	0	0
K₀ (-)	0,53	0,43
K_a (-)	0,36	0,27
Peso specifico del terreno (kN/m³)	18	21
Saturazione	0	1
Impermeabilità	0	0
OCR	1	1
Quota s.l.m. asse galleria	100,8	

Modello geometrico per Galleria 2, progressiva 20	
Parametro	Strati
Quota s.l.m. superficie piezometrica	105

6 – Galleria 1: risultati con dati integrati

L'utilizzazione di dati teorici aggiunti a quelli reali avuti a disposizione ha permesso l'esecuzione di tutte le formulazioni implementate all'interno del modello costruito. Tuttavia, è importante tenere a mente che lo scopo dell'utilizzo di dati reali per il confronto della previsione con i parametri misurati in fase di scavo è quello di validare un modello che, utilizzando soltanto dati teorici in ingresso, rischia di non poter aver applicazioni pratiche corrette. Per questo, i risultati ottenuti con questa integrazione di dati non vanno ritenuti ugualmente significativi ai risultati di previsione che si potrebbero avere con l'utilizzo di dati interamente relativi ad un caso storico.

Galleria 1: previsione per spinta con dati integrati			
Modello	Progressiva 10	Progressiva 11	Progressiva 12
Wittke et al. (2007) (kN)	25200	21037	20783
JSCE (2007) (kN)	30043	25919	25643
Maidl et al. (2012) (kN)	37649	34060	33587
Wang et al. (2012) (kN)	35847	12600	33938
Wang et al. (2012), dinamico (kN)	37080	6315	34569
Zhang et al. (2013) (kN)	43314	40272	39087
Zhang et al. (2013), fronte di scavo stratificato (kN)	43180	39777	38842
Spinta istantanea (kN)	37404	32767	33232
Spinta misurata (kN)	15745	10541	10326

Galleria 1: previsione per coppia con dati integrati			
Modello	Progressiva 10	Progressiva 11	Progressiva 12
Godinez et al. (2015) (kN·m)	11109	11540	11296
Xiong et al. (2009) (kN·m)	17192	18036	17515
Wang et al. (2012) (kN·m)	10010	10509	10147
Coppia istantanea (kN·m)	14541	15955	14775
Coppia misurata (kN·m)	10588	6409	4777

Poiché tutti gli altri parametri risultano uguali a quelli presentati nel Capitolo 7.2, non necessitano di ulteriori commenti. L'unica eccezione è rappresentata dai risultati relativi all'operatività della coclea, ma, poiché sono ottenuti unicamente sulla base di valori teorici, e non avendo a disposizione misurazioni reali per un confronto, non si ritiene significativa la loro analisi.

7 - Galleria 2: risultati con dati integrati

L'utilizzazione di dati teorici aggiunti a quelli reali avuti a disposizione ha permesso l'esecuzione di tutte le formulazioni implementate all'interno del modello costruito. Tuttavia, è importante tenere a mente che lo scopo dell'utilizzo di dati reali per il confronto della previsione con i parametri misurati in fase di scavo è quello di validare un modello che, utilizzando soltanto dati teorici in ingresso, rischia di non poter aver applicazioni pratiche corrette. Per questo, i risultati ottenuti con questa integrazione di dati non vanno ritenuti ugualmente significativi ai risultati di previsione che si potrebbero avere con l'utilizzo di dati interamente relativi ad un caso storico.

