

POLITECNICO DI TORINO

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria per l'Ambiente e il Territorio



TESI DI LAUREA MAGISTRALE

Analisi prestazionale di frese a piena sezione per lo scavo in roccia

Relatori

Prof. Ing. Marilena Cardu

Ing. Angelo Farinetti

Ing. Daniele Martinelli

Prof. Ing. Daniele Peila

Candidato

Ettore Catanzaro

Luglio 2019

Sommario

Introduzione	3
CAPITOLO 1 - Lo scavo mediante frese a piena sezione	5
1.1 Aspetti generali tunneling	5
1.2 Tunnel boring machine (TBM) da roccia	8
1.2.1 Aspetti generali	8
1.2.2 TBM Aperta	10
1.2.3 TBM a singolo scudo	13
1.2.4 TBM a doppio scudo	14
CAPITOLO 2 - Analisi delle prestazioni di scavo di TBM: stato dell'arte	16
2.1 Modelli di previsione del tasso di penetrazione	16
2.1.1 Modello NTNU	17
2.1.2 Colorado School of Mines (CSM)	22
2.2 Modelli di correlazione tra i parametri meccanici delle TBM	24
2.2.1 Caso studio I	24
2.2.2 Caso studio II	29
CAPITOLO 3 - Analisi sperimentale	34
3.1 Analisi delle correlazioni tra i parametri meccanici delle TBM	37
3.1.1 Analisi delle correlazioni per tipologia di fresa	37
3.1.2 Analisi delle correlazioni per tipologia di fresa e ammasso roccioso	50
3.1.3 Confronto tra i risultati per tipologia di fresa	75
3.1.4 Confronto tra i risultati per tipologia di fresa e ammasso roccioso	82
CAPITOLO 4 - Caso studio: il tunnel di base del Moncenisio	89
4.1 Validazione studio sperimentale	89
4.1.1 Validazione modelli TBM aperta	89
4.1.2 Validazione modelli TBM a singolo scudo	91
4.1.3 Validazione modelli TBM a doppio scudo	93
4.2 Aspetti generali tunnel di base del Moncenisio	95
4.2.1 Contesto geologico	96
4.3 Applicazione dei modelli al caso studio	98
4.3.1 Fresa GEA	98
4.3.2 Fresa Federica	99
4.3.3 Applicazione dei modelli che tengono conto dell'aspetto geologico	100
Conclusioni	102
Bibliografia	104

Introduzione

La continua evoluzione e trasformazione delle città comporta la necessità di trasferire un numero sempre maggiore di servizi in sotterraneo. La densità dei grandi centri abitati ha infatti superato, in Europa, 50.000 persone/km²; è necessario, di conseguenza, ricorrere a opere e servizi in sotterraneo con lo scopo di limitare la congestione del traffico e migliorare la vivibilità nelle città.

In tale contesto, le gallerie assumono un ruolo fondamentale nell'ottimizzazione dei tempi di percorrenza, in quanto consentono di realizzare percorsi più brevi e meno tortuosi, anche in contesti sfavorevoli. Le opere in sotterraneo consentono pure, in tutta comodità, di attraversare catene montuose che in passato hanno costituito confini pressoché invalicabili per i residenti.

Tra i metodi per la realizzazione di gallerie si può operare mediante scavo tradizionale, tipicamente con esplosivo o con macchine ad attacco puntuale, generalmente versatile ma comportante un elevato impatto ambientale, specie in aree antropizzate, o mediante scavo meccanizzato, poco versatile, più costoso ma decisamente vantaggioso, specie per tracciati di notevole lunghezza.

Nell'ambito dello scavo meccanizzato, la scelta della migliore tipologia di fresa a piena sezione richiede una approfondita analisi del contesto geologico e geomeccanico in cui deve essere realizzato lo scavo. Inoltre, le prestazioni di scavo, in termini di velocità di avanzamento, dipendono dallo studio dettagliato dei meccanismi di interazione roccia – utensile.

Un importante obiettivo dei progettisti è quello di impiegare le frese a piena sezione con i parametri meccanici opportuni (potenza, coppia, spinta), in modo da ottimizzare l'avanzamento dello scavo. In letteratura esistono, a tal proposito, molti modelli di previsione che permettono di valutare i parametri macchina più influenti sulle prestazioni dello scavo; essi, tuttavia, presentano molte limitazioni; anche per questo, i produttori di TBM ricorrono, ove possibile, a prove di laboratorio a scala pressoché reale (la LCM – Linear Cutting Machine, ne è un esempio).

Il presente elaborato si pone l'obiettivo di ricercare modelli di correlazione tra i parametri macchina delle TBM da roccia (aperte, a singolo scudo e a doppio scudo) e tra questi ultimi e la velocità di avanzamento dello scavo (m/mese). L'impiego di tali modelli di previsione consente di stimare, in fase preliminare di progettazione, il tempo di realizzazione di una galleria e di valutare, in prima approssimazione, i parametri meccanici con cui devono operare le frese da roccia, partendo dalla sola conoscenza della lunghezza della galleria e/o del diametro di scavo. Le equazioni di previsione ricavate tramite trattamento statistico dei dati richiedono quindi pochi parametri di input rispetto ai modelli previsionali reperibili in letteratura.

Per raggiungere tale scopo, è stato innanzitutto necessario svolgere un'approfondita ricerca bibliografica, volta alla creazione di una banca dati, costituita dai parametri tecnici di gallerie

realizzate in tutto il mondo (diametro di scavo, parametri macchina, tempo di realizzazione ecc.); in seguito, il database creato è stato analizzato statisticamente mediante il software Microsoft Excel. In una prima fase, sono stati ricercati dei modelli di previsione specifici per le tre tipologie di fresa da roccia, distinguendo solamente tra roccia compatta (in cui operano le TBM aperte) e roccia fratturata (in cui lavorano le TBM a singolo e a doppio scudo). Successivamente, sono stati analizzati i parametri meccanici contenuti nella banca dati, con lo scopo di ottenere dei modelli che tengano in considerazione, oltre alla tipologia di fresa, anche l'aspetto geologico ed in particolare la tipologia di roccia caratterizzante l'ammasso roccioso. Infine, sono proposte la validazione dello studio sperimentale e l'applicazione dei modelli previsionali dei parametri meccanici delle TBM ad un caso reale, rappresentato dal futuro tunnel di base del Moncenisio, opera rientrante nella nuova linea di collegamento Torino – Lione. L'obiettivo è quello di valutare a livello previsionale le prestazioni della fresa “Federica”, che sarà impiegata nello scavo del tunnel di base, e della fresa “GEA”, utilizzata nella realizzazione della galleria d'accesso della Maddalena; in particolare, sono stati stimati, a partire dalla conoscenza del diametro, i valori minimi di potenza, coppia e spinta per le due tipologie di fresa da roccia. Tali valori stimati sono stati confrontati con i valori reali, al fine di verificare la precisione dei modelli sperimentali individuati.

CAPITOLO 1

Lo scavo mediante frese a piena sezione

1.1 Aspetti generali tunneling

La continua evoluzione e trasformazione delle città comporta la necessità di trasferire un numero sempre maggiore di servizi in sotterraneo. Tutto ciò implica l'esigenza di costruire ed organizzare un sistema di infrastrutture all'avanguardia, che sia il più efficiente possibile. Gallerie ed opere in sotterraneo diventano quindi i protagonisti principali nello sviluppo delle città e delle vie di comunicazione, permettendo una sostanziale diminuzione dei tempi di percorrenza e un incremento della capacità di trasporto. Le gallerie oggi vengono realizzate in diversi campi d'applicazione: si costruiscono per consentire la circolazione veicolare e dei treni, per favorire il trasporto merci, per scopi idraulici ed idroelettrici (opere di derivazione, condotte forzate). I benefici legati al trasferimento dei servizi in sotterraneo hanno comportato, inoltre, continui sviluppi tecnologici ed investimenti nell'affinamento delle tecniche di scavo, con la nascita di sistemi sempre più veloci, sicuri ed efficienti.

Per la realizzazione di gallerie sono oggi disponibili differenti tecniche di scavo, ciascuna delle quali dipendente dalle caratteristiche geomeccaniche e geologiche della formazione da scavare, dalla geometria e lunghezza della galleria, dai limiti temporali, dalla presenza di acqua in sotterraneo e dalle vibrazioni indotte. Tali tecniche ricadono all'interno di due tipologie principali:

- scavo "convenzionale": è la tecnica più datata, e consiste nell'esecuzione dello scavo secondo un processo ciclico. Allo scavo vero e proprio seguono la rimozione del materiale abbattuto e l'installazione di eventuali supporti. Le tecniche appartenenti a questo metodo sono il "drill & blast" e lo scavo mediante macchine ad attacco puntuale;
- scavo meccanizzato a piena sezione: il processo di escavazione è continuo in quanto, mentre la macchina avanza, rimuove il materiale dalla sua sede ed installa l'eventuale supporto provvisorio o il rivestimento finale della galleria.

Tra i vantaggi legati allo scavo meccanizzato a piena sezione si riscontrano un minor disturbo del terreno e un maggior controllo dei cedimenti superficiali, assolutamente necessario in ambiente urbano. Inoltre, il materiale scavato presenta una granulometria uniforme e non è necessario intervenire con operazioni secondarie di riduzione della sua pezzatura prima di effettuare il trasporto, come nel caso di abbattimento con esplosivo. Lo scavo meccanizzato a piena sezione comporta ulteriori benefici in termini di produttività di scavo e di sicurezza, ma al contempo è strettamente

vincolato dall'immodificabilità della sezione di scavo (circolare) e dall'impossibilità di poter applicare tale metodo a gallerie aventi una lunghezza inferiore al chilometro, considerato che in tal caso i tempi di installazione sarebbero dello stesso ordine di grandezza dei tempi di scavo (Figura 1.1) (Vagnon F., 2013).

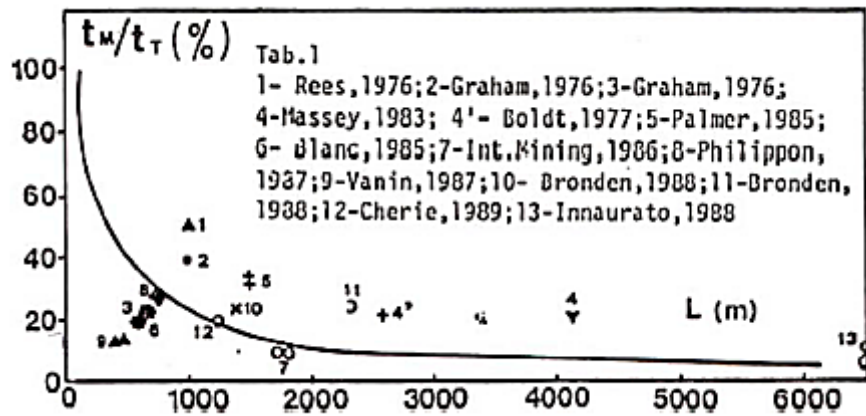


Figura 1.1: Rapporto percentuale tra i tempi di montaggio di una TBM e i tempi totali di scavo funzione della lunghezza della galleria (Innaurato N., 1990)

Una classificazione univoca di tali macchine non esiste: comunemente, ad esempio, le si divide in due grandi famiglie (Figura 1.2) in base al tipo di materiale oggetto dello scavo: Tunnel Boring Machine (TBM) quando l'abbattimento riguarda formazioni rocciose coerenti e Shield Machine quando lo scavo è realizzato in materiali incoerenti o deboli (weak rocks) (Rispoli A., 2013).

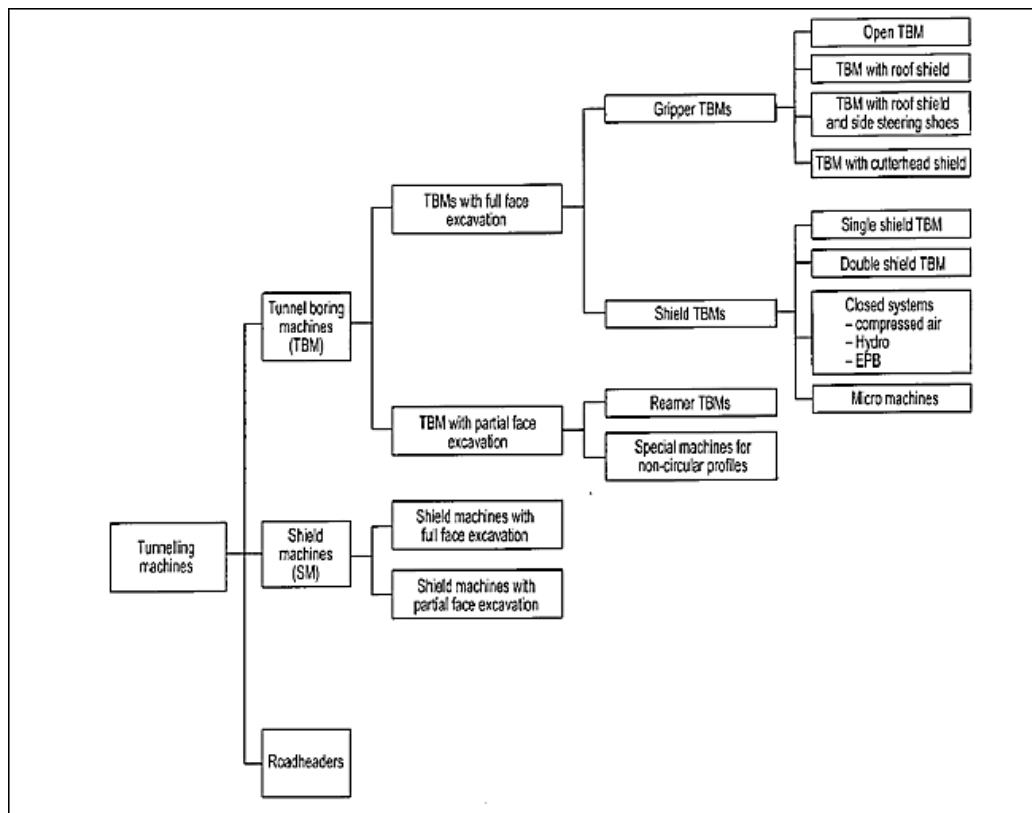


Figura 1.2: Panoramica tunneling machines (Maidl et Al., 2008)

Un'ulteriore classificazione (Figura 1.3) è stata realizzata dalla French Tunneling Society (AFTES), la quale presenta le tipologie di macchine per lo scavo di gallerie ed il loro contesto di applicazione. Il parametro di riferimento nella classificazione è rappresentato dalle condizioni di stabilità, che permette di identificare tre diverse situazioni possibili. Nel caso in cui non vi siano problemi di stabilità, è possibile utilizzare le TBM aperte, dette anche TBM non scudate: in questo contesto il problema principale è rappresentato dalla difficoltà di scavo riscontrabile in formazioni rocciose particolarmente dure e abrasive. Gli aspetti più importanti riguardano dunque la scelta degli utensili più idonei e l'installazione della potenza necessaria alla testa di taglio per abbattere la roccia. Nel caso in cui, invece, vi siano problemi legati alla stabilità della cavità, si utilizzano TBM scudate: si tratta di macchine dotate di un cilindro in acciaio che ha la funzione di protezione provvisoria in attesa dell'installazione del rivestimento finale, costituito da conci in calcestruzzo prefabbricato. La situazione più critica è rappresentata da un contesto in cui coesistono problemi di stabilità della cavità e del fronte. In questo campo trovano applicazione le "soil machines", le quali sono in grado di stabilizzare la cavità e al contempo di fornire una pressione stabilizzante al fronte di scavo. Nel presente elaborato si approfondiranno le tipologie ed i meccanismi di funzionamento delle macchine di scavo a piena sezione in roccia.

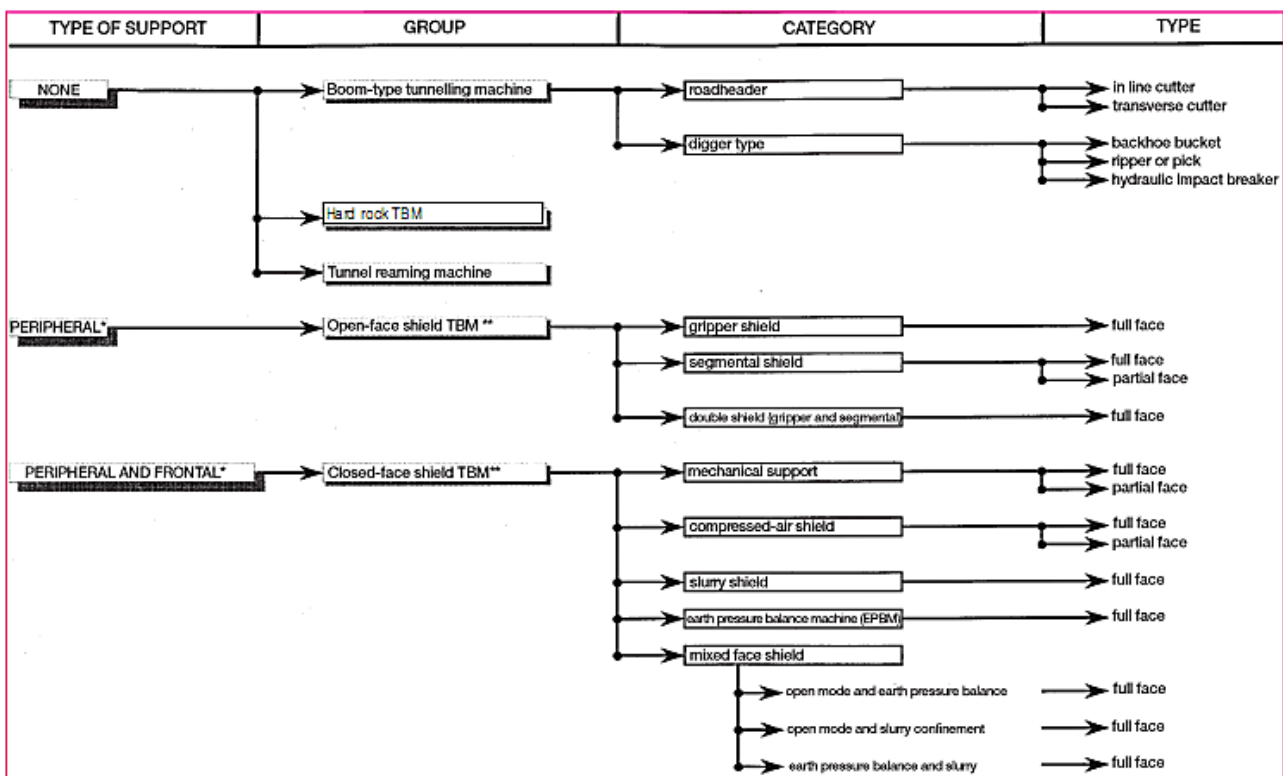


Figura 1.3: Classificazione TBM della French Tunneling Society (AFTES)

1.2 Tunnel boring machine (TBM) da roccia

1.2.1 Aspetti generali

Le frese a piena sezione in roccia affondano le proprie radici a partire dal XIX Secolo, ma l'evoluzione che ha portato all'introduzione di macchine molto simili a quelle di oggi è avvenuta intorno al 1950, anno a partire dal quale crebbero gli investimenti e gli studi nel settore, con il conseguente sviluppo di frese in grado di avanzare per parecchie decine di metri al giorno. Tra gli studiosi che hanno dato il loro contributo, vi sono un ingegnere belga, Joseph Maus, che collaborò nella realizzazione del tunnel del Moncenisio (1846) e Charles Wilson, che nel 1851 condusse una serie di studi sulle tipologie di utensili da impiegare. Il primo grande record di avanzamento giornaliero, pari a 30 m in calcare, si ottenne con una TBM progettata da James S. Robbins nel 1950, durante lo scavo del cosiddetto Humber Sewer Tunnel (Stack, 1995; Maidl et al., 2008).

Una TBM è assimilabile ad un cantiere in movimento, in cui si distinguono una testa fresante, che è la componente più pesante in quanto contiene i motori, e un back-up, rappresentato da tutto ciò che si trova dietro l'organo di scavo. Indipendentemente dal tipo, dal diametro e dall'applicazione, una TBM è caratterizzata da quattro gruppi principali (Maidl et al., 2008):

- organo di scavo, comprendente testa fresante, cuscinetto reggispinga e motori;
- sistema di spinta e grippaggio, che permette l'avanzamento della macchina;
- sistema di rimozione del materiale scavato;
- sistema di installazione dei supporti provvisori o del rivestimento finale, costituito da erettori e perforatrici.

Se si analizzano nel dettaglio i suddetti gruppi, è possibile distinguere i componenti principali (Figura 1.4) di una TBM (Vagnon F., 2013):

- **cutterhead**: massiccia struttura in acciaio, con diametro variabile da 1,5 m a 19 m, composta da moduli saldati o fissati mediante bulloni tra di loro per consentire un più agevole trasporto, sulla quale sono installati gli utensili di scavo; tale sistema può essere utilizzato anche per l'immissione di schiume polimeriche per evitare l'intasamento delle tasche di smarino in caso di detrito particolarmente fino;
- **apparato di sgombero**: costituito da due serie di organi posti in zone differenti: da tazze, disposte sulla periferia della testa atte ad asportare il detrito dal fronte, e da un trasportatore ad alette raschianti che riceve il detrito proveniente dalle tazze di carico e, attraversando il corpo della macchina, lo rovescia sui mezzi di sgombero;

- **supporto della cutterhead:** elemento strutturale di sostegno della testa rotante protetto da uno scudo; se la macchina è dotata di semplice sistema di ancoraggio, tale scudo è espandibile, per mezzo di cilindri idraulici, per garantire migliore stabilità durante lo scavo;
- **trave principale:** è costituita da una struttura scatolare in acciaio che sostiene i gripper e trasferisce la forza dai cilindri di spinta alla testa; inoltre contiene il nastro trasportatore per lo smarino. È fissata al supporto della cutterhead e a una struttura di sostegno che consente di scaricare i carichi durante la fase di scavo e durante il riposizionamento. Nelle TBM a doppio gripper non è presente;
- **sistema di ancoraggio:** serie di cilindri che regolano l'accostamento dei gripper alla parete della galleria;
- **martinetti di spinta:** consentono di esercitare la spinta necessaria all'avanzamento della macchina;
- **unità di guida:** composta da componenti idraulici e meccanici che consentono di governare la rotazione della testa e di mantenere l'asse della macchina coincidente con quello della galleria;
- **motori:** elettrici trifase dotati di sistema antipolvere, di raffreddamento, e anticondensa;
- **cuscinetto reggispinga:** è l'elemento strutturale più importante e deve essere correttamente progettato e realizzato per sopportare il carico trasmesso dai martinetti di spinta alla testa, al fine di evitare il bloccaggio della macchina;
- **nastro di smarino della TBM:** trasporta il materiale di risulta dalla tramoggia posta sulla cutterhead al back – up;
- **back – up:** è la parte retrostante la testa e comprende tutti i componenti elettrici e idraulici necessari al corretto funzionamento della macchina, oltre ai vari sistemi di montaggio dei supporti, eventuali perforatrici, sistema di smarino ecc.

Da un punto di vista generale, quindi, una TBM è in grado di avanzare in roccia grazie alla spinta e alla rotazione che vengono applicati alla testa fresante, equipaggiata con gli utensili. I motori elettrici installati nella macchina forniscono il moto di rotazione, mentre la spinta (moto di alimentazione) è realizzata mediante una serie di martinetti (cilindri di spinta) che agiscono sul rivestimento finale o utilizzano come contrasto il sistema di gripper, in funzione della tipologia di TBM impiegata.

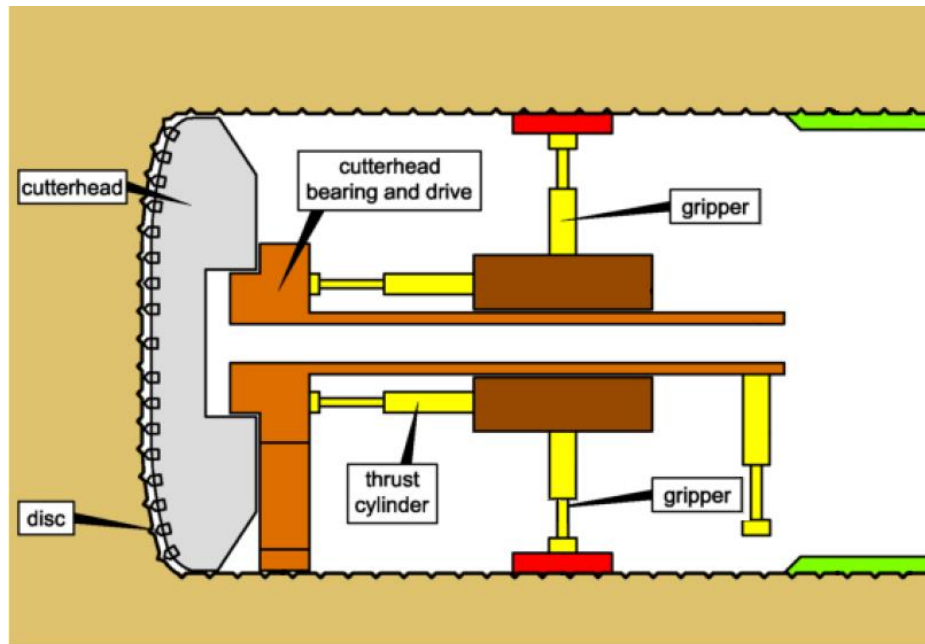


Figura 1.4: Schema semplificato di una TBM (Wittke,2006)

Come riportato in figura 1.2, le TBM da roccia si dividono in:

- TBM aperte;
- TBM a singolo scudo;
- TBM a doppio scudo.

La scelta della tipologia di macchina è direttamente legata alle caratteristiche geologiche e geomeccaniche della formazione rocciosa da attraversare, nonché alla produttività richiesta.

1.2.2 TBM Aperta

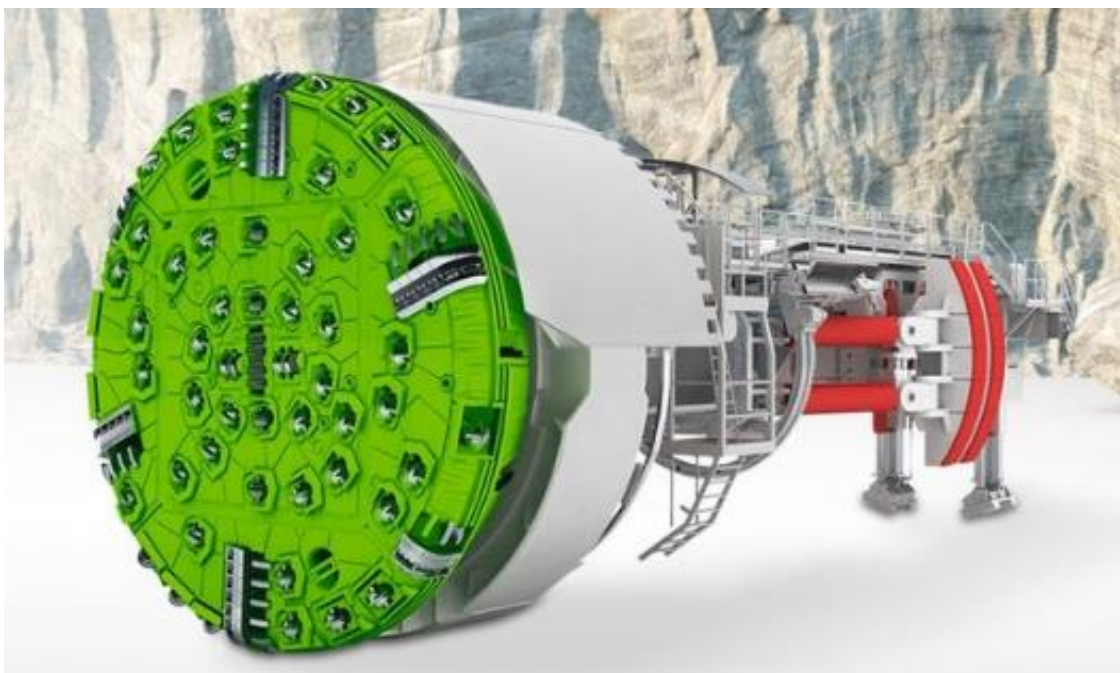


Figura 1.5: TBM aperta a singolo ancoraggio (Herrenknecht, 2019)

Questa tipologia di fresa meccanica a piena sezione è spesso chiamata “gripper TBM” ed è utilizzata in roccia competente o in formazioni geologiche aventi poche discontinuità e presenza d’acqua limitata (Figura 1.5). L’ammasso roccioso oggetto dello scavo deve anche avere un elevato tempo di autoportanza, in quanto questa tipologia di macchina non installa un rivestimento finale (può montare però le centine metalliche) ma applica al limite sostegni provvisori alla galleria (bullonatura occasionale, reti elettrosaldate, spritz beton). Tale TBM è in grado di lavorare con ottime prestazioni, in termini di avanzamento, quando lo scavo avviene in roccia avente una resistenza medio – alta con UCS variabile tra 50 – 100 MPa, in quanto la velocità di scavo è fortemente condizionata dal tempo richiesto per installare il supporto provvisorio, qualora necessario. Analizzando il funzionamento di una TBM (Figura 1.6), la cutterhead è spinta contro la roccia per mezzo di martinetti longitudinali che necessitano di un sistema di ancoraggio; tale sistema è costituito da un certo numero di coppie di grosse piastre d’acciaio (gripper), disposte sui lati della TBM, che vengono spinte contro le pareti della galleria da cilindri idraulici, in modo da creare, tramite l’attrito roccia – piastra, un punto di fissaggio. Una volta terminata la corsa dei martinetti longitudinali (1 – 1,5 m), inizia la fase di degripping in cui viene calato a terra un cilindro ausiliario di spinta (elemento verticale), il cui compito è quello di mantenere l’allineamento della macchina. Successivamente inizia una nuova fase di gripping e quindi di scavo, durante il quale, mentre la testa fresante avanza, l’intero back – up della macchina viene trascinato in avanti dai martinetti longitudinali.

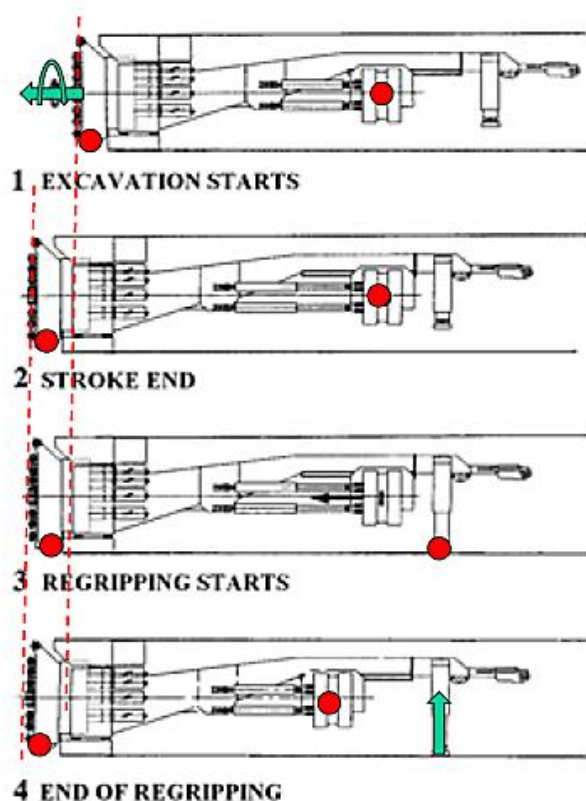


Figura 1.6: Fasi di avanzamento TBM aperta (Peila D.,2018)

Queste tipologie di macchine possono essere suddivise in due categorie (Figura 1.7):

- Main beam TBMs: a singolo ancoraggio, dotate di una sola coppia di gripper;
- Kelly style TBMs: a doppio ancoraggio, caratterizzate da due coppie di gripper.

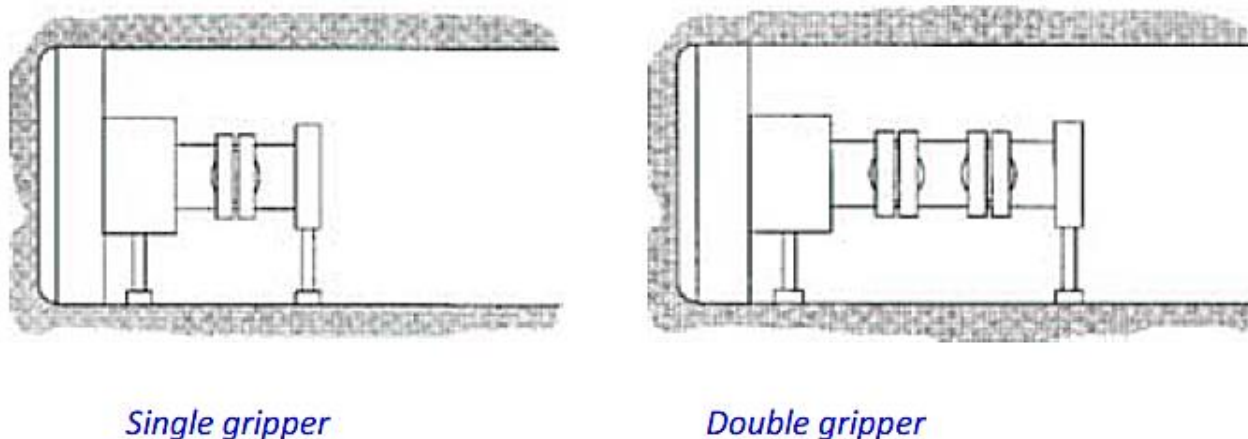


Figura 1.7. TBM a singolo e a doppio ancoraggio (Peila D.,2018)

Dal punto di vista tecnico-operativo, le frese aperte a semplice sistema di ancoraggio sono sostenute, durante l'avanzamento, dallo scavo nella zona del supporto testa e dalle scarpe dei gripper nella zona di ancoraggio e, pertanto l'asse di avanzamento non è rigidamente fissato ma può essere variato durante lo scavo, consentendo correzioni di guida pressoché continue. In quelle a doppio sistema di ancoraggio, invece, essendo la spinta di avanzamento contrastata da due coppie di scarpe di ancoraggio, poste ad una certa distanza fra loro, l'asse di avanzamento è rigidamente fissato dal piano di appoggio del supporto testa e dai due piani di ancoraggio e, dunque, non può essere variato durante lo scavo. Le correzioni di guida in questo caso possono avvenire soltanto al termine della corsa di avanzamento, oppure interrompendo l'avanzamento prima di aver completato la corsa e riposizionando l'asse della fresa (Rispoli A., 2013).

1.2.3 TBM a singolo scudo

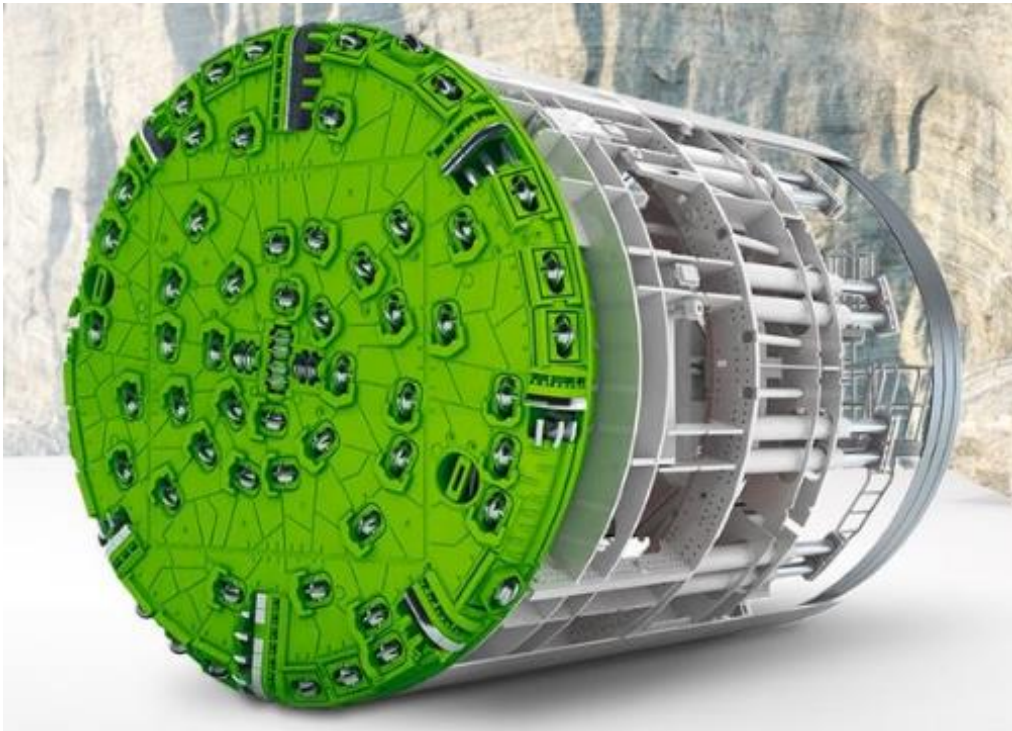


Figura 1.8: TBM a singolo scudo (Herrenknecht, 2019)

Le TBM a singolo scudo (Figura 1.8) sono impiegate in formazioni rocciose che presentano discontinuità geologiche e non sono in grado di garantire la forza di contrasto necessaria all'avanzamento della macchina, come nel caso delle TBM aperte. La macchina presenta una testa fresante cui segue uno scudo in acciaio, avente un diametro minore di quello della cutterhead, in modo da evitare lo sviluppo di attriti troppo elevati che potrebbero condizionare l'avanzamento della macchina. Si viene a creare quindi un gap che dovrà essere riempito in seguito all'installazione del rivestimento finale utilizzando iniezioni cementizie. Lo scudo crea un sistema chiuso e protegge la macchina e i lavoratori da possibili distacchi di roccia dal tetto fino a quando il rivestimento finale della galleria è installato. Le TBM a singolo scudo sono prive di gripper, e l'avanzamento avviene per mezzo di martinetti longitudinali che agiscono sull'anello di rivestimento finale installato nella fase precedente, nella parte terminale dello scudo. Tale rivestimento finale della galleria è costituito da conci prefabbricati in cls assemblati da un sistema a ventose (erettore dei conci). L'operazione di scavo è ciclica: infatti la necessità di contrastare la spinta di avanzamento sui conci prefabbricati di rivestimento non consente la messa in opera dei conci stessi simultaneamente allo scavo, ma solo al termine della corsa di scavo, dopo aver retracts gli steli dei cilindri idraulici di spinta (Rispoli A.,2013). La velocità di avanzamento risulta di conseguenza molto condizionata dai tempi di installazione del rivestimento finale. Si riportano in figura 1.9, i componenti principali di una TBM a singolo scudo.

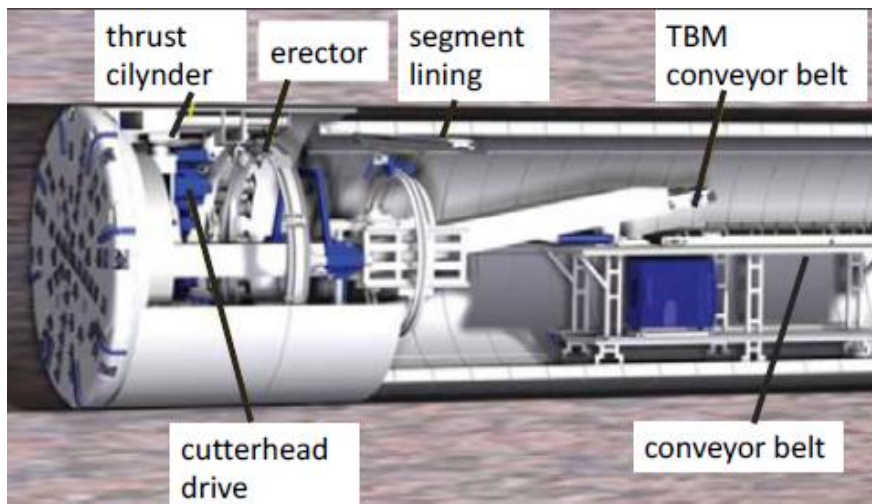


Figura 1.9: Componenti principali TBM monoscudo (Robbins)

1.2.4 TBM a doppio scudo



Figura 1.10: TBM a doppio scudo (Herrenknecht,2019)

Le TBM doppio scudo (Figura 1.10) sono le tipologie di fresa a piena sezione più sofisticate, dal punto di vista tecnico. Esse uniscono i principi di funzionamento di una TBM aperta e di una TBM a singolo scudo in una sola macchina (Herrenknecht,2019). Qualora le caratteristiche geomeccaniche della formazione rocciosa lo consentano, esse possono avanzare con elevate produttività, in quanto viene eliminata la ciclicità di scavo che ne condiziona fortemente le prestazioni. La macchina è infatti costituita da due scudi connessi telescopicamente. Lo scudo anteriore è composto dalla cutterhead, dal cuscinetto reggispira e dal sistema di guida mentre lo scudo posteriore comprende il sistema di gripper, i cilindri ausiliari di spinta e l'ereatore dei conci prefabbricati in calcestruzzo. Nella fase di scavo, i gripper presenti nello scudo posteriore si espandono in modo da creare un contrasto con le pareti della galleria e, grazie alla connessione telescopica tra i due scudi, lo scudo anteriore avanza

mentre quello posteriore resta fermo e così facendo, contemporaneamente allo scavo, può essere installato il rivestimento finale (Figura 1.11 fase a). Nel momento in cui termina la corsa dei cilindri principali di spinta, che fungono da connessione tra i due scudi, inizia la fase di degripping in cui vengono ritirati i gripper e utilizzando i cilindri ausiliari di spinta, i quali agiscono sfruttando come contrasto i conci installati, viene recuperato lo scudo posteriore (Figura 1.11 fase b).

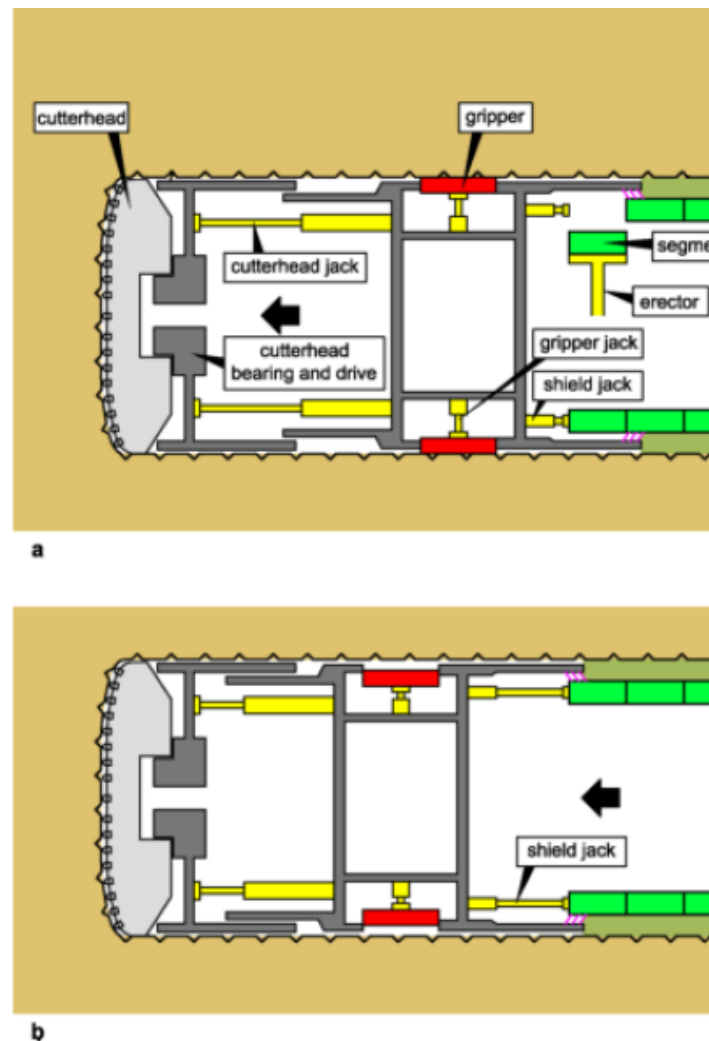


Figura 1.11: Ciclo di scavo di una TBM doppio scudata (Wittke, 2006)

Le TBM doppio scudo possono quindi essere utilizzate in due contesti:

- formazione rocciosa di buona qualità: in questo caso la macchina lavora come una TBM aperta e l'installazione del rivestimento finale avviene in contemporanea allo scavo;
- formazione rocciosa di scarsa qualità: in tale scenario la fresa a piena sezione lavora come una macchina a singolo scudo in quanto non è possibile utilizzare i gripper (lo scavo del tunnel e l'installazione del rivestimento sono operazioni sequenziali). In questo caso l'avanzamento avviene utilizzando i cilindri di spinta ausiliari, i quali agiscono sull'anello di rivestimento finale precedentemente installato.