Galleria 2: previsione per spinta relativa alla progressiva 20, con dati integrati	
Modello	Risultato
Wittke et al. (2007) (kN)	9565
JSCE (2007) (kN)	12962
Maidl et al. (2012) (kN)	17158
Wang et al. (2012) (kN)	17599
Wang et al. (2012), dinamico (kN)	19367
Zhang et al. (2013) (kN)	16233
Zhang et al. (2013), fronte di scavo stratificato (kN)	16897
Spinta istantanea (kN)	15341
Spinta misurata (kN)	17192

Galleria 2: previsione per coppia relativa alla progressiva 20, con dati integrati	
Modello	Risultato
Godinez et al. (2015) (kN·m)	4460
Xiong et al. (2009) (kN·m)	2941
Wang et al. (2012) (kN·m)	4728
Coppia max (kN·m)	2930
Coppia istantanea (kN·m)	4676
Coppia misurata (kN·m)	3894

Poiché tutti gli altri parametri risultano uguali a quelli presentati nel Capitolo 7.3, non necessitano di ulteriori commenti. L'unica eccezione è rappresentata dai risultati relativi all'operatività della coclea, ma, poiché sono ottenuti unicamente sulla base di valori teorici, e non avendo a disposizione misurazioni reali per un confronto, non si ritiene significativa la loro analisi.

8 – Parte di codice del programma: modelli implementati per la previsione della spinta

```
"""
- Ates model
- Krause model
- Szechy model
- Shi model
- (Tokgoz model, 2 parameters)
- (Tokgoz model, 3 parameters)
- Wittke model
- JSCE model
- Maidl model
- Wang model
- Zhang model
- Zhang interbedded model
"""

# -----

import math
import numpy as np
from pyswutils.geotech import layers_at_front

P = math.pi

def thr_ates(*, d, **_kwargs):
    """
    Returns the thrust from Ates, Bilgin, Copur model
    'Estimating torque, thrust and other design parameters of
    different type TBMs
    with some criticism to TBMs used in Turkish tunneling
    projects'
    Ates, Bilgin, Copur, 2013, Tunnelling and Underground space
    Technology, Table 1

    Args:
        d (float): cutterhead diameter [m]

    Returns:
        float: thrust [kN]
    """
    f = 8972.6 * math.exp(0.2208 * d)

    print("ATES THRUST:")
    print("total thrust:", f)
    print()

    return f
```

```
def thr_krause(*, d, **_kwargs):
    """
    Returns the thrust from Krause model
    'Mechanised shield tunnelling (2nd Edition)'
    Maidl et al. 2012, Ernst & Sohn, p. 61
    'Inverse analysis and modeling for tunneling thrust on shield
    machine'
    Zhang et al. 2013, Mathematical Problems in Engineering

    Args:
        d (float): cutterhead diameter [m]

    Returns:
        float: thrust [kN]
    """
    f_min = d ** 2 * 500
    f_max = d ** 2 * 1200

    f_mean = (f_min + f_max) / 2

    print("KRAUSE THRUST:")
    print("f_min:", f_min, "f_max:", f_max)
    print("total thrust:", f_mean)
    print()

    return f_mean, f_min, f_max

def thr_szechy(*, surface_f, **_kwargs):
    """
    Returns the thrust from Szechy model
    'Mechanised shield tunnelling (2nd Edition)'
    Maidl et al. 2012, Ernst & Sohn, p. 61

    Args:
        surface_f (float): tunnel section [m2]

    Returns:
        float: thrust [kN]
    """
    print("SZECHY THRUST:")
    print("total thrust:", 600 * surface_f)
    print()

    return 600 * surface_f

def thr_wittke(*, d, s, friction_gs, sigma_rad,
               length_s, surface_f, **_kwargs):
    """
```

```
Returns the thrust from Wittke model
' Stability analysis and design for mechanized tunneling '
Wittke et al. 2007, Aachen, pp. 233-237

Args:
    d (float): cutterhead diameter [m]
    s (float): face support pressure [kPa]
    friction_gs (float): ground-shield friction coefficient [-]
    sigma_rad (float): average radial stress [kPa]
    n (float): tools number [-]
    load_t (float): tool normal load[kN]
    length_s (float): shield length [m]
    surface_f (float): tunnel section [m2]

Returns:
    float: thrust [kN]
"""
surface_s = P * d * length_s # shield surface [m2]

print("WITTKE THRUST:")

fn = 0 # componente trascurabile

fs = s * surface_f

ff = friction_gs * sigma_rad * surface_s

print("fn:", fn, "fs:", fs, "ff:", ff)
print("total thrust:", fn+fs+ff, "SF:", 1.2, "with SF:", (fn + fs
+ ff)*1.2)
print()

return fn + fs + ff

def thr_jsce(*, friction_gs, d, length_s, sigma_rad, weight_s,
            adhesion_cs, s, p_steering, friction_ts, d_ring,
            length_ts, weight_bu, friction_bu, surface_f, **kwargs):
    """
    Returns the thrust from JSCE model
    ' Estimating torque, thrust and other design parameters of
    different type TBMs with some
    criticism to TBMs used in Turkish tunneling projects '
    Ates, Bilgin, Copur, 2013, Tunnelling and Underground space
    Technology

    Args:
        friction_gs (float): friction ground-shield [-]
        d (float): cutterhead diameter [m]
        length_s (float): shield length [m]
        sigma_rad (float): average earth pressure on shield (average
        radial stress) [kPa]
        weight_s (float): machine weight [kN]
```

```
    adhesion_cs (float): adhesion clay-steel [kPa]
    s (float): face support pressure [kPa]
    p_steering (float): pressure due to steering [kPa]
    friction_ts (float): tail brushes-segment friction
coefficient [-]
    d_ring (float): ring external diameter [m]
    length_ts (float): tail brush-segment contact length [m]
    weight_bu (float): back-up weight [kN]
    friction_bu (float): back-up friction coefficient [-]
    surface_f (float): tunnel section [m2]
    n (float): tools number [-]
    load_t (float): tool normal load [kN]

Returns:
    float: thrust for sandy soil [kN]
    float: thrust for clayey soil [kN]
"""

print("JSCE THRUST:")

if adhesion_cs == 0:
    f1 = friction_gs * (P * d * length_s * sigma_rad + weight_s)
else:
    f1 = adhesion_cs * P * d * length_s

f2 = s * surface_f

f3 = friction_gs * d * length_s / 2 * p_steering / 2

f4 = friction_ts * P * d_ring * length_ts * sigma_rad

f5 = weight_bu * friction_bu

print("f1:", f1, "f2:", f2, "f3:", f3, "f4:", f4, "f5:", f5)
print("total thrust:", f1 + f2 + f3 + f4 + f5)
print()

return f1 + f2 + f3 + f4 + f5

def thr_maidl(*, friction_gs, d, length_s, gamma, ob, vl_plus,
weight_s, k0, surface_t, n, p_crown,
              p_invert, vl_build, surface_f, p_peak, thick_blade, s,
**_kwargs):
    """
    Returns the thrust from Maidl model
    'Handbook of tunnel engineerig. Volume I: structures and
methods'
    Maidl, Thewes and Maidl 2013, Ernst & Sohn, pp. 340-344
    'Mechanised shield tunnelling (2nd Edition)'