CAPITOLO 2

Analisi delle prestazioni di scavo di TBM: stato dell'arte

Nel presente capitolo si introducono alcuni modelli previsionali delle prestazioni di scavo in roccia utilizzati comunemente e disponibili in letteratura. Tali modelli, che si basano su approcci di tipo empirico o analitico, permettono di stimare due dei parametri che influenzano principalmente i costi di realizzazione della galleria: il tasso di penetrazione degli utensili a disco e l'usura di questi ultimi. Tramite tali parametri è possibile fornire una stima del tempo di realizzazione di una galleria direttamente legato ai tempi di scavo e di sostituzione degli utensili usurati. Inoltre, esistono alcuni modelli che consentono di correlare i parametri caratteristici delle TBM, quali la spinta, la coppia e la potenza. In questo caso, le equazioni sono ricavate tramite trattamento statistico di banche dati contenenti parametri ottenuti da progetti precedentemente realizzati.

2.1 Modelli di previsione del tasso di penetrazione

Il tasso di penetrazione (mm/giro) dipende dalle caratteristiche dell'ammasso roccioso e dalle proprietà meccaniche della TBM. I parametri della macchina comunemente utilizzati nei modelli di previsione sono:

- spinta totale [N];
- spinta/ utensile: dipende dal diametro del cutter;
- diametro della testa fresante;
- larghezza geometrica della punta del cutter;
- spaziatura tra gli utensili;
- numero di utensili.

Per ciò che concerne i parametri di input della roccia, spesso si utilizzano l'uniaxial compressive strength (UCS), il Brazilian tensile strength (BTS) e il drilling rate index (DRI). Per descrivere le proprietà dell'ammasso roccioso, nei modelli si tiene anche conto della eventuale presenza di discontinuità con particolare riferimento all'orientazione, alla spaziatura e alla persistenza dei giunti. Ciascun modello prende in esame uno o più parametri precedentemente elencati restituendo la stima dell'entità della penetrazione e/o del consumo di utensili.

2.1.1 Modello NTNU

Questo modello è utilizzato per stimare la penetrazione netta (m/h), la vita utile degli utensili (h/cutter), il coefficiente di utilizzo della macchina (%), l'avanzamento settimanale (m/week) e il costo di scavo. È stato sviluppato dall'analisi di dati empirici raccolti durante lo scavo di gallerie in Norvegia tra gli anni '970 e '980 ed è continuamente aggiornato con parametri ricavati in nuovi progetti. La prima versione del modello è stata proposta da Bruland nel 2000 ed è presentata di seguito.

I parametri dell'ammasso roccioso presi come riferimento ed utilizzati come input in questo modello sono:

- la frequenza delle discontinuità: si utilizza una classe di fratturazione e si considera un angolo tra l'asse della galleria e i piani di debolezza;
- drilling rate index (DRI): si valuta sperimentalmente in laboratorio mediante apposita strumentazione;
- cutter life index (CLI): è un parametro molto importante nello scavo con TBM ed esprime la vita utile degli utensili come intervallo di tempo in ore che intercorre fra due sostituzioni;
- porosità.

Sicuramente la presenza di discontinuità è il fattore che influisce maggiormente sulla penetrazione. Infatti, più la roccia è fratturata, maggiore risulta la penetrazione.

Per ciò che concerne la macchina di scavo, i parametri della TBM utilizzati come input sono:

- numero di utensili montati sull'organo di scavo;
- spinta massima/utensile;
- spaziatura tra gli utensili;
- diametro della testa fresante;
- velocità di rotazione della testa fresante;

Nella stima della penetrazione netta, i parametri caratteristici dell'ammasso roccioso e della TBM vengono condensati in due indici principali, k_{ekv} e M_{ekv} . Il primo è il fattore di fratturazione equivalente mentre il secondo è la spinta equivalente. Nel calcolo di questi due parametri si assegna alle fratture rilevate una specifica classe di appartenenza (Figura 2.1). In tal contesto si distinguono i giunti, fratture continue riscontrabili in tutto il profilo laterale della galleria, dalle fessure, fratture non continue che si vedono solo in parte nel profilo laterale del tunnel.

Fracture class (Joints = Sp / Fissures = St)	Distance between planes of weakness [cm]	
O	-	-
O-I	160	-
I-	80	90
I	40	80
II	20	40
III	10	20
IV	5	10

Figura 2.1: Classi di fratturazione (Bruland,2000)

L'angolo tra l'asse della galleria e i piani di discontinuità viene calcolato con la seguente formula:

$$\alpha = \sin^{-1}(\sin \alpha_f \cdot \sin(\alpha_t - \alpha_s)) \quad (1)$$

dove α_s è lo strike dei piani di debolezza, α_f è l'angolo dip dei piani di debolezza e α_t è l'angolo tra l'orizzontale e la direzione dell'asse della galleria.

Il fattore di fratturazione k_s dipende dalla densità di fratturazione dell'ammasso roccioso e dall'angolo tra l'asse della galleria e i piani di discontinuità (Figura 2.2).

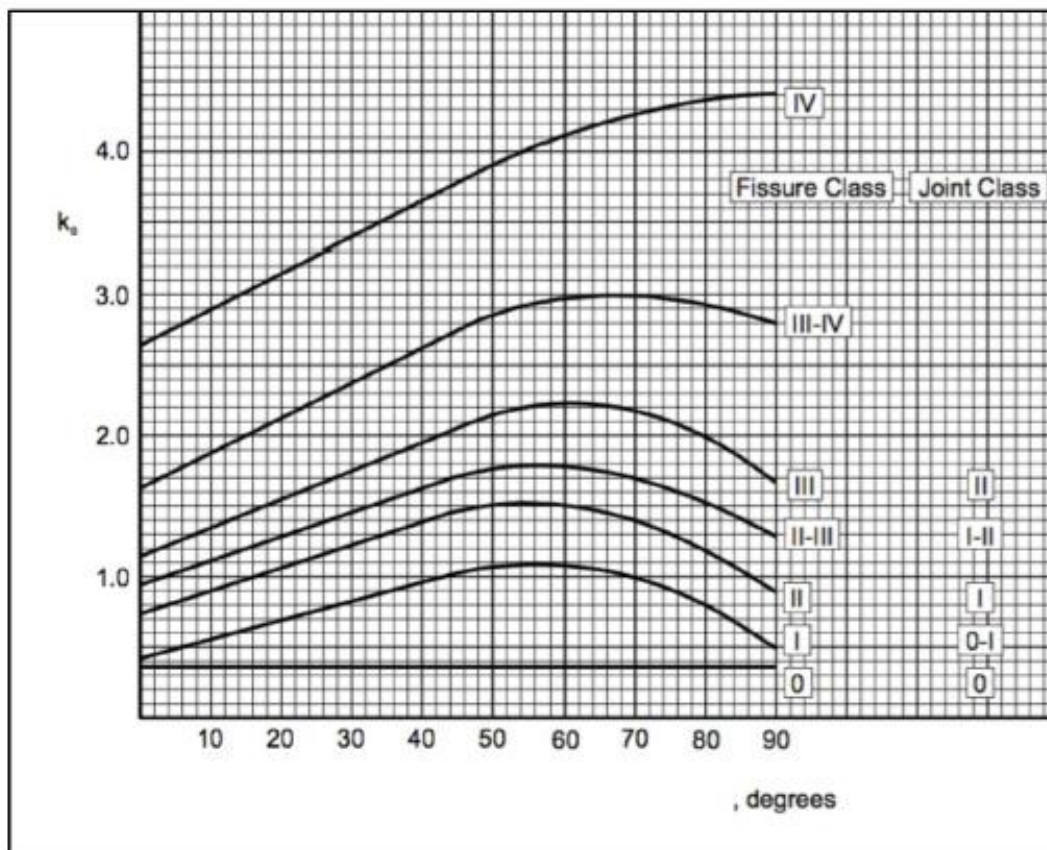


Figura 2.2: Fattore di fratturazione (Bruland,2000)

Nel caso in cui l'ammasso roccioso presenti più piani di debolezza, è possibile ricavare per ogni famiglia di discontinuità il corrispondente fattore di fratturazione ed applicare poi la seguente formula:

$$k_{s-tot} = \sum_{i=1}^n k_{si} - (n - 1) * 0,36 \quad (2)$$

dove n è il numero di famiglie di discontinuità.

Noto il fattore di fratturazione, si ricava il fattore di fratturazione equivalente con la seguente formula:

$$k_{ekv} = k_{s-tot} \cdot k_{DRI} \quad (3)$$

dove k_{DRI} è un fattore di correzione che si ricava con il grafico in figura 2.3, noto il drilling rate index (DRI).

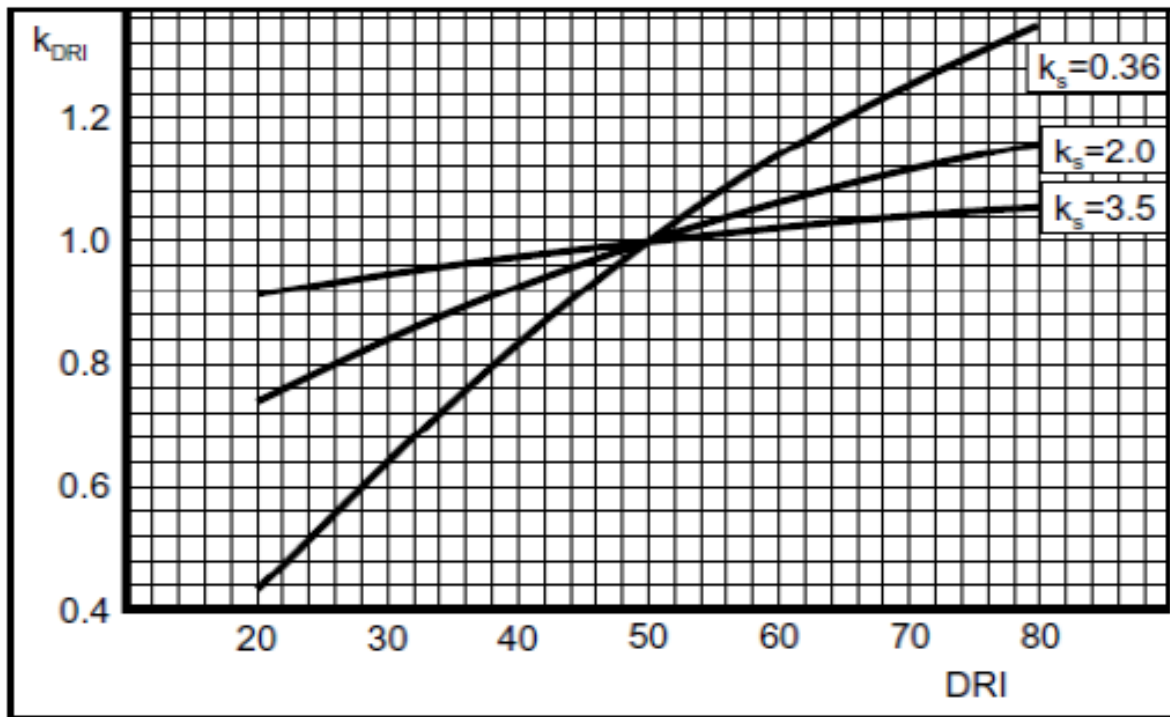


Figura 2.3: Fattore di correzione drilling rate index (Bruland, 2000)

Per ciò che riguarda le caratteristiche della macchina, il fattore di spinta equivalente M_{ekv} (kN/cutter) si ottiene utilizzando la seguente formula:

$$M_{ekv} = M_B \cdot k_d \cdot k_a \quad (4)$$

dove M_B è la spinta media lorda/utensile, k_d e k_a sono rispettivamente i fattori di correzione del diametro dell'utensile e della spaziatura media tra gli utensili. Tali fattori si ricavano tramite i grafici in figura 2.4 e figura 2.5.

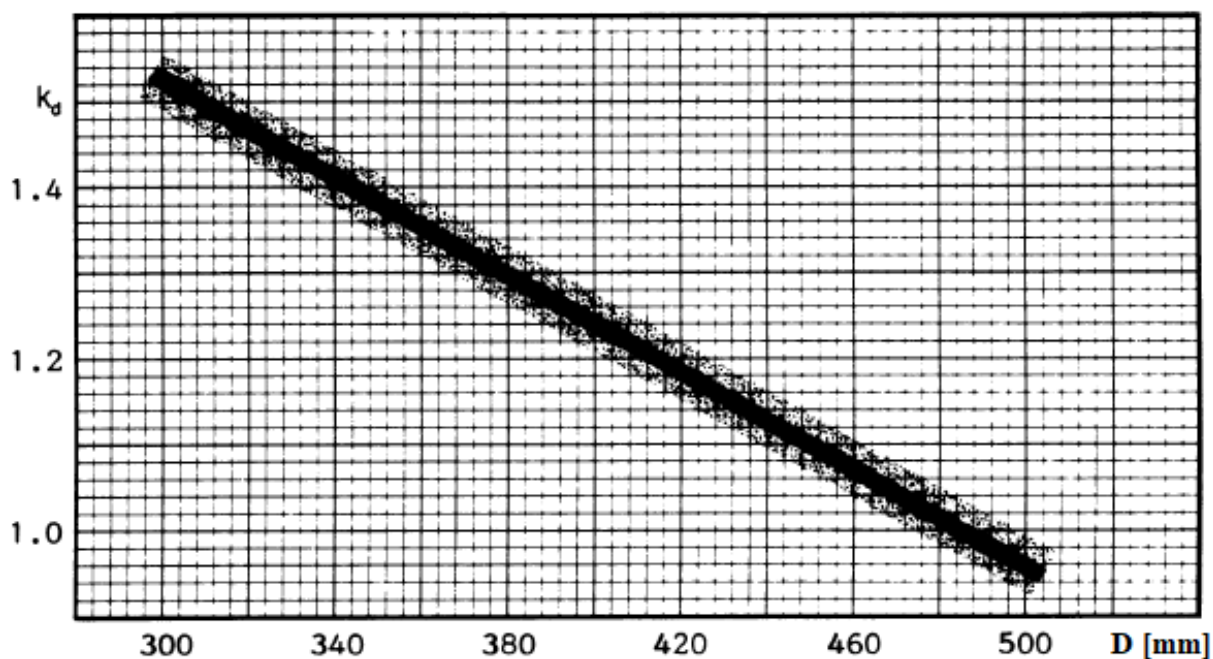


Figura 2.4: Fattore di correzione diametro utensile (D) (Bruland,2000)

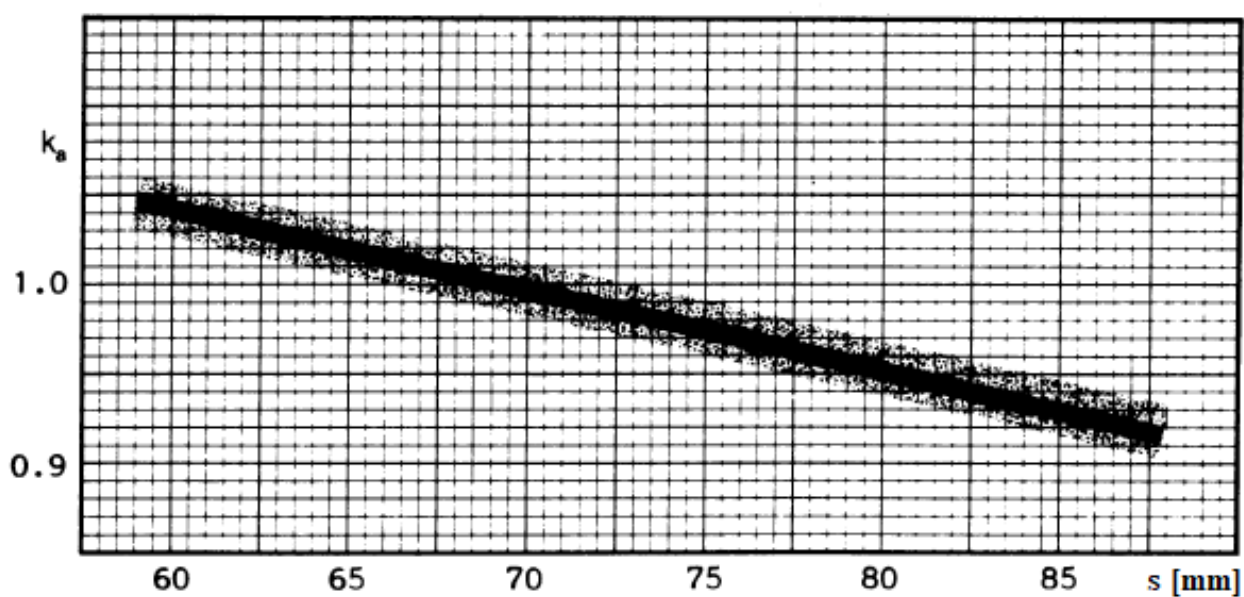


Figura 2.5: Fattore di correzione spaziatura media (s) utensili (Bruland,2000)

Dalla conoscenza del fattore di fratturazione equivalente, ottenuto tramite la (3), con l'ausilio dei grafici in figura 2.6 e figura 2.7, si ricavano il coefficiente di penetrazione b e la spinta critica/utensile (ovvero la forza necessaria per ottenere 1 mm/rev).

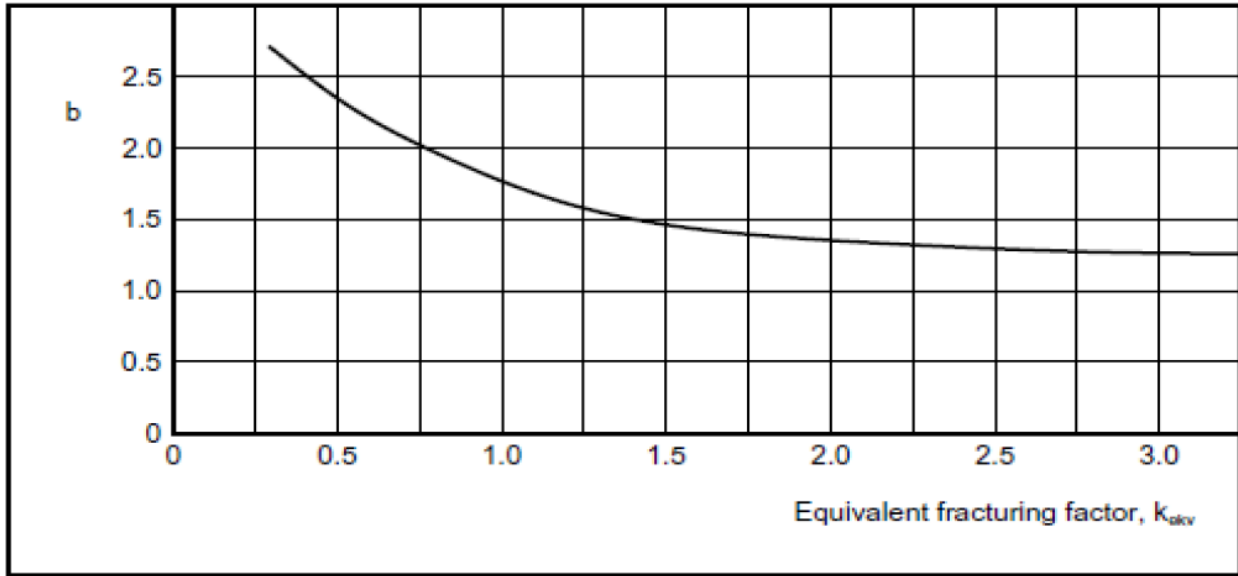


Figura 2.6: Coefficiente di penetrazione in funzione del fattore di fratturazione equivalente (Bruland,2000)

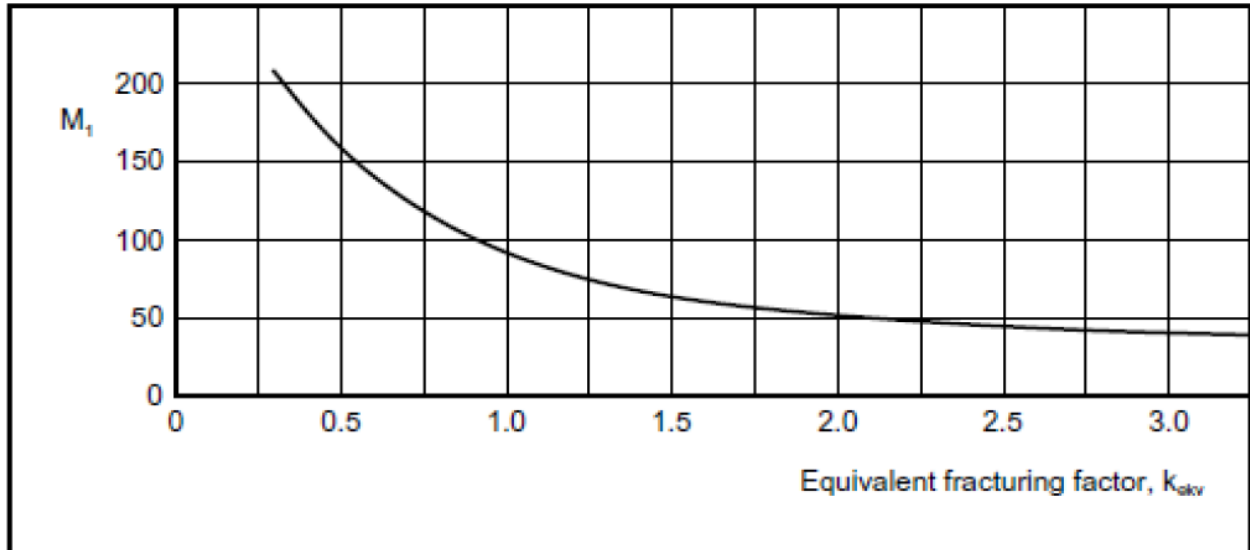


Figura 2.7: Spinta critica in funzione del fattore di fratturazione equivalente (Bruland,2000)

Tali parametri, insieme al fattore di spinta equivalente M_{ekv} , vengono utilizzati per valutare il tasso di penetrazione base i_0 (mm/rev):

$$i_0 = \left(\frac{M_{ekv}}{M_1} \right)^b \quad (5)$$

Conoscendo poi la velocità di rotazione (rpm) della testa fresante, è possibile ricavare il tasso di penetrazione netto in m/h:

$$I = i_0 \cdot RPM \cdot \frac{60}{1000} \quad (6)$$

2.1.2 Colorado School of Mines (CSM)

Si tratta di un modello analitico di previsione delle prestazioni di scavo basato su una prova di laboratorio del tipo “full scale”, il così detto linear cutting test. L’obiettivo di tale prova è ricreare le condizioni di azione dell’utensile sulla roccia durante lo scavo con TBM (Figura 2.8), in modo tale da ricavare la forza di taglio, la forza normale e la forza tangenziale agenti su un utensile rotolante su un blocco di roccia di dimensioni 1x1x0,6 m. Il test viene eseguito più volte valutando diverse spaziatore e penetrazioni.