    Maidl et al. 2012, Ernst & Sohn, p. 58
    """
```

```
Args:
    friction_gs (float): ground-shield friction [-]
    d (float): cutterhead diameter [m]
    length_s (float): shield length [m]
    gamma (float): equivalent soil weight [kN]
    ob (float): overburden [m]
    vl_plus (float): applied vertical loads [kPa]
    weight_s (float): machine weight [kN]
    k0 (float): earth pressure coefficient at rest [-]
    surface_t (float): tool contact surface [m2]
    n (float): tools number [-]
    p_crown (float): pressure at crown [kPa]
    p_invert (float): pressure at invert [kPa]
    vl_build (float): building vertical load [kPa]
    surface_f (float): tunnel section [m2]
    p_peak (float): soil's peak resistance [kPa]
    thick_blade (float): blade's thickness (shield at face) [m]
    s (float): face support pressure [kPa]

Returns:
    float: thrust [kN]
"""
k = 0.5 # TODO: parametro k consigliato tra 0.45 e 0.50. Capire
come inserirlo
vl_ground = gamma * ob
vl_tot = vl_ground + vl_build + vl_plus
hl_k0 = k0 * vl_tot

f1 = friction_gs * (P * d * length_s * (
    vl_ground + hl_k0) * 0.5 + weight_s)

f2 = surface_t * n * k * vl_tot

if p_crown is None or np.isnan(p_crown):
    f3 = surface_f * s/d
else:
    f3 = surface_f * (p_crown + p_invert) / 2
# TODO: definire P_crown e P_invert in funzione di s e d
print("MAIDL THRUST:")

if p_peak is None or np.isnan(p_peak):
    print("f1:", f1, "f2:", f2, "f3:", f3)
    print("total thrust:", f1+f2+f3)
    print()
    return f1 + f2 + f3

f4 = P * d * p_peak * thick_blade
```

```
print("f1:", f1, "f2:", f2, "f3:", f3, "f4:", f4)
print("total thrust:", f1 + f2 + f3 + f4)
print()
return f1 + f2 + f3 + f4

def thr_wang(*, d, ka, gamma, vl_plus, op_r, p_chamber,
            friction_gs, length_s, weight_s, adhesion_cs, c,
            n_tb, weight_r, friction_ts, weight_bu, friction_bu,
            z_wt, z_tun, depth, vl_build, **kwargs):
    """
    Returns the thrust from Wang model
    'Modeling and analysis of thrust force for EPB shield
    tunneling machine'
    Wang et al. 2012, Automation in Construction

    Args:
        d (float): cutterhead diameter [m]
        z_wt (float): water table height (see level) [m]
        z_tun (float): tunnel axis height (see level) [m]
        ka (float): active earth pressure coefficient [-]
        gamma (float): soil weight [kN/m3]
        vl_plus (float): applied vertical loads [kPa]
        op_r (float): opening ratio [-]
        p_chamber (float): average pressure inside bulk chamber [kPa]
        friction_gs (float): ground-shield friction coefficient [-]
        length_s (float): shield length [m]
        weight_s (float): machine weight [kN]
        adhesion_cs (float): clay-steel adhesion [kPa]
        c (float): soil cohesion [kPa]
        n_tb (float): tail brushes number [-]
        weight_r (float): ring weight [kN]
        friction_ts (float): tail brushes-segment friction
coefficient [-]
        weight_bu (float): back-up weight [kN]
        friction_bu (float): back-up friction coefficient [-]
        depth (float): deposit depth at shield axis [m]
        vl_build (float): building vertical load [kPa]

    Returns:
        float: thrust for sandy soil or for clayey soil [kN]
    """
    gamma_w = 10
    hw_axis = z_wt - z_tun    print("WANG THRUST:")

    if hw_axis < 0:
        hw_axis = 0

    # con l'if-else seguente si può calcolare f per terreno sabbioso,
    o f per terreno argilloso
    if adhesion_cs is None or np.isnan(adhesion_cs) or adhesion_cs ==
0:
```

```

        if c is None or np.isnan(c) or c == 0:

            k1 = (P/4) * ((ka*gamma*depth + ka*(vl_build + vl_plus) +
gamma_w*hw_axis) *
                        (1 - op_r) + p_chamber * op_r) - friction_gs *
gamma * length_s * (2 + ka) / 3
            k2 = (P/2) * friction_gs * gamma * (1 + ka) * depth *
length_s
            k3 = friction_gs * weight_s + n_tb * weight_r *
friction_ts + weight_bu * friction_bu

            print("ciclo 1")
            print("k1:", k1, "k2:", k2, "k3:", k3)

        else:

            k1 = P * ((ka * gamma * depth + ka * (vl_build + vl_plus)
+ gamma_w * hw_axis) * (
                        1 - op_r) + p_chamber * op_r) / 4
            k2 = P * length_s * c
            k3 = n_tb * weight_r * friction_ts + friction_bu *
weight_bu
            print("ciclo 2")
            print("k1:", k1, "k2:", k2, "k3:", k3)

        else:

            k1 = P * ((ka * (gamma * depth + vl_build + vl_plus) +
gamma_w * hw_axis) * (
                        1 - op_r) + p_chamber * op_r) / 4
            k2 = P * length_s * adhesion_cs
            k3 = n_tb * weight_r * friction_ts + friction_bu * weight_bu
            print("ciclo 3")
            print("k1:", k1, "k2:", k2, "k3:", k3)

    print("total thrust:", k1 * (d ** 2) + k2 * d + k3)
    print()

    return k1 * (d ** 2) + k2 * d + k3

def thr_wang_dyn(*, d, ka, gamma, vl_plus, op_r, p_chamber,
friction_gs, length_s, weight_s, adhesion_cs, c,
n_tb, weight_r, friction_ts, weight_bu, friction_bu,
z_wt, z_tun, depth, vl_build, adv, rpm, length_scr,
**_kwargs):
    """
    Returns the thrust from Wang dynamic model
    'Modeling and analysis of thrust force for EPB shield
tunneling machine'
    Wang et al. 2012, Automation in Construction

    Args:
        d (float): cutterhead diameter [m]
    """

```

```

z_wt (float): water table height (see level) [m]
z_tun (float): tunnel axis height (see level) [m]
ka (float): active earth pressure coefficient [-]
gamma (float): soil weight [kN/m3]
vl_plus (float): applied vertical loads [kPa]
op_r (float): opening ratio [-]
p_chamber (float): average pressure inside bulk chamber [kPa]
friction_gs (float): ground-shield friction coefficient [-]
length_s (float): shield length [m]
weight_s (float): machine weight [kN]
adhesion_cs (float): clay-steel adhesion [kPa]
c (float): soil cohesion [kPa]
n_tb (float): tail brushes number [-]
weight_r (float): ring weight [kN]
friction_ts (float): tail brushes-segment friction
coefficient [-]
weight_bu (float): back-up weight [kN]
friction_bu (float): back-up friction coefficient [-]
depth (float): deposit depth at shield axis [m]
vl_build (float): building vertical load [kPa]
adv (float): advancement [mm/min]
rpm (float): cutterhead rotation velocity [rev/min]
length_scr (float): scrapers' length [mm]

Returns:
    float: thrust for sandy soil or for clayey soil [kN]
"""
gamma_w = 10
hw_axis = z_wt - z_tun
print("WANG THRUST DYN:")

if hw_axis < 0:
    hw_axis = 0

rc = adv/(rpm*length_scr)

# con l'if-else seguente si può calcolare f per terreno sabbioso,
# o f per terreno argilloso
if adhesion_cs is None or np.isnan(adhesion_cs) or adhesion_cs ==
0:

    if c is None or np.isnan(c) or c == 0:

        k1 = (P / 4) * ((ka * gamma * depth + ka * (vl_build +
vl_plus) + gamma_w * hw_axis) *
                    (1 - op_r) + p_chamber * op_r) -
friction_gs * gamma * length_s * (2 + ka) / 3
        k2 = (P / 2) * friction_gs * gamma * (1 + ka) * depth *
length_s
        k3 = friction_gs * weight_s + n_tb * weight_r *
friction_ts + weight_bu * friction_bu

        a1 = ((P/4)*(ka*gamma*depth + ka*(vl_build+vl_plus))*(1-