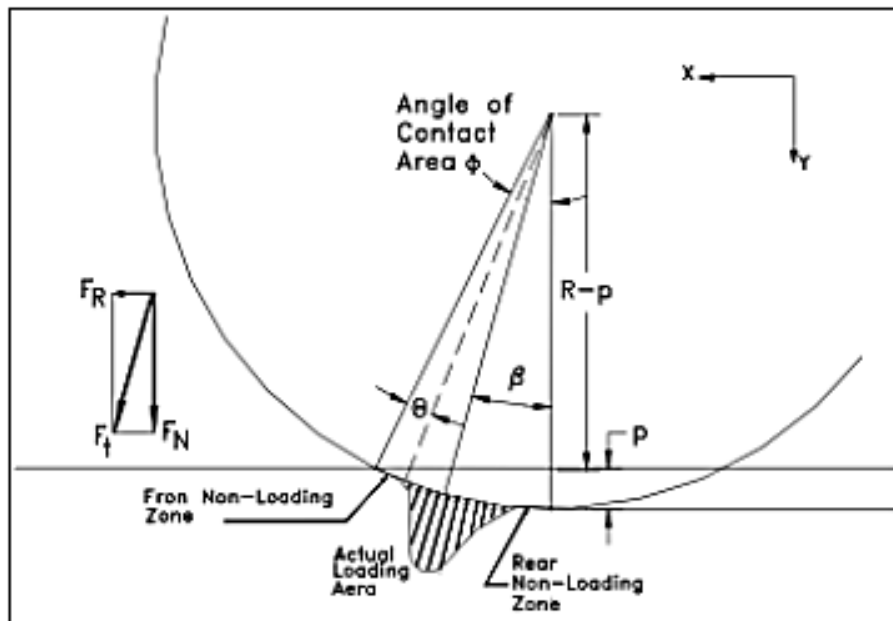


Figura 2.8: Distribuzione della pressione di contatto tra la roccia e l'utensile (Ozdemir -Rostami,1993)

La prima versione del modello di previsione delle prestazioni di scavo è stata pubblicata da Ozdemir nel 1977 e successivamente è stata revisionata da Rostami nel 1993.

I parametri utilizzati come input nel modello sono:

- parametri geotecnici: in particolare UCS e BTS;
- parametri della TBM: diametro TBM, numero di utensili e spaziatore, larghezza geometrica della punta del cutter, RPM;

Partendo dal modello fisico ricreato nel test di laboratorio, si effettuano dei calcoli analitici. Innanzitutto, si assume un valore di penetrazione p (mm/rev) e noto il raggio dell’utensile R (mm), si valuta l’angolo di contatto Φ con la seguente formula:

$$\Phi = \arccos\left(\frac{R-p}{R}\right) \quad (7)$$

Tale angolo di contatto definisce la regione di roccia interessata dallo stress legato all'interazione con l'utensile. Noto tale valore, si procede nel calcolo della pressione di contatto dell'utensile in questione p^0 tramite l'ausilio della seguente formula:

$$p^0 = C \cdot \sqrt[3]{\frac{S \cdot \sigma_u^2 \cdot \sigma_t}{\phi \cdot \sqrt{R} \cdot T}} \quad (8)$$

dove C è un coefficiente di taglio, S è la spaziatura tra gli utensili, σ_u è l'uniaxial compressive strength della roccia, σ_t è il brazilian tensile strength e T è la larghezza geometrica della punta del cutter.

Si procede quindi nella valutazione della spinta/utensile F_t (kN/cutter):

$$F_t = \left(\frac{T \cdot R \cdot \phi \cdot p^0}{(1 + \psi \cdot 1000)} \right) \quad (9)$$

dove ψ è un fattore di distribuzione della tensione, variabile tra 0.2 e -0.2. La spinta totale/utensile viene quindi scomposta in una componente normale F_n e in una tangenziale F_r :

$$F_n = F_t \cdot \cos \frac{\phi}{2} \quad (10)$$

$$F_r = F_t \cdot \sin \frac{\phi}{2} \quad (11)$$

Lo scopo principale del modello CSM è quello di stimare la spinta totale, il momento torcente e la potenza della TBM. Tali valori stimati vengono poi confrontati con i parametri di progetto della macchina. In tal modo, tramite calcolo iterativo, assumendo ogni volta un diverso valore di p, è possibile valutare, tramite confronto tra parametri stimati e caratteristiche di progetto, il valore di penetrazione massimo ottenibile in una determinata formazione rocciosa con una determinata TBM. La spinta totale Th , il momento torcente Tq e la potenza P vengono calcolati utilizzando le seguenti formule:

$$Th = \sum_1^N F_n \approx N \cdot F_n \quad (12)$$

$$Tq = \sum_1^N F_r \approx 0,3 \cdot D \cdot N \cdot F_r \quad (13)$$

$$P = \frac{\pi}{30} \cdot Tq \cdot RPM \quad (14)$$

dove N è il numero di utensili e D è il diametro della TBM.

2.2 Modelli di correlazione tra i parametri meccanici delle TBM

Si riportano di seguito due studi che hanno come obiettivo l'analisi delle correlazioni esistenti tra i parametri di progetto delle TBM. Lo scopo di questi studi è quello di ricavare dei modelli che permettano di valutare tali parametri in fase progettuale, a partire dalle caratteristiche meccaniche della fresa a piena sezione, come ad esempio il diametro. È fondamentale scegliere correttamente spinta, momento torcente e potenza da fornire alla testa fresante per abbattere una certa tipologia di roccia. Una sottostima di tali parametri comporta una riduzione delle prestazioni dello scavo, con conseguente aumento dei tempi di realizzazione dell'opera.

2.2.1 Caso studio I

Nel 2014 Ates et Al. hanno condotto un'analisi statistica su una banca dati costituita da 262 parametri di progetto di TBM (72 aperta, 24 singolo scudo, 41 doppio scudo, 86 EPB e 39 slurry TBM). Tali parametri si riferiscono a progetti realizzati a partire dal 1985 nel mondo. Nello studio si ricercano potenziali correlazioni tra diametro della TBM, spinta, momento torcente, peso totale della macchina, RPM della testa fresante e numero di utensili installati sulla cutterhead. Alcuni dei parametri sotto indagine sono ben correlati tra loro e per questo motivo sono fornite delle equazioni che permettono di fare delle previsioni a fini progettuali. A tal fine, Ates et Al. convalidano i modelli trovati confrontando i parametri stimati tramite le equazioni, con i dati di TBM utilizzate per realizzare 30 progetti in Turchia in diversi contesti geologici.

Il trattamento statistico dei dati è stato condotto mettendo in relazione i diversi parametri e valutando diverse funzioni di regressione per il fitting dei dati. La funzione con il valore più alto di R^2 è stata selezionata e scelta come equazione di previsione.

Nell'analisi della correlazione tra il diametro di scavo della TBM e il momento torcente (Figura 2.9), si osserva una forte dipendenza tra le due grandezze nel caso di EPB e slurry TBM. Ciò evidenzia che il diametro della macchina influenza molto il momento torcente in terreni soffici ed il tutto è direttamente collegato ai meccanismi di funzionamento di queste macchine. Per ciò che concerne le TBM da roccia, si evidenziano correlazioni meno marcate in quanto giocano in tale ambito un ruolo fondamentale le caratteristiche geomeccaniche della roccia. Il diametro non può quindi essere utilizzato come unico parametro in un modello previsionale.

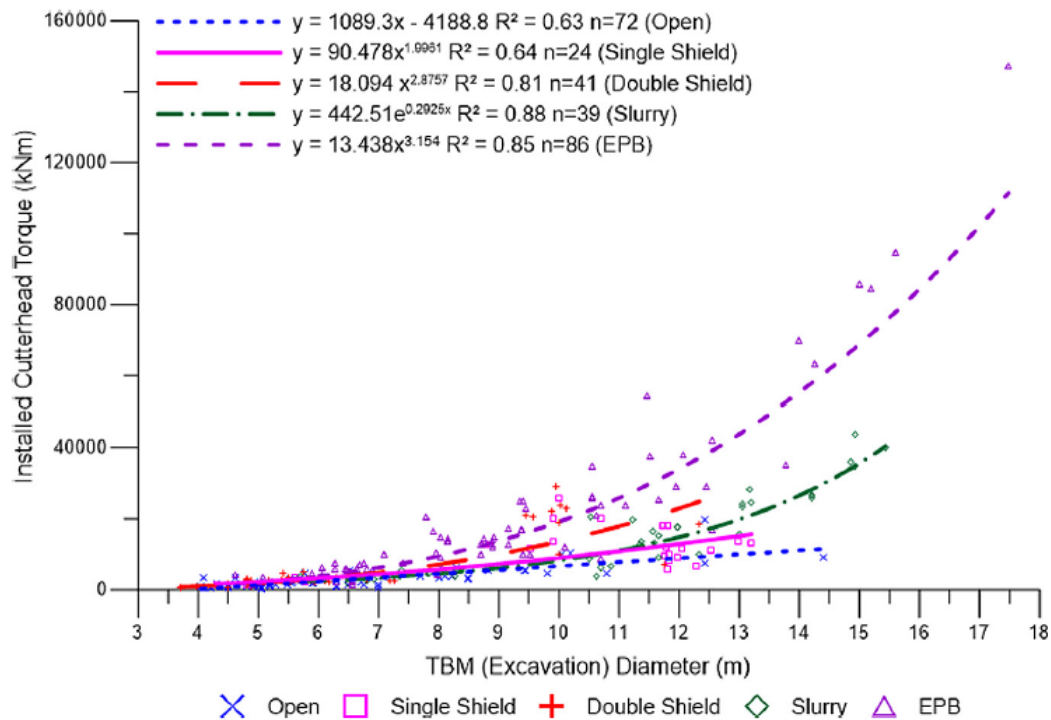


Figura 2.9: Correlazione tra diametro della TBM e coppia (Ates et Al.,2014)

La correlazione tra il diametro della TBM e la spinta (Figura 2.10) risulta minore, per le differenti tipologie di TBM, rispetto a quella tra diametro e momento torcente. Ciò è dovuto al fatto che nella determinazione della spinta da applicare alla testa fresante subentrano tutti i parametri geotecnici e geologici, come l'uniaxial compressive strength (UCS), la frequenza di discontinuità e la dimensione dei grani. Inoltre, a giocare un ruolo determinante nel caso di terreni soffici, sono la pressione verticale e l'attrito che si sviluppa tra lo scudo della macchina e il terreno. Nel caso di TBM aperte, la correlazione tra diametro e spinta è praticamente insignificante poiché quest'ultima dipende principalmente dalla resistenza della roccia e dalla sua compattezza. Nell'ambito delle macchine doppio scudate, a seconda della tipologia di funzionamento, si distinguono una spinta principale e una spinta ausiliaria. La prima si utilizza quando la TBM doppio scudata lavora come "gripper TBM", mentre la seconda entra in causa quando si è in presenza di roccia fratturata e la macchina lavora come TBM monoscudo. La spinta ausiliaria è maggiore della spinta principale perché è maggiore l'attrito che si sviluppa tra i due scudi e la roccia fratturata. Come si evince dal grafico in figura 2.10, l'andamento della spinta principale di una macchina doppio scudata in funzione del diametro è uguale all' andamento nelle TBM aperte, con la differenza che la capacità di spinta della TBM a doppio scudo è maggiore della macchina aperta, a causa della presenza degli attriti dello scudo. Inoltre, la capacità di spinta ausiliaria, oltre ad essere più grande della capacità di spinta principale, è la maggiore in assoluto rispetto alle altre macchine, in quanto lo scudo è più lungo (maggiori attriti) e la macchina è più pesante delle altre. In questo caso il trend è simile a quello delle EPB.

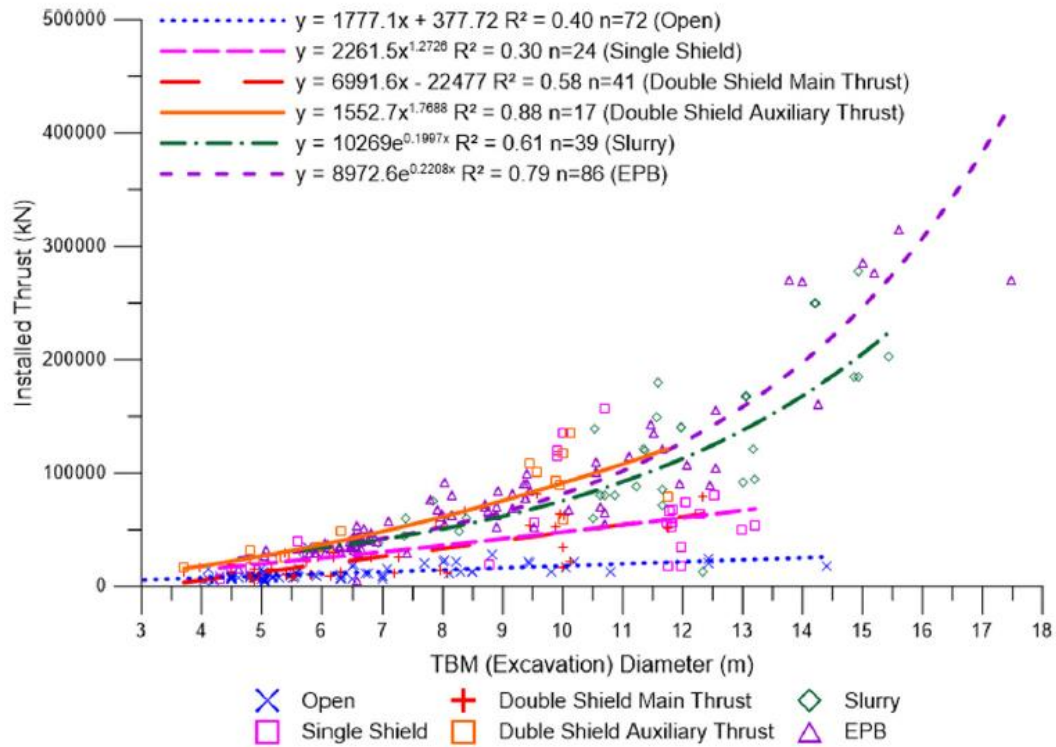


Figura 2.10: Correlazione tra il diametro della TBM e la spinta (Ates et Al.,2014)

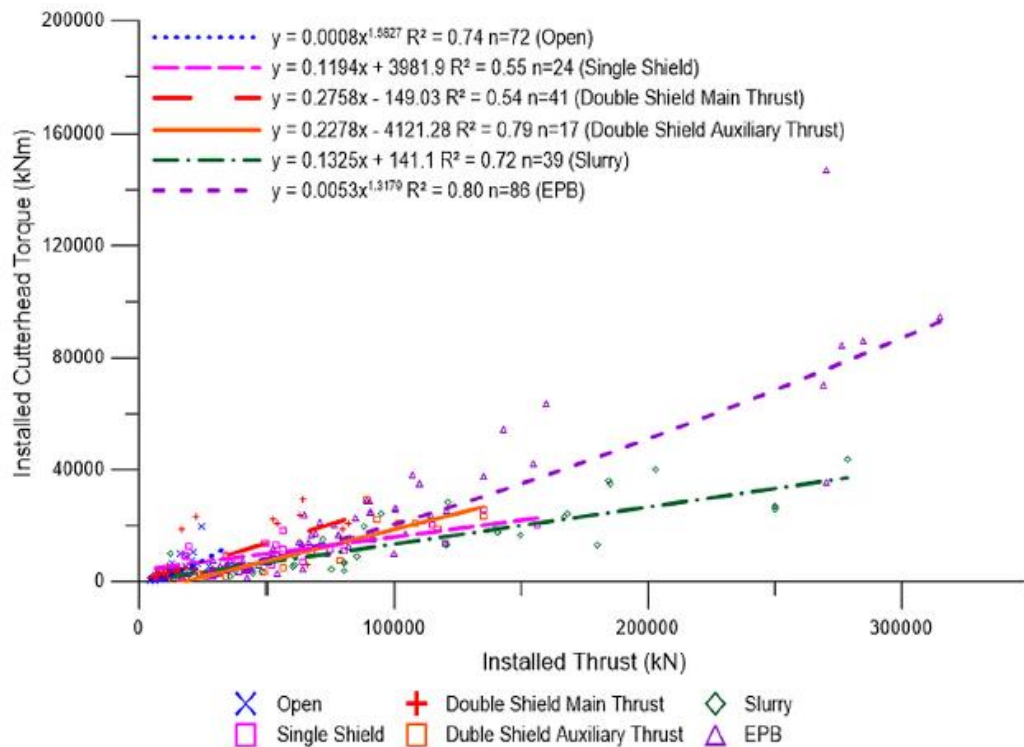


Figura 2.11: Correlazione tra la spinta e la coppia (Ates et Al.,2014)

Le correlazioni tra la spinta e il momento torcente risultano abbastanza marcate, con andamento lineare o di potenza, come riportato in figura 2.11. Il parametro di correlazione R^2 assume dei valori abbastanza alti, ad eccezione delle macchine a singolo e doppio scudo, in cui i set di dati sono limitati.

Per quanto riguarda la correlazione tra il diametro della testa fresante e il peso totale della macchina (Figura 2.12), si osservano degli andamenti affini a curve di potenza o di tipo esponenziale. Al crescere del diametro aumenta il peso della macchina per ogni tipologia di TBM. La macchina più leggera è quella aperta, cui seguono la slurry TBM, la fresa a singolo scudo, l'EPB ed infine la TBM a doppio scudo. Si osserva, inoltre che, a parità di diametro e per valori minori di 9 m, la differenza di peso tra le diverse tipologie di macchine è molto piccola. Tale differenza cresce invece all'aumentare del diametro per valori maggiori di 9 m.

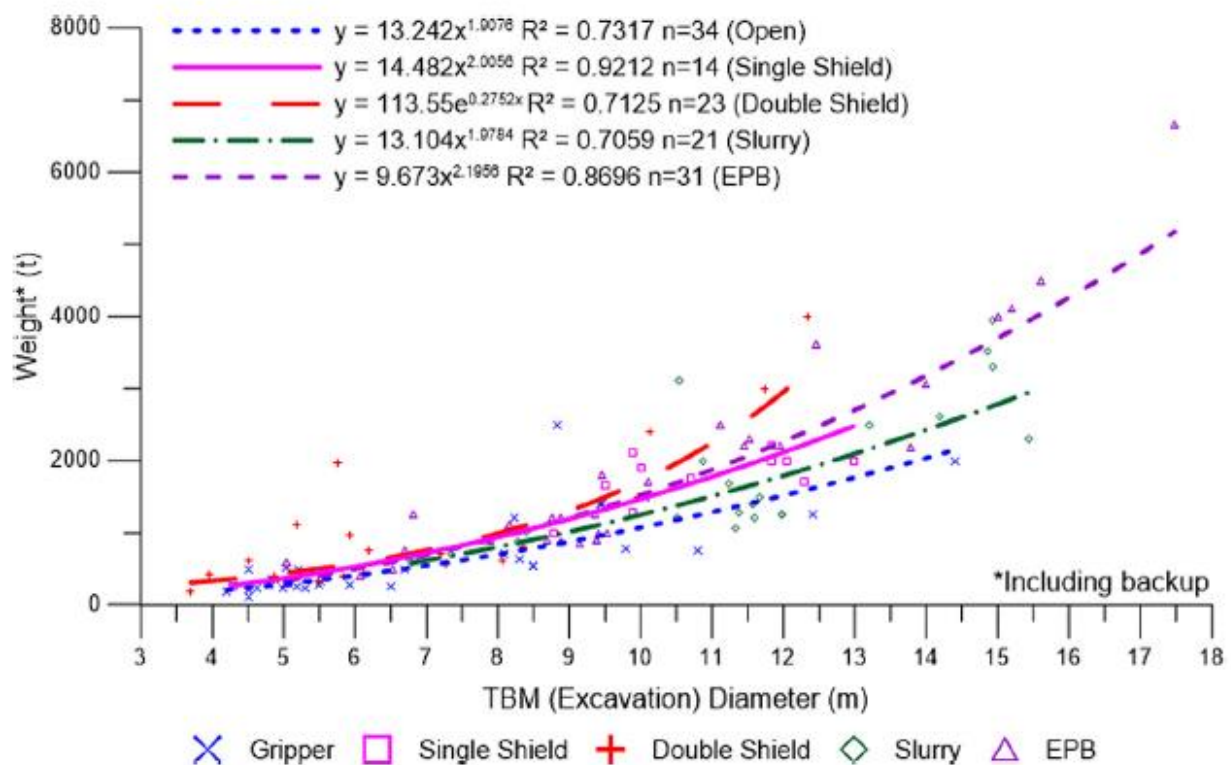


Figura 2.12: Correlazione tra il diametro della TBM e il peso della macchina (Ates et Al.,2014)

Analizzando il grafico in figura 2.13 si osserva una dipendenza lineare tra il diametro della TBM e il numero di utensili installati. In particolare, nel caso delle TBM aperte, a singolo scudo e a doppio scudo, il numero degli utensili collocati sulla testa fresante è praticamente uguale a pari diametro. Nel caso delle EPB, invece, il numero di utensili a parità di diametro è diverso rispetto alle TBM da roccia.

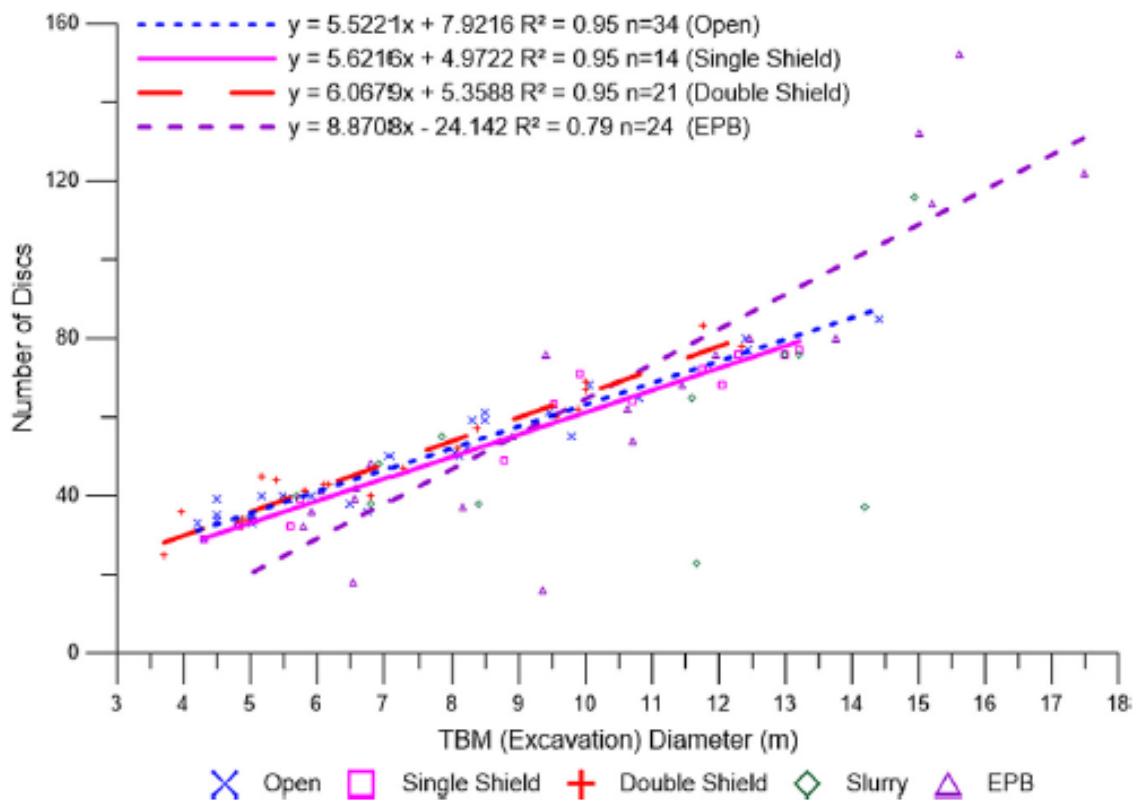


Figura 2.13: Correlazione tra il diametro della TBM e il numero di utensili (Ates et Al.,2014)

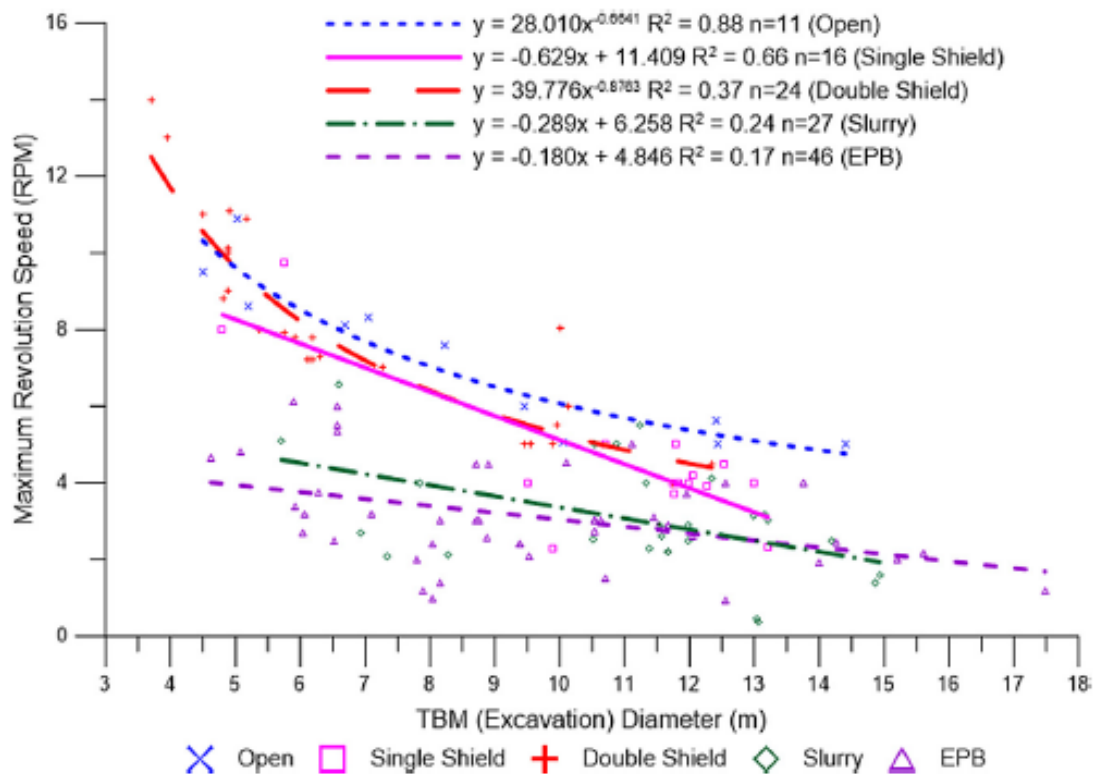


Figura 2.14: Correlazione tra il diametro della TBM e la velocità di rotazione della testa fresante (Ates et Al.,2014)

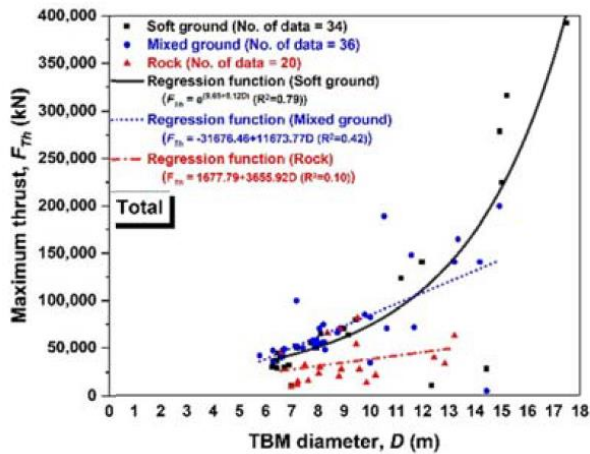
In figura 2.14 si riporta la correlazione tra il diametro della TBM e la velocità di rotazione della testa fresante (RPM); solo nel caso delle TBM aperte essa risulta elevata e l'equazione di regressione ha un andamento esponenziale negativo. Le macchine di scavo hanno una velocità di rotazione maggiore in roccia che nel terreno, principalmente per piccoli diametri. Si osserva anche che le macchine a doppio scudo presentano una velocità di rotazione maggiore delle frese a singolo scudo, a parità di diametro. Ciò è dovuto principalmente al fatto che in questo studio i dati a disposizione sono pochi. In conclusione, dall'analisi statistica condotta dagli autori, si evince che le correlazioni tra i parametri considerati sono in alcuni casi elevate, in altri moderate e in altri ancora deboli. In quest'ultimo caso, le cause principali sono la forte dipendenza delle grandezze dalle caratteristiche geotecniche e geologiche e/o la scarsità di dati a disposizione. In generale si ricavano delle equazioni di previsione, per tutte le tipologie di macchine analizzate, che possono essere utilizzate in fase preliminare ai fini della scelta della fresa più idonea. Tali modelli sono stati validati servendosi di una serie di dati appartenenti a 30 diversi progetti realizzati con TBM in Turchia, in diversi contesti geologici.

2.2.2 Caso studio II

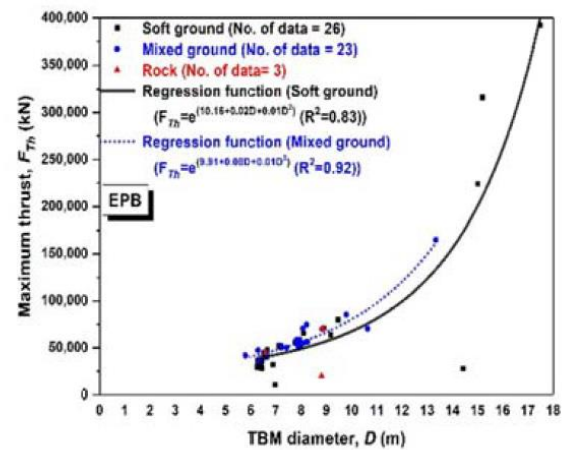
Sulla stessa linea della precedente ricerca, Park et Al. (2018) hanno condotto uno studio il cui scopo principale è stato quello di valutare le correlazioni tra il diametro della TBM e i parametri di progetto (spinta, momento torcente, potenza, velocità di rotazione) nella ricerca di equazioni di previsione, per diverse tipologie di frese a piena sezione e in differenti condizioni geologiche. A tal scopo è stato analizzato un data base contenente 270 dati di TBM, con diametro maggiore di 6 m, utilizzate per realizzare progetti di gallerie in più parti del mondo.

Per l'analisi di regressione, non è stato effettuato alcun fitting dei dati nel caso in cui i dati a disposizione erano minori di 10.

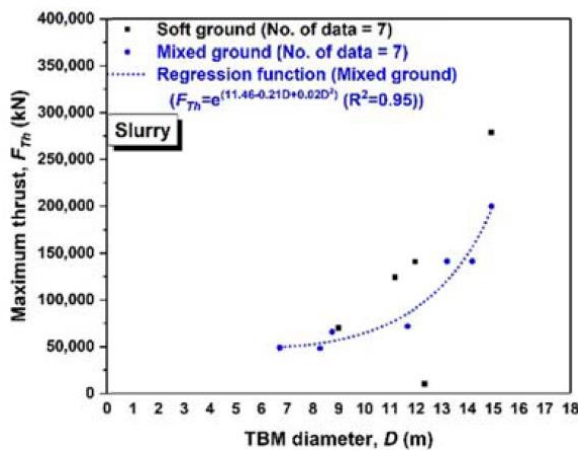
Sono state considerate, inoltre, tre diverse condizioni geologiche: soft ground, mixed ground e roccia. Per ciò che concerne la correlazione tra diametro e spinta, sono stati analizzati 90 dati. Le macchine aperte e quelle a singolo scudo non compaiono nell'analisi per mancanza di dati. Dai risultati si evince un forte legame tra diametro e spinta, principalmente per soft ground. Nelle EPB, sia per soft ground sia per mixed ground, l'equazione di regressione è di tipo esponenziale. Si evidenzia anche una buona correlazione tra i parametri in esame, nel caso di macchine a doppio scudo. I risultati sono riportati in figura 2.15.



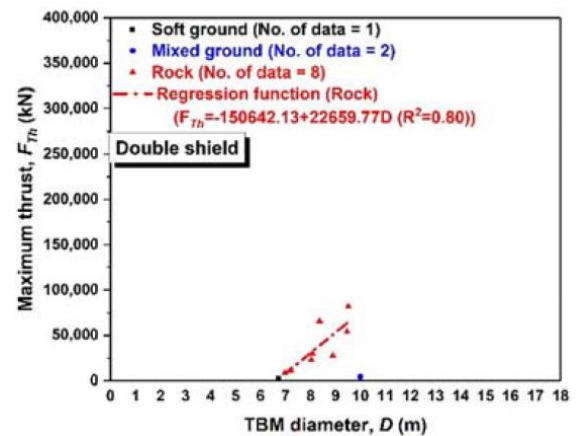
(a) Total



(b) EPB



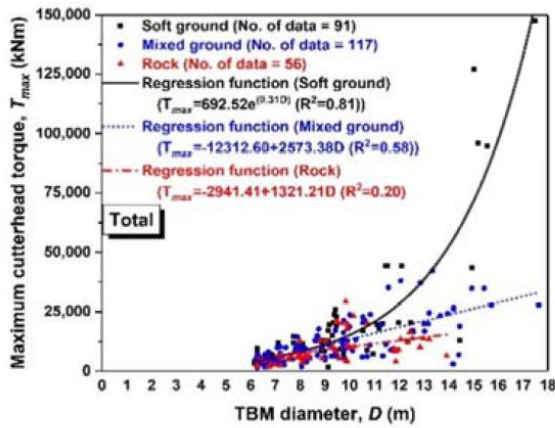
(c) Slurry



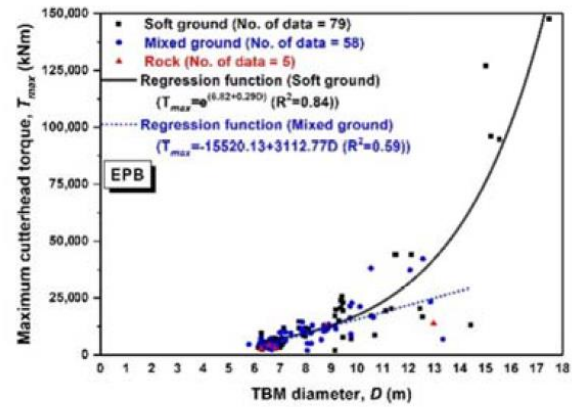
(d) Double shield

Figure 2.15: Correlazione tra diametro della TBM e spinta (Park et Al.,2018)

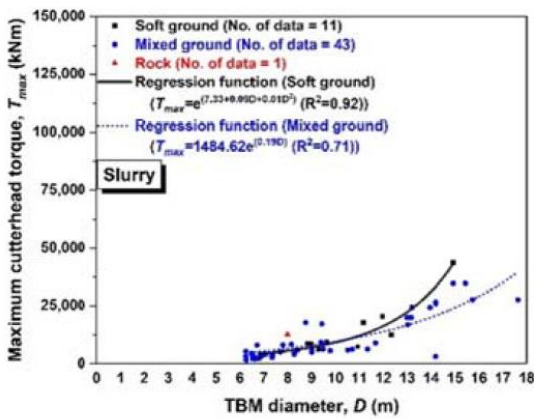
Per quanto riguarda la coppia, questo risulta essere uno dei parametri più importanti per la valutazione delle performance di scavo. Come già detto, l'intera banca dati contiene 270 progetti realizzati nel mondo e il 98% di questi contiene il dato relativo alla coppia. Si evidenziano delle buone correlazioni, come nel caso delle EPB e delle slurry TBM in soft ground, dove la funzione di regressione è un esponenziale. L'indice R^2 è pari a 0,92 per le slurry TBM e 0,84 per le EPB. Si individua un andamento di tipo lineare con R^2 pari a 0,81, nel caso delle TBM aperte mentre non si trova alcun legame tra diametro e momento torcente nel caso delle macchine a doppio scudo. In figura 2.16 si riportano i grafici delle correlazioni tra diametro e momento torcente per le diverse tipologie di macchine.



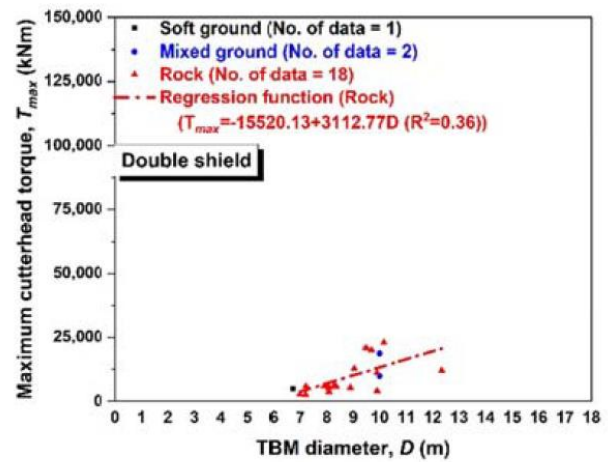
(a) Total



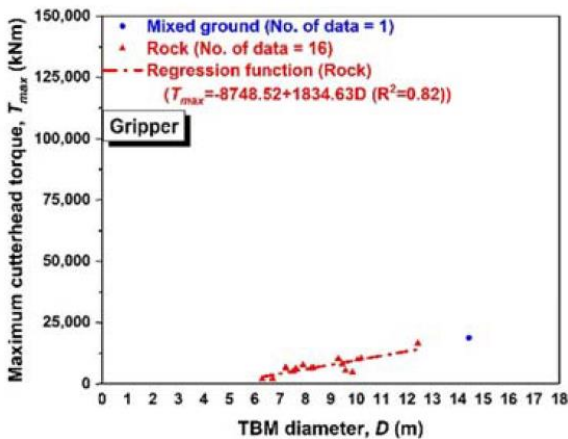
(b) EPB



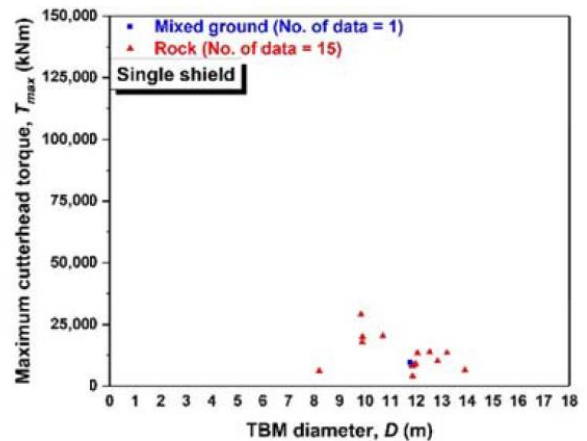
(c) Slurry



(d) Double shield



(e) Gripper



(f) Single shield

Figure 2.16: Correlazione tra diametro della TBM e coppia (Park et Al.,2018)

Come si osserva in figura 2.17, al crescere del diametro diminuisce la velocità di rotazione della testa e viceversa. Tale analisi ha prodotto però ben pochi risultati, in quanto solo nel caso delle EPB il

numero di dati disponibili era adeguato. Anche nel caso delle EPB, tuttavia, non sono state riscontrate correlazioni apprezzabili.

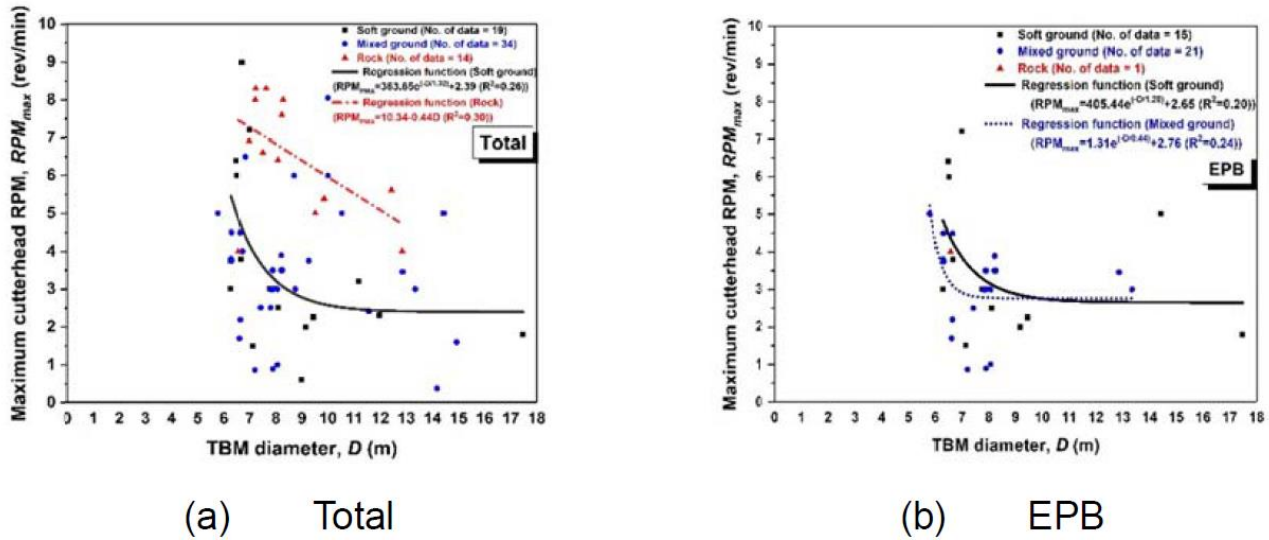
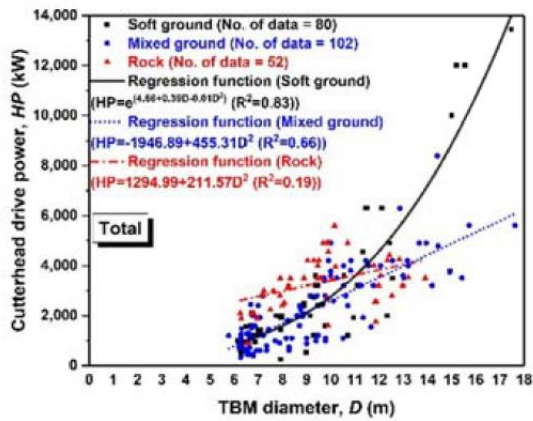


Figura 2.17: Correlazione tra il diametro della TBM e la velocità di rotazione della testa fresante (Park et Al.,2018)

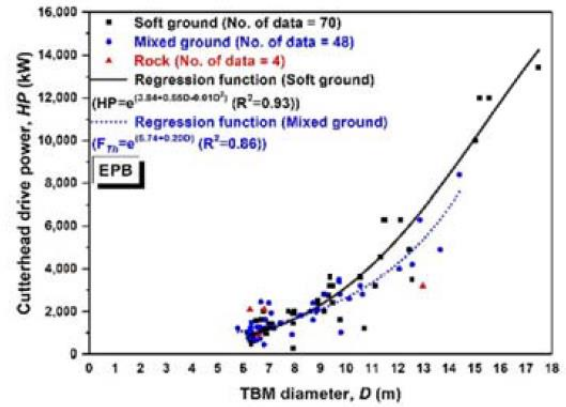
Notevoli correlazioni si osservano tra il diametro della TBM e la potenza installata, ad eccezione delle macchine a singolo scudo (Figura 2.18). Per quanto riguarda le EPB TBM, la funzione di regressione è esponenziale sia in soft ground sia in mixed ground. Nelle macchine aperte e a doppio scudo, operanti in roccia, l'andamento dell'equazione di regressione è lineare. L'indice R^2 è in entrambi i casi pari a 0,6.

Le conclusioni di tale ricerca sono state sintetizzate in 3 punti:

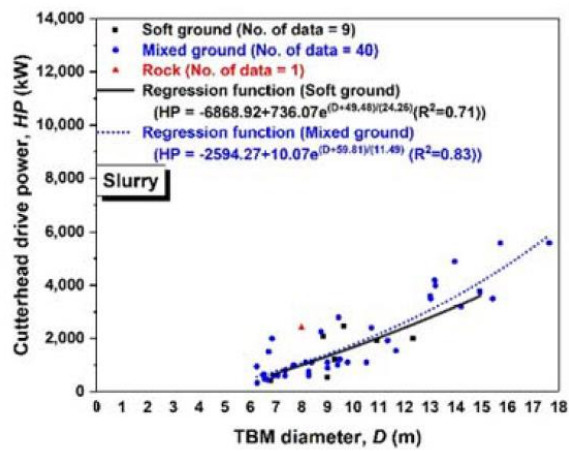
1. è possibile stimare in prima approssimazione i parametri principali di una TBM, che dovrà operare in uno specifico contesto, noti il diametro della macchina e le caratteristiche geologiche dell'ammasso da attraversare (soft ground, mixed ground, rock). A tal proposito, sono abbastanza affidabili le equazioni di previsione trovate per le EPB TBM in soft e mixed ground;
2. nel caso delle TBM da roccia, specialmente per macchine a singolo e a doppio scudo, è necessario raccogliere un maggior numero di dati;
3. è possibile stimare con buona approssimazione la potenza da fornire alla TBM, utilizzando equazioni di previsione dipendenti dal diametro. Lo stesso ragionamento, per ciò che si evince dallo studio, non può essere fatto per valutare la velocità di rotazione della testa fresante. È in tal caso necessario coinvolgere altri parametri geologici e geotecnici nel modello o rendere più robusta la mole di dati a disposizione.