```

```

op_r)) / \
        ((P/4)*((ka*gamma*depth + ka*(vl_build+vl_plus) +
gamma_w*hw_axis)*(1-op_r) + p_chamber*op_r) -
        (friction_gs*gamma*length_s*(2+ka)/3))
        a2 = ((P/4)*gamma_w*hw_axis*(1-op_r) + p_chamber*op_r) /
\
        ((P/4)*((ka*gamma*depth + ka*(vl_build+vl_plus) +
gamma_w*hw_axis)*(1-op_r) + p_chamber*op_r) -
        (friction_gs*gamma*length_s*(2+ka)/3))

        print("ciclo 1")
        print("k1:", k1, "k2:", k2, "k3:", k3)
        print("a1:", a1, "a2:", a2)
        print("rc:", rc)

    else:

        k1 = P * ((ka * gamma * depth + ka * (vl_build + vl_plus)
+ gamma_w * hw_axis) * (
        1 - op_r) + p_chamber * op_r) / 4
        k2 = P * length_s * c
        k3 = n_tb * weight_r * friction_ts + friction_bu *
weight_bu

        a1 = (ka*gamma*depth + ka*(vl_build + vl_plus))*(1-op_r)
/ \
        ((ka*gamma*depth + ka*(vl_build + vl_plus) +
gamma_w*hw_axis)*(1-op_r) + p_chamber*op_r)
        a2 = (ka*(vl_plus + vl_build)*(1-op_r) + p_chamber*op_r)
/ \
        ((ka*gamma*depth + ka*(vl_build + vl_plus) +
gamma_w*hw_axis)*(1-op_r) + p_chamber*op_r)

        print("ciclo 2")
        print("k1:", k1, "k2:", k2, "k3:", k3)
        print("a1:", a1, "a2:", a2)
        print("rc:", rc)

    else:

        k1 = P * ((ka * (gamma * depth + vl_build + vl_plus) +
gamma_w * hw_axis) * (
        1 - op_r) + p_chamber * op_r) / 4
        k2 = P * length_s * adhesion_cs
        k3 = n_tb * weight_r * friction_ts + friction_bu * weight_bu

        a1 = (ka * gamma * depth + ka * (vl_build + vl_plus)) * (1 -
op_r) / \
        ((ka * gamma * depth + ka * (vl_build + vl_plus) +
gamma_w * hw_axis) * (1 - op_r) + p_chamber * op_r)
        a2 = (ka * (vl_plus + vl_build) * (1 - op_r) + p_chamber *
op_r) / \
        ((ka * gamma * depth + ka * (vl_build + vl_plus) +