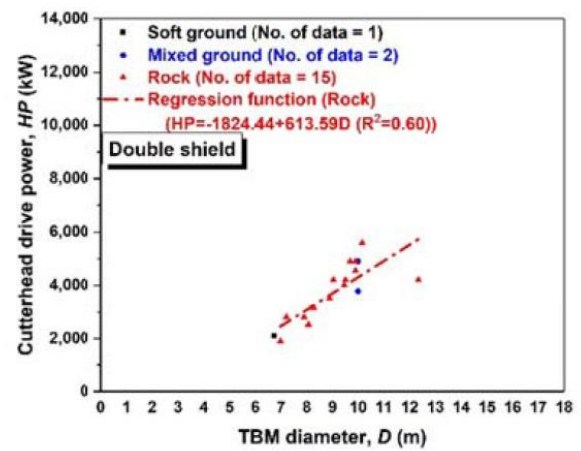
(a) Total



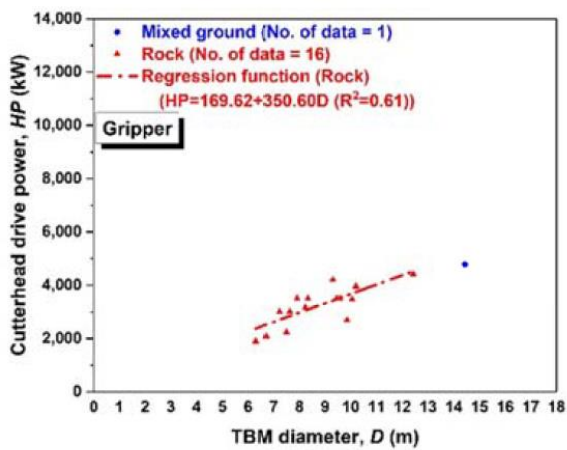
(b) EPB



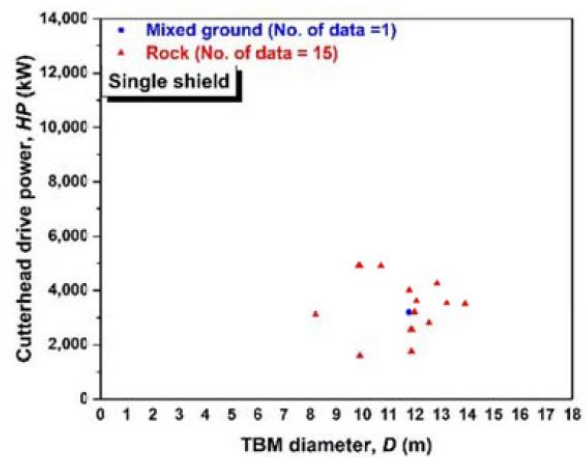
(c) Slurry



(d) Double shield



(e) Gripper



(f) Single shield

Figura 2.18: Correlazione tra diametro della TBM e potenza installata (Park et Al.,2018)

CAPITOLO 3

Analisi sperimentale

Lo scopo principale dell'analisi sperimentale svolta è quello di individuare e valutare le correlazioni esistenti tra i parametri meccanici delle frese a piena sezione in roccia e gli eventuali legami tra essi e la velocità di avanzamento, anche in funzione delle caratteristiche geologiche dell'ammasso roccioso. Per tale finalità, è stata condotta una ricerca bibliografica volta alla costruzione di una robusta banca dati da analizzare statisticamente. Il database, che include le informazioni di 302 gallerie scavate in roccia con TBM (aperte, a singolo scudo e a doppio scudo), aventi una lunghezza totale di 2200 km, è stato organizzato utilizzando un foglio di calcolo in Microsoft Excel. Quest'ultimo è stato strutturato assegnando ad ogni galleria, in funzione dei dati trovati in letteratura, le seguenti informazioni:

- nome del progetto;
- Paese in cui il progetto è stato realizzato;
- appaltatore dell'opera;
- finalità;
- geologia;
- materiale di copertura;
- RMR e UCS;
- diametro di scavo;
- lunghezza;
- periodo di realizzazione;
- velocità di avanzamento;
- produttore della fresa;
- tipologia di fresa;
- numero di utensili sulla testa di scavo;
- dimensione degli utensili (in pollici);
- potenza installata;
- spinta;
- velocità di rotazione della testa;
- coppia.

Prima di descrivere le modalità di ricerca delle informazioni necessarie ai fini dell'elaborazione statistica, bisogna premettere che soltanto in un numero limitato di casi sono state trovate tutte le

informazioni ricercate; della maggior parte delle gallerie, quindi, si dispone solo di alcuni dei dati investigati.

La ricerca bibliografica è stata condotta in una prima fase sui siti web di alcuni produttori di TBM (Herrenknecht, Robbins), i quali hanno reso disponibili alcune informazioni relative a progetti realizzati in passato. In una seconda fase sono stati consultati libri, riviste e articoli scientifici che hanno consentito di aggiungere nuovi progetti di gallerie alla banca dati e completare il più possibile le informazioni reperite sui siti web. Oltre alle informazioni generali sulle gallerie realizzate (nome del progetto, appaltatore, lunghezza della galleria), sono stati trovati, con buona frequenza, i dati riguardanti le caratteristiche meccaniche delle TBM (diametro della testa fresante, potenza, spinta, coppia, velocità di rotazione ecc.).

Per ciò che concerne le caratteristiche geologiche delle formazioni rocciose attraversate durante lo scavo, sono state recuperate solo descrizioni quantitative e quasi nessun parametro caratterizzante l'ammasso roccioso dal punto di vista geomeccanico; ciò ha limitato in parte il lavoro, non permettendo di analizzare le eventuali correlazioni tra i diversi parametri meccanici e tra questi ultimi e la velocità di avanzamento, tenendo anche conto dello stato di fratturazione dell'ammasso roccioso. Inoltre, soltanto in pochissimi casi è stata reperita la velocità di avanzamento media in quanto, il più delle volte, i produttori di TBM forniscono solamente le velocità di picco registrate durante lo scavo. A tal proposito, per poter analizzare le correlazioni, non disponendo del coefficiente di utilizzazione, è stata calcolata la velocità di avanzamento come rapporto tra la lunghezza della galleria e il tempo di realizzazione. Ovviamente il dato trovato contiene tutti i tempi morti legati ad eventuali fermi della macchina dovuti alla sostituzione degli utensili e/o alla diversa organizzazione dei turni di lavoro.

Una volta che il database è stato completato il più dettagliatamente possibile, è stata effettuata l'analisi statistica dei dati, utilizzando il software Microsoft Excel. In un primo momento sono state analizzate le seguenti correlazioni tra i diversi parametri meccanici delle TBM, suddivise per tipologia di macchina (aperta, a singolo scudo, a doppio scudo):

- diametro – potenza;
- diametro – spinta;
- diametro – coppia;
- diametro – velocità di rotazione della testa fresante;
- spinta – coppia;
- potenza – coppia;
- potenza – spinta.

Per ciascuna delle coppie di parametri, una volta riscontrati possibili legami, sono state valutate diverse funzioni di regressione ed è stata scelta quella che restituiva il valore più elevato del parametro R^2 .

In seguito, sono state ricercate delle equazioni di correlazione che tenessero in considerazione l'aspetto geologico, seppur non dettagliatamente, a causa della mancanza di parametri geomeccanici. In tale contesto sono stati applicati una serie di filtri ai dati e sono state analizzate, per ogni tipologia di macchina, le formazioni rocciose contenenti granito, gneiss, arenaria, calcare e roccia scistosa. Il trattamento statistico dei dati è stato effettuato per tale finalità nello stesso modo dei casi precedenti, considerando però valide solo le correlazioni in cui il numero di dati analizzati era maggiore di 10. Infine, nell'ultima fase dello studio, sono stati ricercati eventuali legami tra i parametri meccanici delle TBM e la velocità di avanzamento, in funzione della tipologia di roccia e di fresa. In questo caso, tuttavia, non sono stati ottenuti risultati significativi, a causa della carenza di informazioni di carattere geologico e geo - meccanico. Lo stato di fratturazione di una formazione geologica, infatti, influisce molto sulla velocità di avanzamento delle TBM.

3.1 Analisi delle correlazioni tra i parametri meccanici delle TBM

3.1.1 Analisi delle correlazioni per tipologia di fresa

TBM aperta

Nel caso di frese a piena sezione aperte è stata analizzata, innanzitutto, la correlazione esistente tra il diametro e la potenza fornita alla testa fresante (Figura 3.1). Il numero di dati processati è pari a 72. L'andamento individuato è di tipo lineare, per cui la potenza aumenta all'aumentare del diametro, con un coefficiente R^2 pari a 0,663. Dal grafico in figura 3.1 si nota che, a pari diametro, i valori di potenza variano in un intervallo più o meno esteso: ciò è dovuto all'impiego di macchine che, a pari diametro, operano in ammassi rocciosi con caratteristiche differenti.

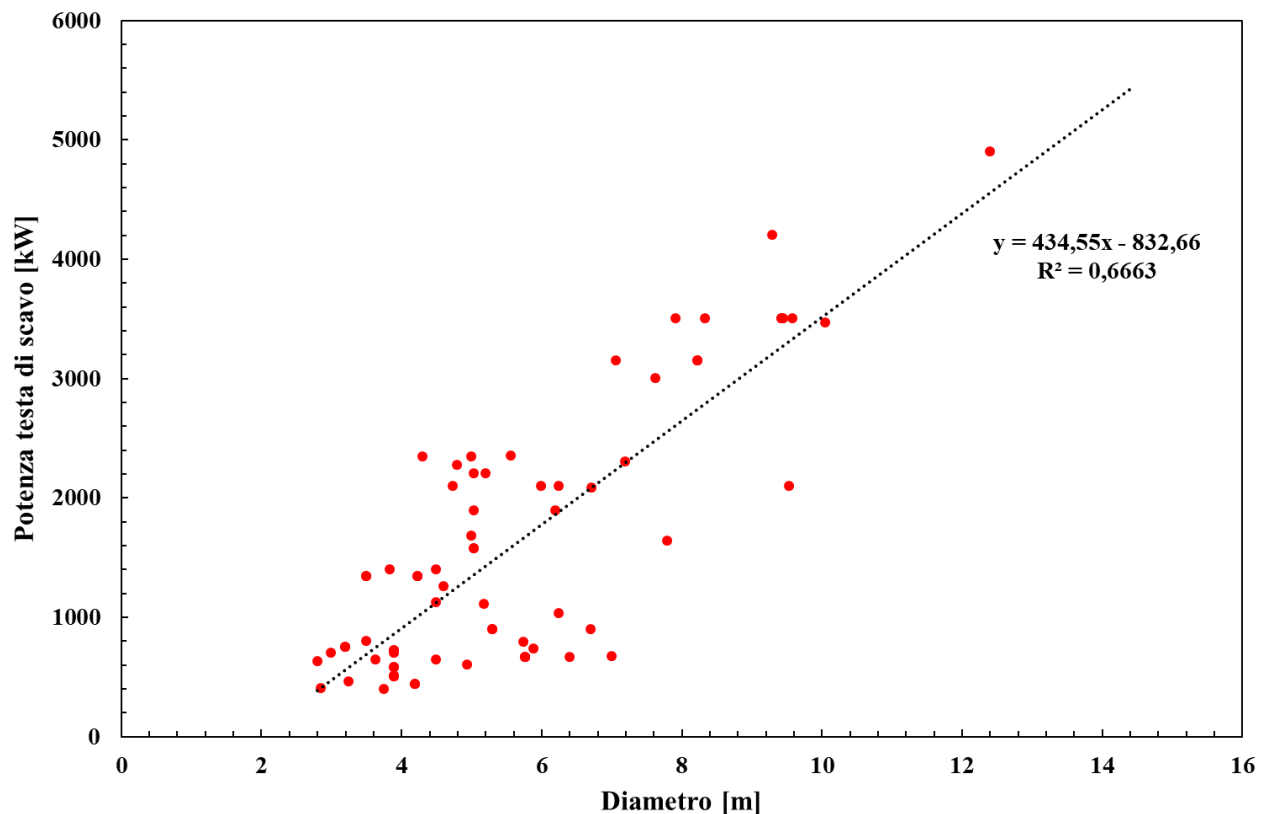


Figura 3.1: Correlazione tra il diametro e la potenza fornita alla testa di scavo (TBM aperta)

Si evidenzia, inoltre, un forte legame tra il diametro e la coppia (Figura 3.2). In questo caso i dati analizzati sono 53 e la funzione di regressione è ancora una volta lineare.

Si individua poi, un accenno di correlazione espresso da un andamento di tipo logaritmico tra il diametro e la spinta (Figura 3.3), caratterizzato da R^2 uguale a 0,6417. In generale, questi due parametri meccanici sono poco correlati, in quanto la spinta dipende solamente in parte dal diametro della macchina e prevalentemente dalle caratteristiche geomeccaniche della roccia.

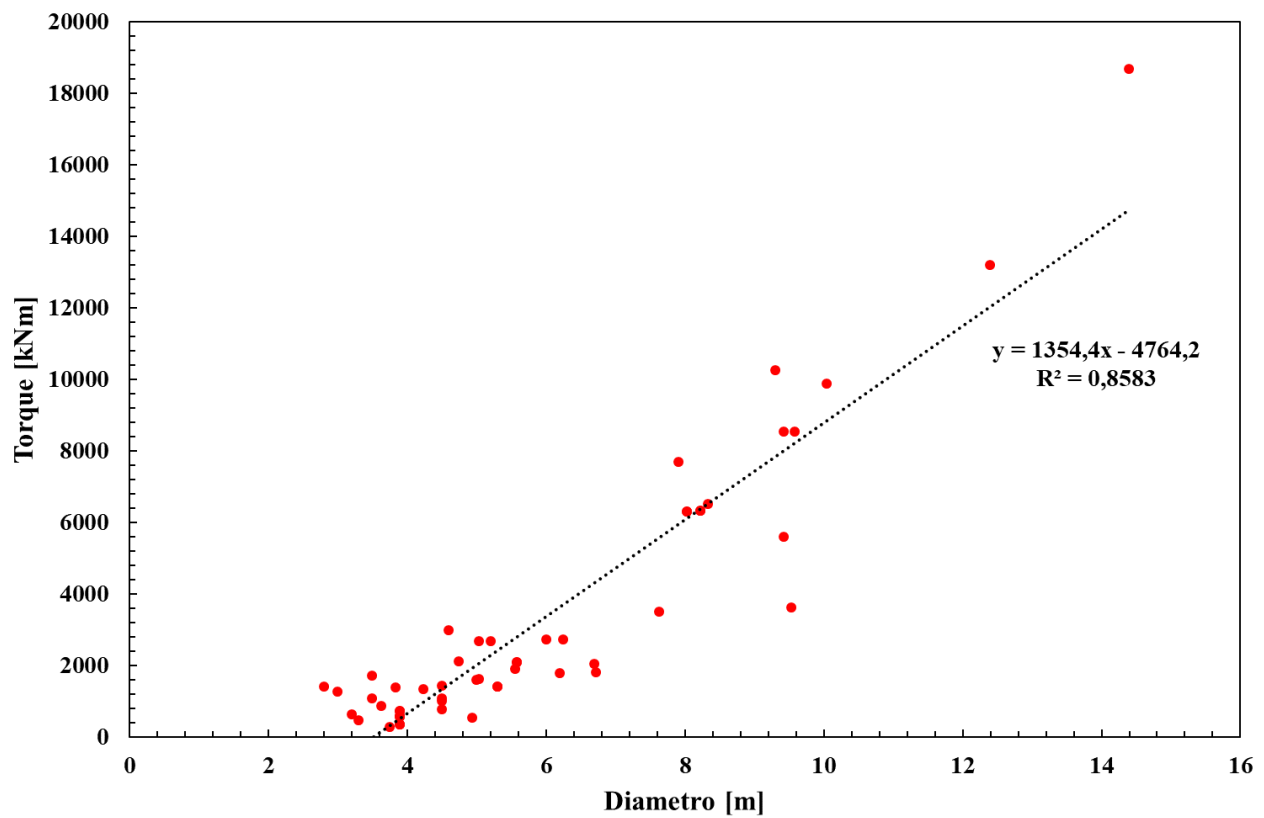


Figura 3.2: Correlazione tra il diametro e la coppia (TBM aperta)

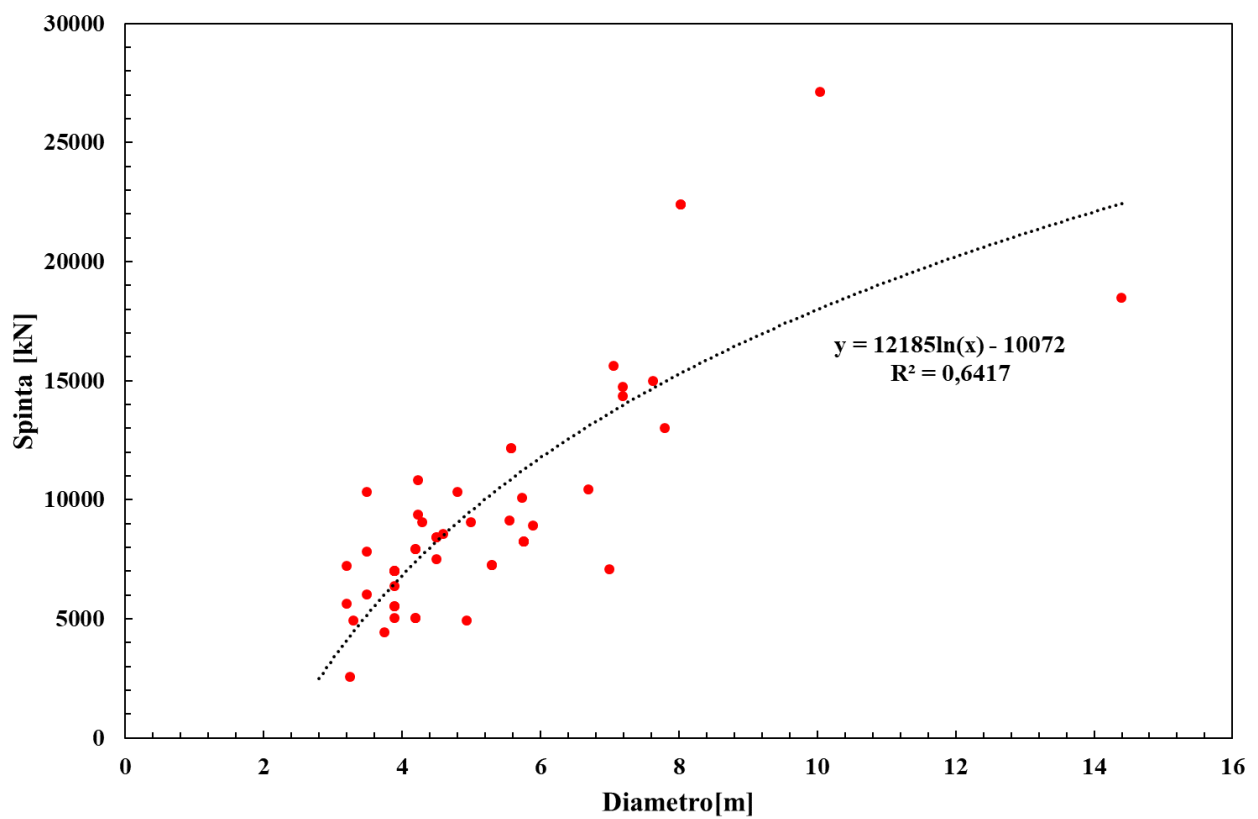


Figura 3.3: Correlazione tra il diametro e la spinta (TBM aperta)

La spinta e la coppia sono legati da una relazione descritta da una funzione di potenza in cui il coefficiente R^2 è alto ed uguale a 0,8682 (Figura 3.4). L'intervallo dei valori di spinta analizzati varia tra 4 e 28 MN, mentre i valori della coppia ricadono nell'intervallo tra 0 e 10 MNm. Analizzando la figura 3.4, si osservano una serie di dati sperimentali concentrati in valori di spinta compresi tra 4 e 13 MN, i quali si distribuiscono molto bene, con uno scarto piccolissimo lungo la funzione di regressione. Per ottenere un modello più robusto e preciso sarebbe stato probabilmente necessario disporre di più punti sperimentali per valori di spinta maggiori di 13 MN.

Si rileva, inoltre, una forte correlazione tra la potenza fornita alla testa di scavo e la coppia (Figura 3.5). La relazione è anche in questo caso espressa da una funzione di potenza. Il numero di dati analizzati è pari a 44 e l'indice R^2 è uguale a 0,8809.

Infine, sono stati studiati i legami tra la potenza fornita alla testa di scavo e la spinta (Figura 3.6) e tra il diametro e la velocità di rotazione della testa fresante (Figura 3.7). Nel grafico di figura 3.6 si riporta la correlazione tra la potenza fornita alla testa di scavo e la coppia, espressa da una funzione di potenza, in cui R^2 è pari a 0,6805. Ancora, osservando la figura 3.7, si nota che il diametro e la velocità di rotazione della testa di scavo sono legati da una funzione di potenza con esponente negativo. Al crescere del diametro della macchina decresce la velocità di rotazione della testa, e viceversa.