```

```
gamma_w * hw_axis) * (1 - op_r) + p_chamber * op_r)

    print("ciclo 3")
    print("k1:", k1, "k2:", k2, "k3:", k3)
    print("a1:", a1, "a2:", a2)
    print("rc:", rc)

    print("total thrust:", k1 * (a1*rc + a2) * (d ** 2) + k2 * d +
k3)
    print()

    # restituisce un valore per terreno sabbioso, o un valore per
terreno argilloso
    return k1 * (a1*rc + a2) * (d ** 2) + k2 * d + k3

def thr_zhang(*, d, length_s, sigma_rad, weight_s, friction_gs,
weight_bu, friction_bu, op_r, young_face, pen,
poisson_face,
p_chamber, k0, gamma, depth, surface_f, **_kwargs):
    """
    Returns the thrust from Zhang,2013 model
    'Theoretical model for loads prediction on shield tunneling
machine with consideration
of soil-rock interbedded ground'
Zhang et al. 2013, Science China, Technological Sciences
'Modeling and prediction for the thrust on EPB TBMs under
different geological conditions
by considering mechanical decoupling'
Zhang et al. 2016, Science China, Technological Sciences

    Args:
        d (float): cutterhead diameter [m]
        gamma (float): soil weight [kN/m3]
        op_r (float): opening ratio [-]
        p_chamber (float): average pressure inside bulk chamber [kPa]
        friction_gs (float): ground-shield friction coefficient [-]
        k0 (float): earth pressure coefficient at rest [-]
        length_s (float): shield length [m]
        weight_s (float): machine weight [kN]
        weight_bu (float): back-up weight [kN]
        friction_bu (float): back-up friction coefficient [-]
        sigma_rad (float): average earth pressure on shield (average
radial stress) [kPa]
        young_face (float): Young's modulus [kPa]
        pen (float): penetration rate [mm/rev]
        poisson_face (float): Poisson's ratio [-]
        depth (float): deposit depth at shield axis [m]
        surface_f (float): tunnel section [m2]

    Returns:
        float: thrust [kN]
    """
```

```
pen = pen / 1000 # conversione in m/rev

f1 = (d * young_face * (1 - op_r) * pen) / (
    1 - poisson_face ** 2) + surface_f * op_r * p_chamber +
surface_f * (
    1 - op_r) * k0 * gamma * depth

# TODO: capire se considerare falda

f2 = friction_gs * (P * d * length_s * sigma_rad + weight_s)

f3 = weight_bu * friction_bu

print("ZHANG THRUST:")

print("f1:", f1, "f2:", f2, "f3:", f3)
print("total thrust:", f1 + f2 + f3)
print()

return f1 + f2 + f3 # TODO: verificare necessità di FS per
considerare 5% aggiuntivo

def thr_zhang_int(*, layers, d, op_r, pen, z_tun, depth, p_chamber,
                 friction_gs, length_s, sigma_rad, weight_s,
                 weight_bu,
                 friction_bu, surface_f, **kwargs):
    """
    Returns the thrust from Zhang_interbedded,2013 model
    'Theoretical model for loads prediction on shield tunneling
    machine with consideration
    of soil-rock interbedded ground'
    Zhang et al. 2013, Science China, Technological Sciences

    Args:
        layers(list[Layer]): layers list ordered from top to bottom
        d (float): cutterhead diameter [m]
        op_r (float): opening ratio [-]
        pen (float): penetration rate [mm/rev]
        z_tun (float): tunnel central axis height (see level)
        depth (float): deposit depth at shield axis [m]
        p_chamber (float): average pressure inside bulk chamber [kPa]
        friction_gs (float): ground-shield friction coefficient [-]
        length_s (float): shield length [m]
        sigma_rad (float): average earth pressure on shield (average
        radial stress) [kPa]
        weight_s (float): machine weight [kN]
        weight_bu (float): back-up weight [kN]
        friction_bu (float): back-up friction coefficient [-]
        surface_f (float): tunnel section [m2]

    Returns:
```

```
float: thrust [kN]

"""

tun = z_tun + 10000
z_cal = tun + d/2
z_inv = tun - d/2
pen = pen / 1000 # conversione in m/rev

f1 = 0
f2 = 0
f3 = surface_f * op_r * p_chamber
f4 = friction_gs * (P * d * length_s * sigma_rad + weight_s)
f5 = weight_bu * friction_bu

print("ZHANG INTERBEDDED THRUST:")

for layer in layers:
    print("entering layer in layers")
    top = layer.top + 10000
    base = layer.base + 10000

    if z_cal > base and z_inv < top:
        z_sup = min(z_cal, top)
        z_inf = max(z_inv, base)
        thick_lay = z_sup - z_inf
        y = (z_sup - z_inf) / 2 + z_inf - tun
        x = math.sqrt((d ** 2) / 4 - y ** 2)

        f1 += ((1 - op_r) * layer.young * thick_lay * pen) / (1 -
layer.poisson ** 2)
        f2 += 2 * (1 - op_r) * x * layer.k0 * layer.gamma *
thick_lay * (depth - y)
    else:
        print("skip")

print("f1:", f1, "f2:", f2, "f3:", f3, "f4:", f4, "f5:", f5)
print("total thrust:", f1 + f2 + f3 + f4 + f5)
print()

return f1 + f2 + f3 + f4 + f5
```