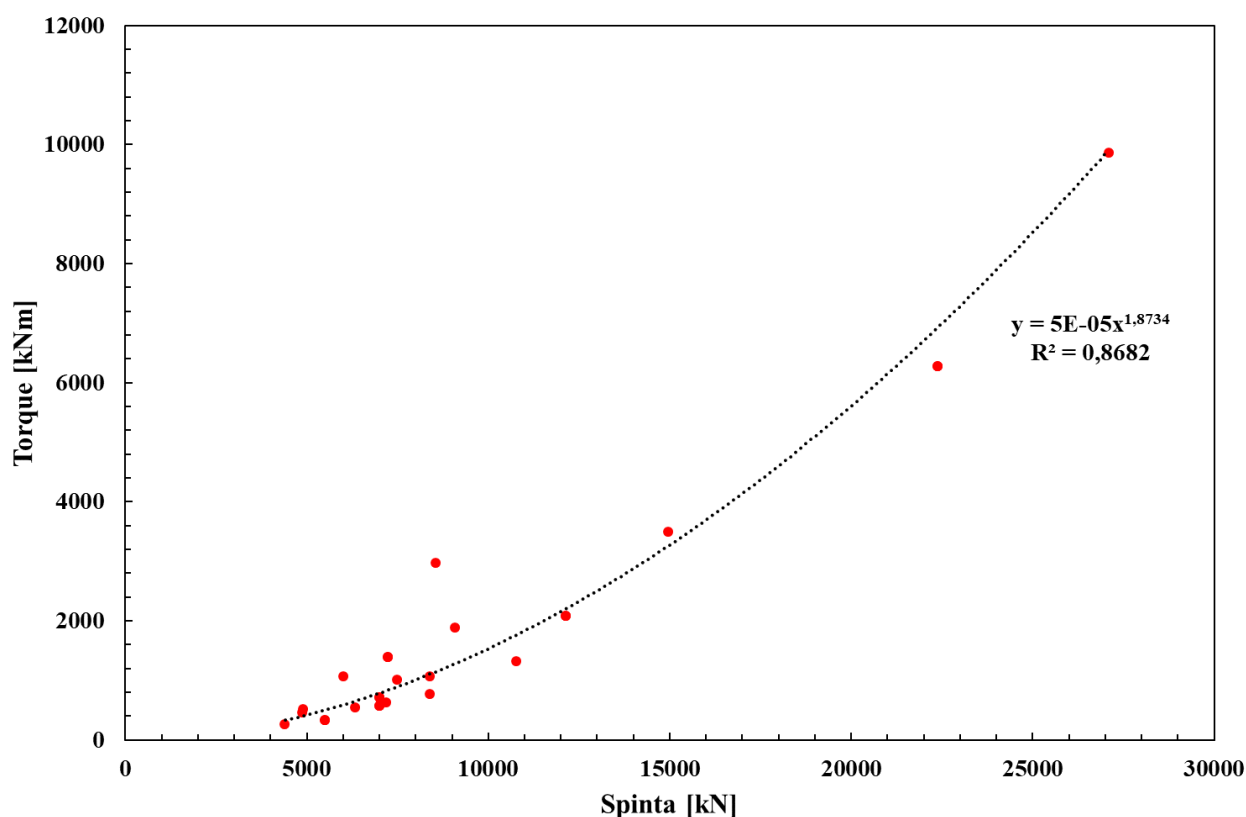


Figura 3.4: Correlazione tra la spinta e la coppia (TBM aperta)

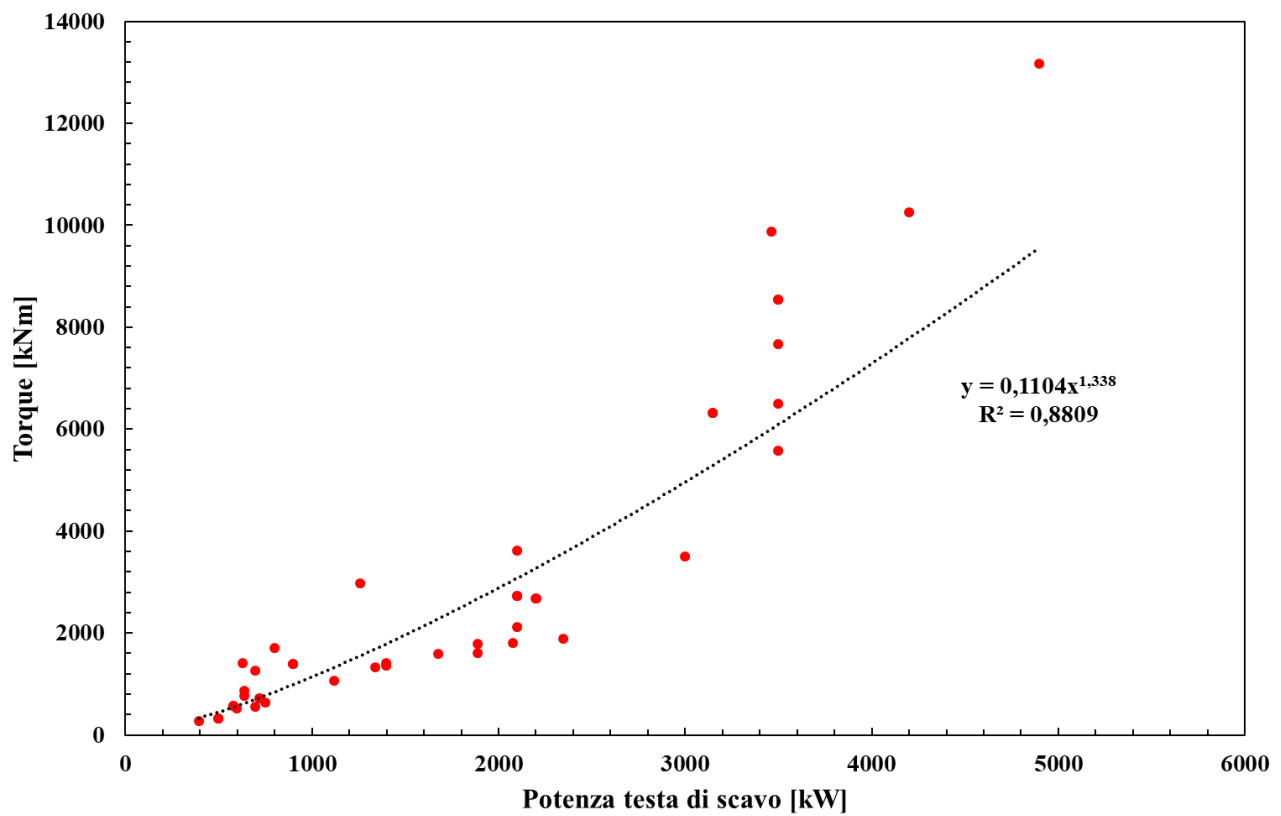


Figura 3.5: Correlazione tra la potenza fornita alla testa di scavo e la coppia (TBM aperta)

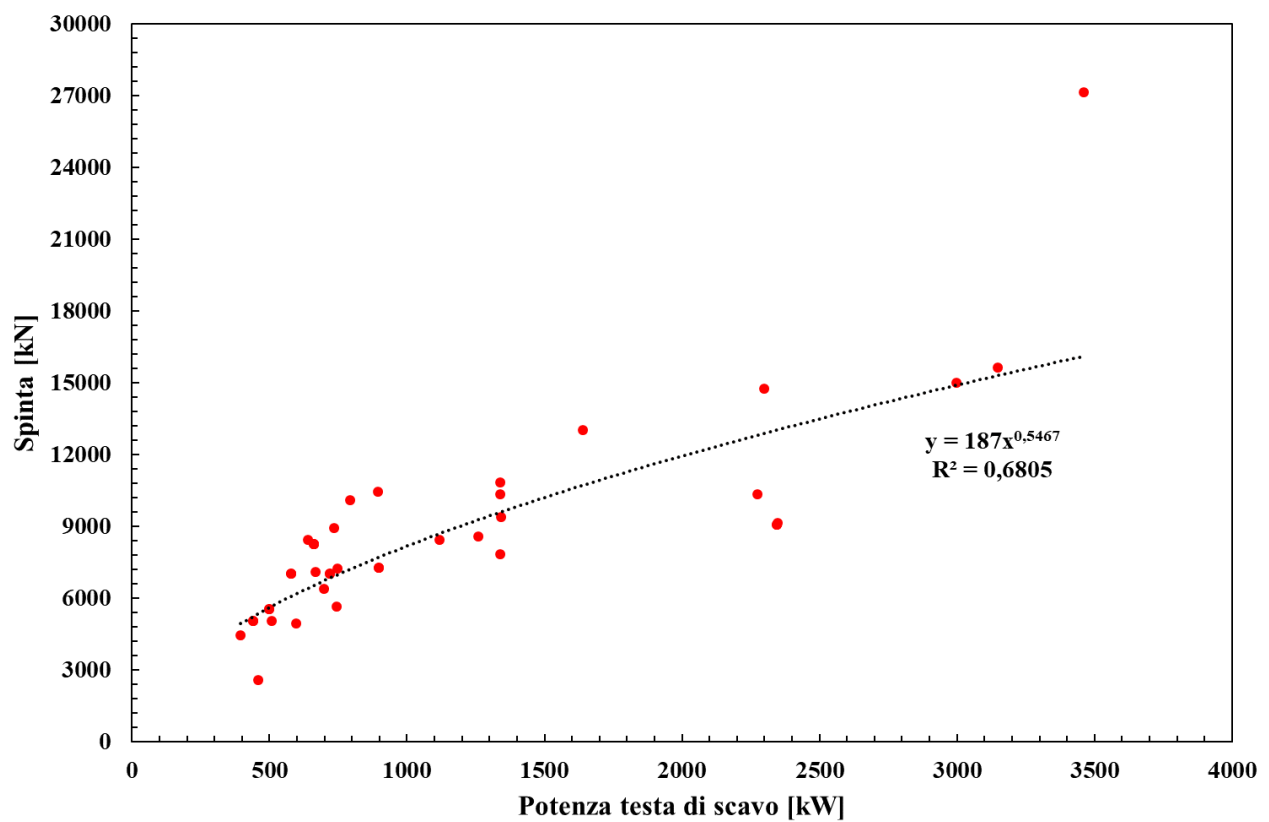


Figura 3.6: Correlazione tra la potenza fornita alla testa di scavo e la spinta (TBM aperta)

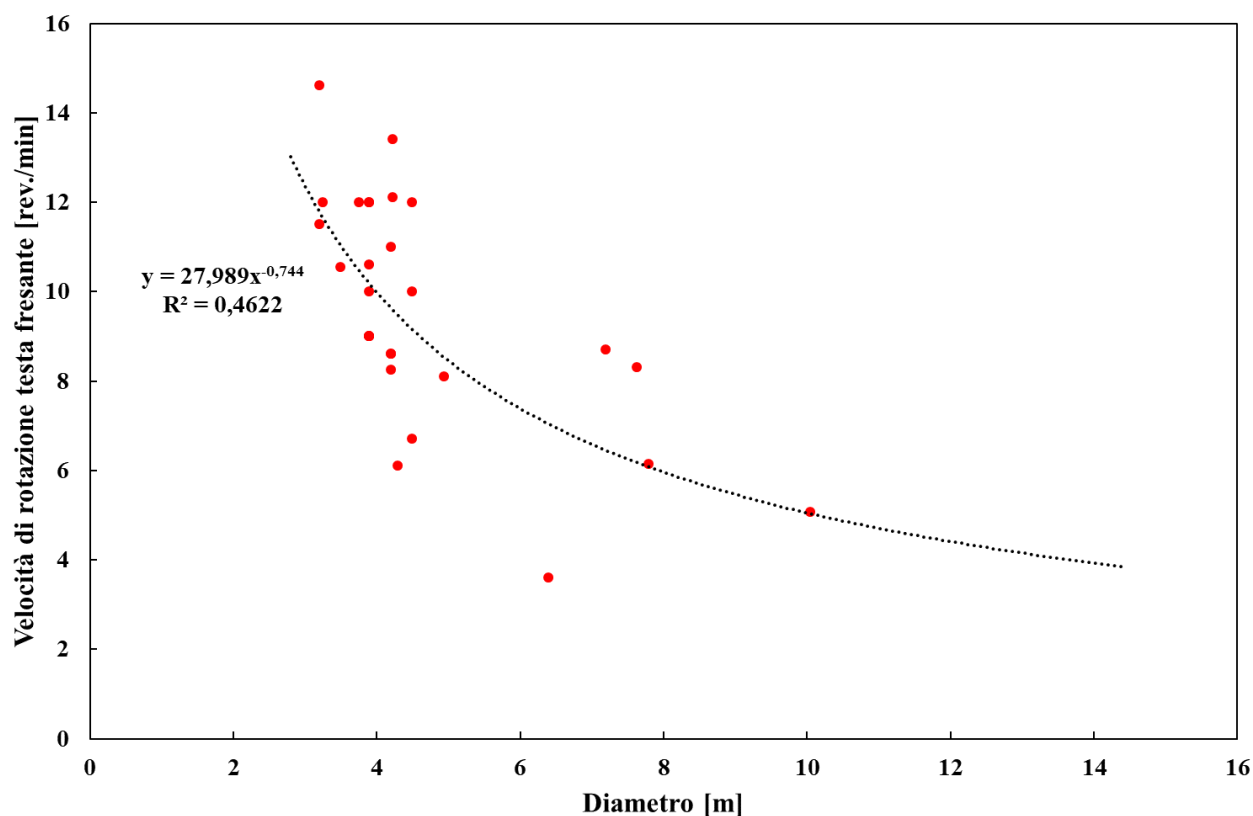


Figura 3.7: Correlazione tra il diametro e la velocità di rotazione della testa (TBM aperta)

TBM a singolo scudo

Anche per questa tipologia di macchine sono state analizzate le relazioni tra le coppie di parametri del caso precedente; non è stato però possibile individuare un modello che correlasse la potenza fornita alla testa fresante e la spinta, a causa del limitato numero di dati a disposizione, minore di 10. Analogamente alle TBM aperte si trovano delle buone correlazioni tra i parametri della macchina, ad esclusione del caso diametro – spinta.

Si riporta in figura 3.8 l'andamento della potenza fornita alla testa di scavo in funzione del diametro. Il modello analizzato è di potenza ed è stato costruito utilizzando 89 dati sperimentali. Il parametro R^2 risulta pari a 0,7833. Osservando il grafico in figura 3.8, si nota che la potenza fornita alla testa di scavo aumenta all'aumentare del diametro della macchina.

Nell'analisi del legame esistente tra il diametro e la coppia (Figura 3.9) sono stati trattati statisticamente 84 dati ed è stata individuata una funzione di regressione di potenza con R^2 pari a 0,7934. Si osserva, in particolare, che l'intervallo di variazione della coppia aumenta all'aumentare del diametro.

Infine, si evidenzia che le macchine con diametro maggiore sono state impiegate nello scavo di gallerie in materiali con caratteristiche anche molto differenti, per cui l'intervallo di variazione che si

osserva al crescere del diametro, in figura 3.8 e in figura 3.9, è maggiore di quello che si osserva nei diametri minori.

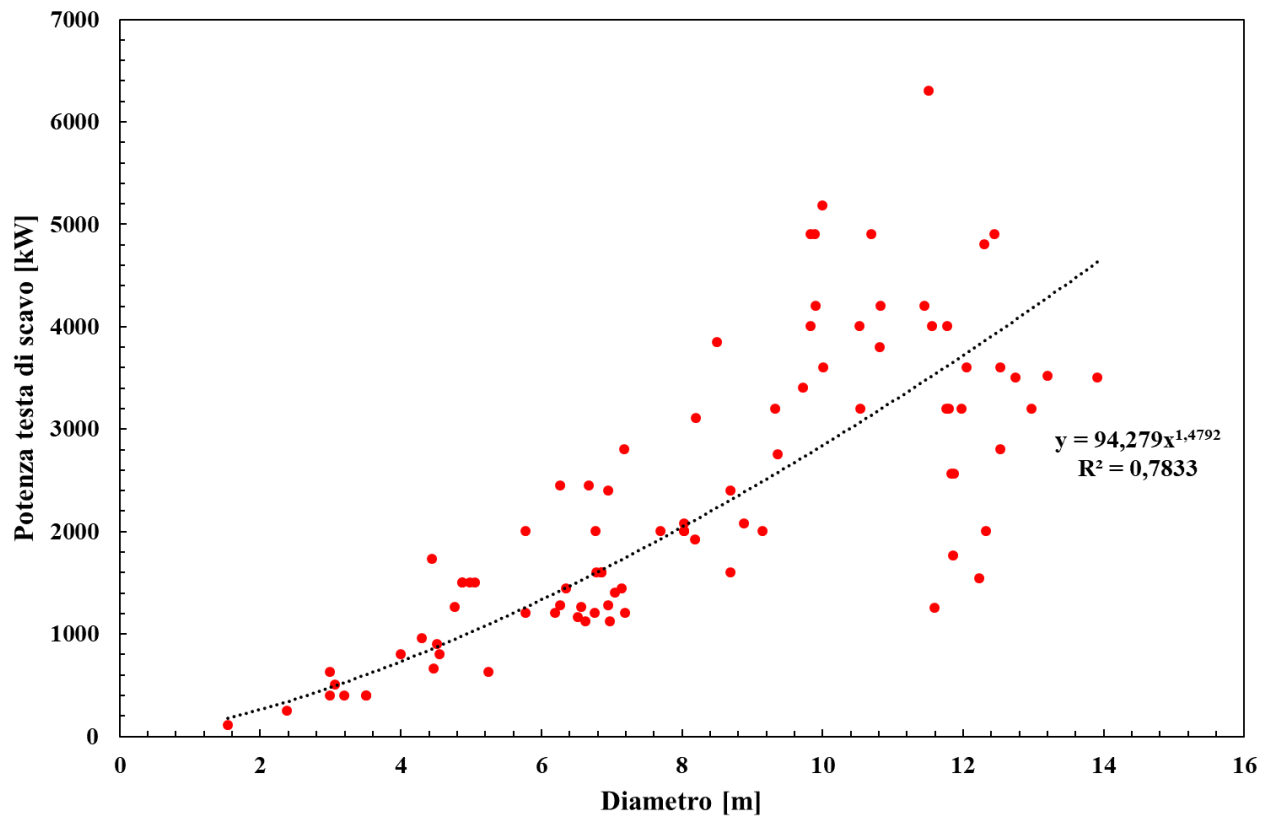


Figura 3.8: Correlazione tra il diametro e la potenza fornita alla testa di scavo (TBM monoscudata)

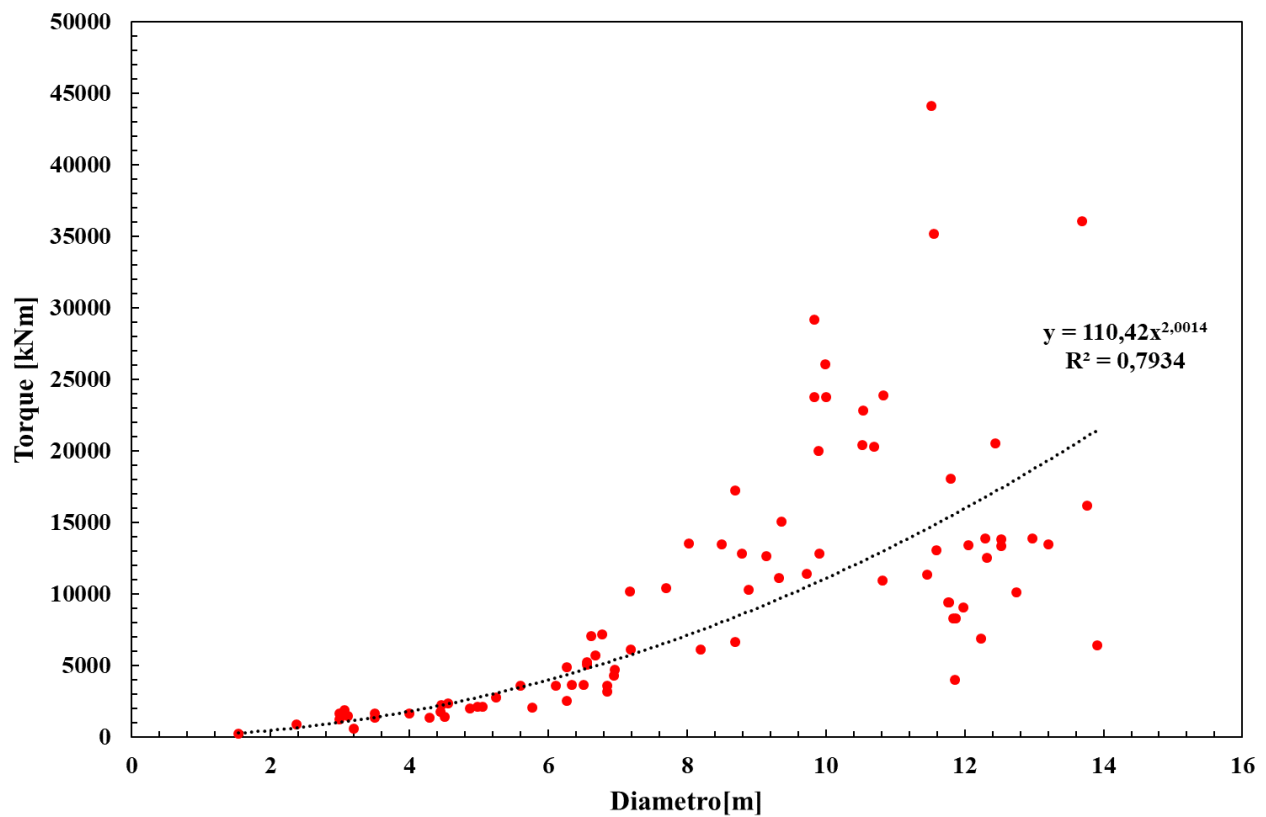


Figura 3.9: Correlazione tra il diametro e la coppia (TBM monoscudata)

Il diametro e la spinta sono invece poco correlati ($R^2 < 0,5$). I risultati sono riportati in figura 3.10.

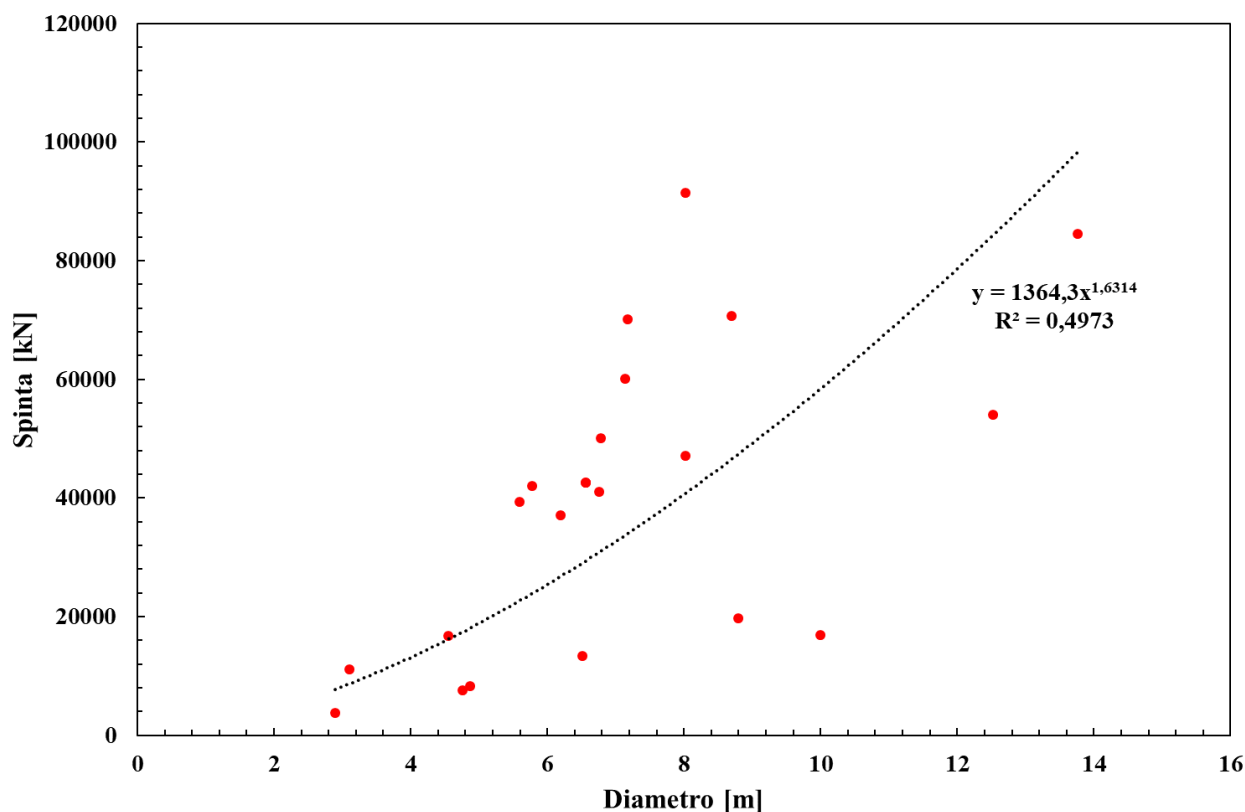


Figura 3.10: Correlazione tra il diametro e la spinta (TBM monoscudata)

Nello studio della correlazione esistente tra la coppia di parametri spinta – coppia (Figura 3.11), il fitting dei dati è stato realizzato con una funzione lineare. In questo caso l'indice R^2 è poco maggiore di 0,5, in quanto i dati disponibili erano limitati a 14 casi.

Il legame tra la potenza fornita alla testa di scavo e la coppia è invece esprimibile mediante una funzione di regressione di potenza (Figura 3.12): in linea con quanto atteso, si riscontra un forte legame, espresso da un coefficiente di determinazione pari a 0,7936. Il modello approssima molto bene i dati sperimentali, soprattutto sino a potenze di 2000 kW. Per valori maggiori, aumenta in parte la dispersione e cresce l'intervallo di variazione del momento torcente.

Infine, è stato studiato l'andamento della velocità di rotazione della testa fresante in funzione del diametro (Figura 3.13). Anche in questo caso, come per le TBM aperte, l'equazione che esprime il legame tra le due grandezze è una potenza con esponente negativo: all'aumentare del diametro diminuisce la velocità di rotazione della testa di scavo e viceversa. Il coefficiente R^2 è pari a 0,5885, valore piuttosto basso, a conferma di una limitata mole di dati disponibile.

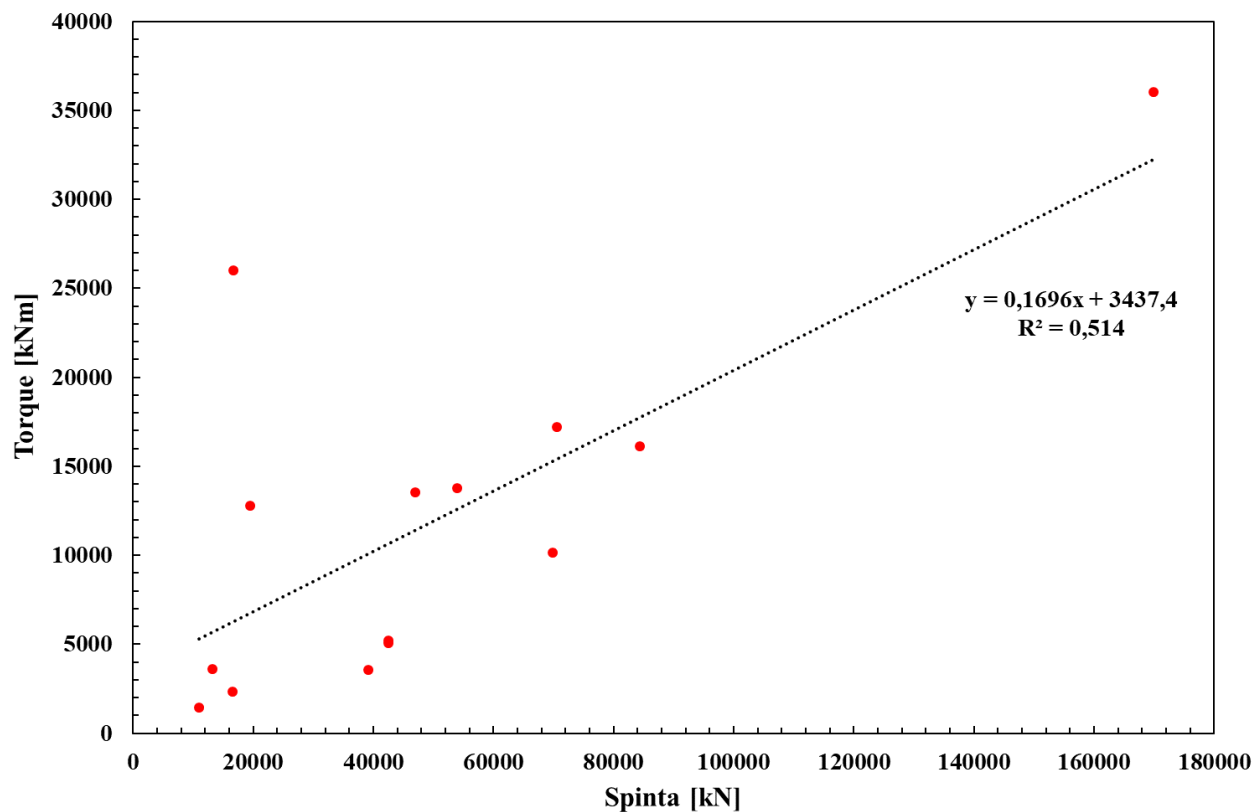


Figura 3.11: Correlazione tra la spinta e la coppia (TBM monoscudata)

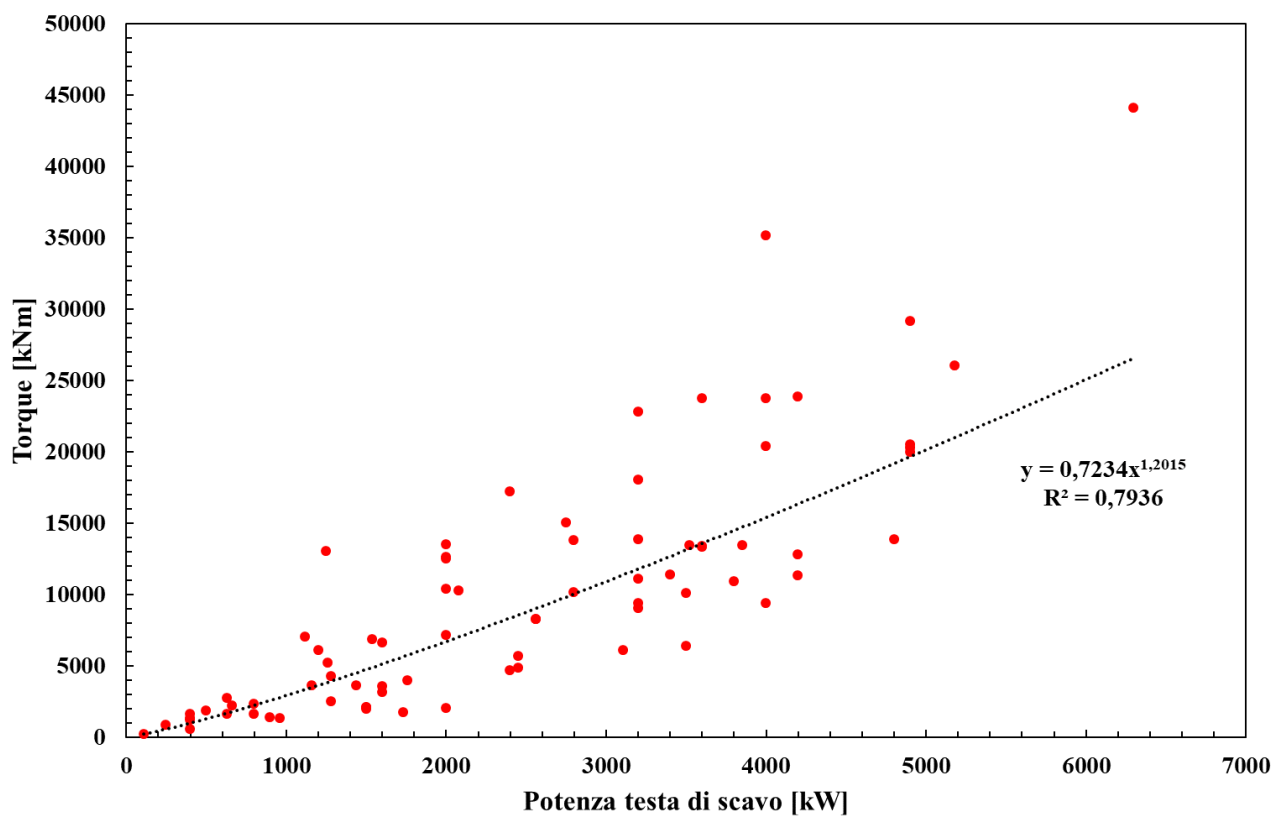


Figura 3.12: Correlazione tra la potenza fornita alla testa di scavo e la coppia (TBM monoscudata)

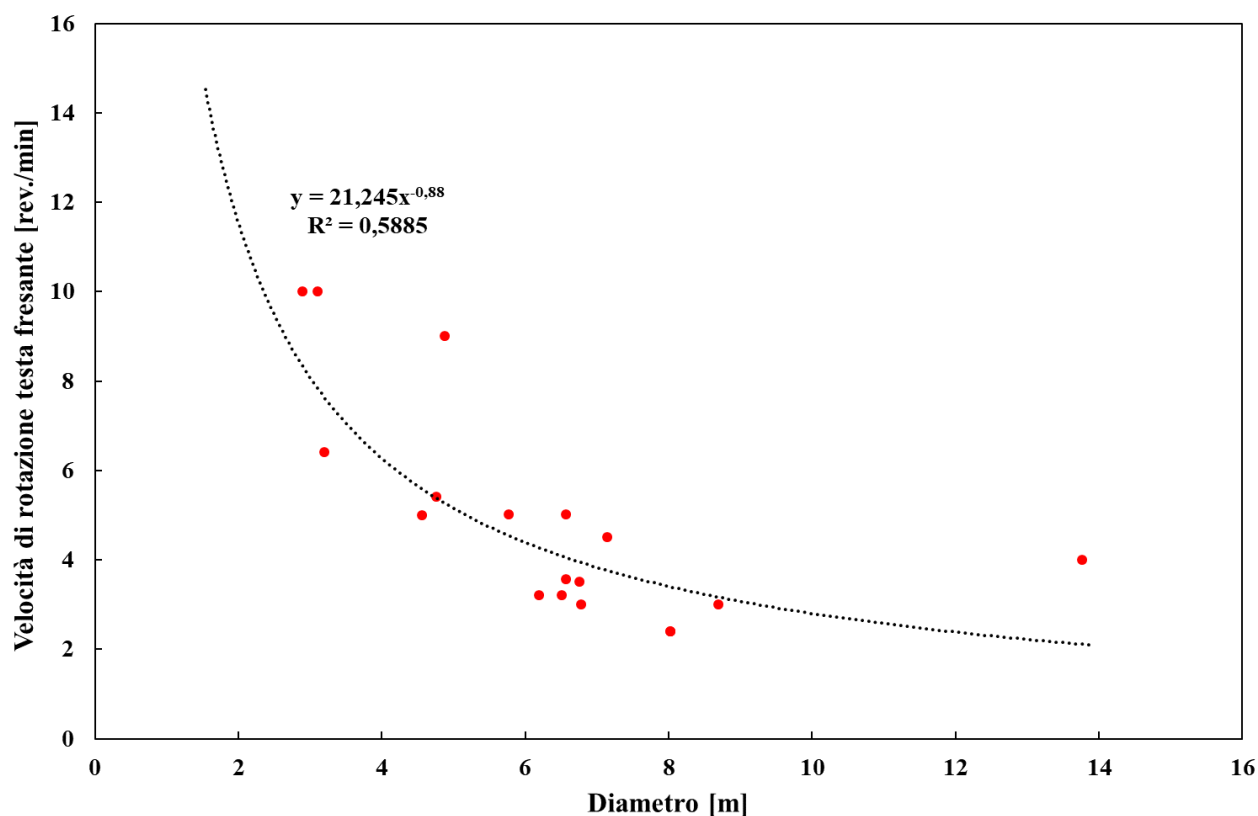


Figura 3.13: Correlazione tra il diametro e la velocità di rotazione della testa di scavo (TBM monoscudata)

TBM a doppio scudo

Nel caso di TBM doppio scudate è stato analizzato, per ognuna delle coppie di parametri investigate, un numero di dati sperimentali sempre maggiore di 30. Ciò ha permesso di ottenere dei modelli più affidabili e, al contempo, precisi rispetto alle TBM aperte e a singolo scudo.

Partendo dallo studio del legame tra il diametro e la potenza fornita alla testa di scavo, la relazione individuata è di tipo lineare, per cui all'aumentare del diametro aumenta la potenza fornita alla testa fresante. Il parametro R^2 è pari a 0,7903. Si è analizzato statisticamente un numero di dati consistente, pari a 78. Osservando il grafico in figura 3.14, si nota che al crescere del diametro, il range di variazione della potenza rimane pressoché costante. Ciò implica che le macchine a doppio scudo contenute nella banca dati hanno operato in formazioni rocciose con piccole variazioni delle proprietà geomeccaniche. La potenza varia tra 200 e 6000 kW. La maggior parte dei dati è però compresa nell'intervallo tra 200 e 3000 kW, con diametri delle macchine variabili tra 2 e 9 m.

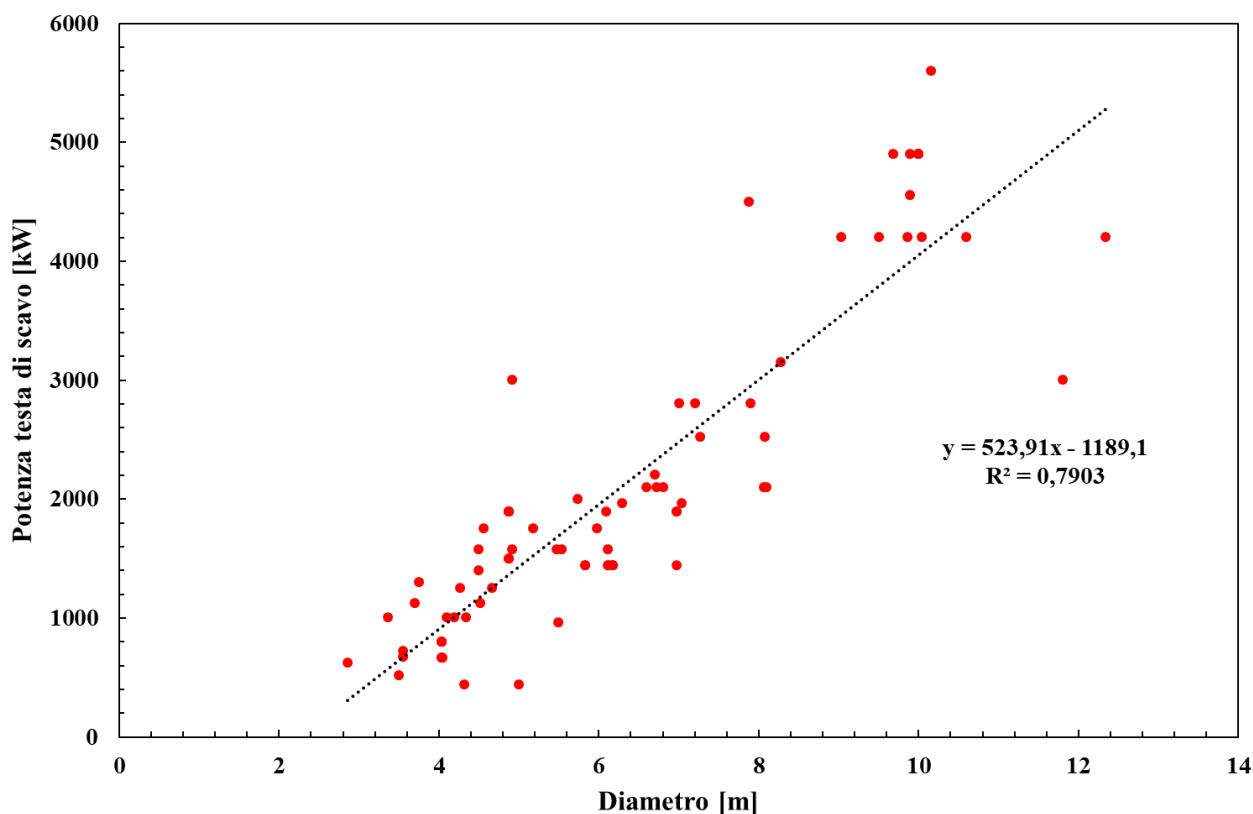


Figura 3.14: Correlazione tra il diametro e la potenza fornita alla testa di scavo (TBM a doppio scudo)

In seguito, è stata ricercata la correlazione tra il diametro e la coppia (Figura 3.15): la mole di dati disponibile è costituita da 58 coppie di parametri. Il modello di regressione è di potenza ed il parametro R^2 è uguale a 0,767. Per quanto riguarda il dominio e il codominio della funzione, i diametri variano tra 2 e 13 m, mentre i valori della coppia sono compresi tra 200 e 23000 kNm. Si rileva una maggiore concentrazione di dati per diametri compresi tra 2 e 9 m.

Inoltre, in questo intervallo, la variazione della coppia è piccola ed il modello approssima molto bene l'andamento dei punti sperimentali.

Per ciò che concerne l'andamento della spinta in funzione del diametro, anche in questo caso la correlazione ottenuta è bassa: è stato comunque preso in considerazione un modello costituito da una funzione di potenza, con un indice R^2 pari a 0,4089. I dati processati (in totale 77), osservando il grafico in figura 3.16, si distribuiscono correttamente lungo la funzione sino ad un diametro di 5 m; per valori maggiori di 5 m, la dispersione dei punti sperimentali aumenta notevolmente.

La spinta e la coppia sono, invece, ben correlate tra loro (Figura 3.17). I punti sperimentali (37) si distribuiscono prevalentemente in un intervallo di spinta compreso tra 3500 e 34000 kN, con un picco massimo di coppia pari a 5200 kNm.

Si individuano poi due punti isolati per valori di spinta pari a 82500 kN e 93000 kN, cui corrispondono momenti torcenti rispettivamente di 18700 kNm e 41000 kNm. La funzione di regressione lineare,

con R^2 uguale a 0,838, potrebbe essere più precisa se si disponesse di un maggior numero di dati per valori di spinta maggiori di 34000 kN.

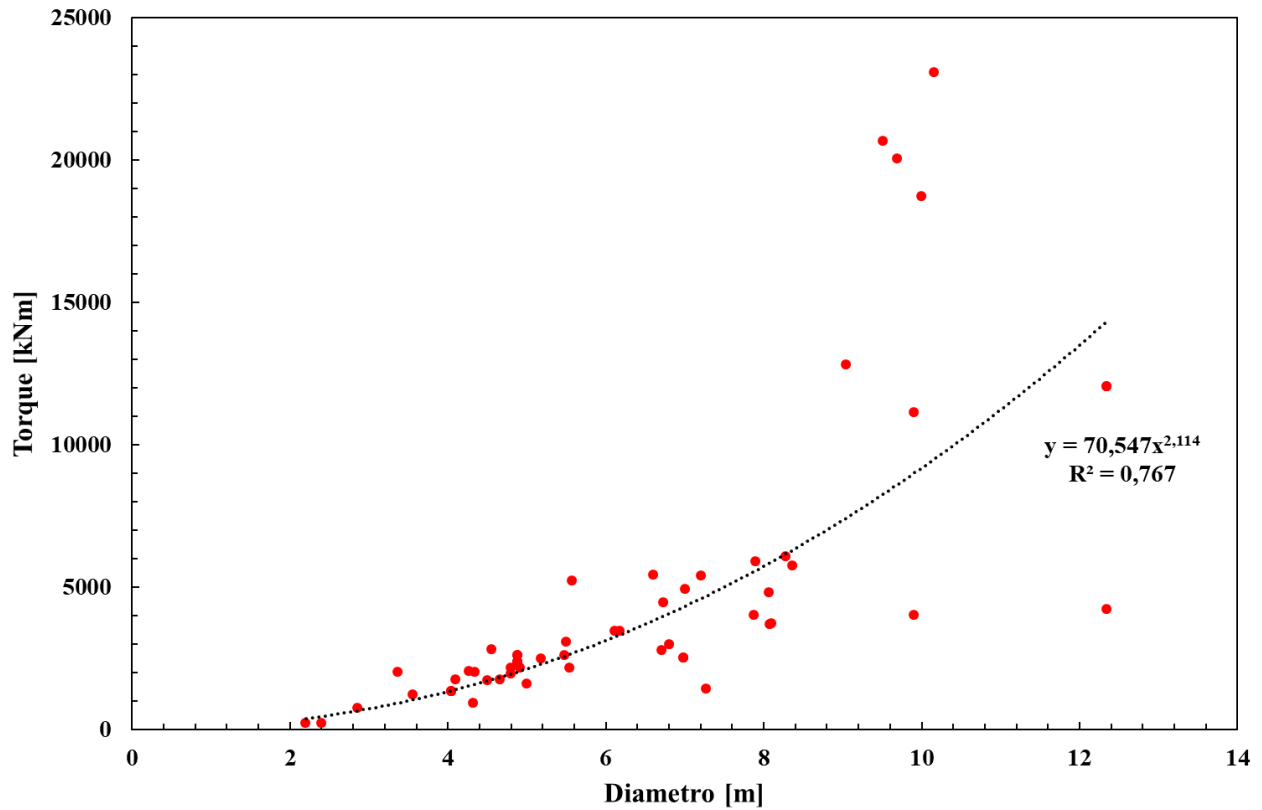


Figura 3.15: Correlazione tra il diametro e la coppia (TBM a doppio scudo)

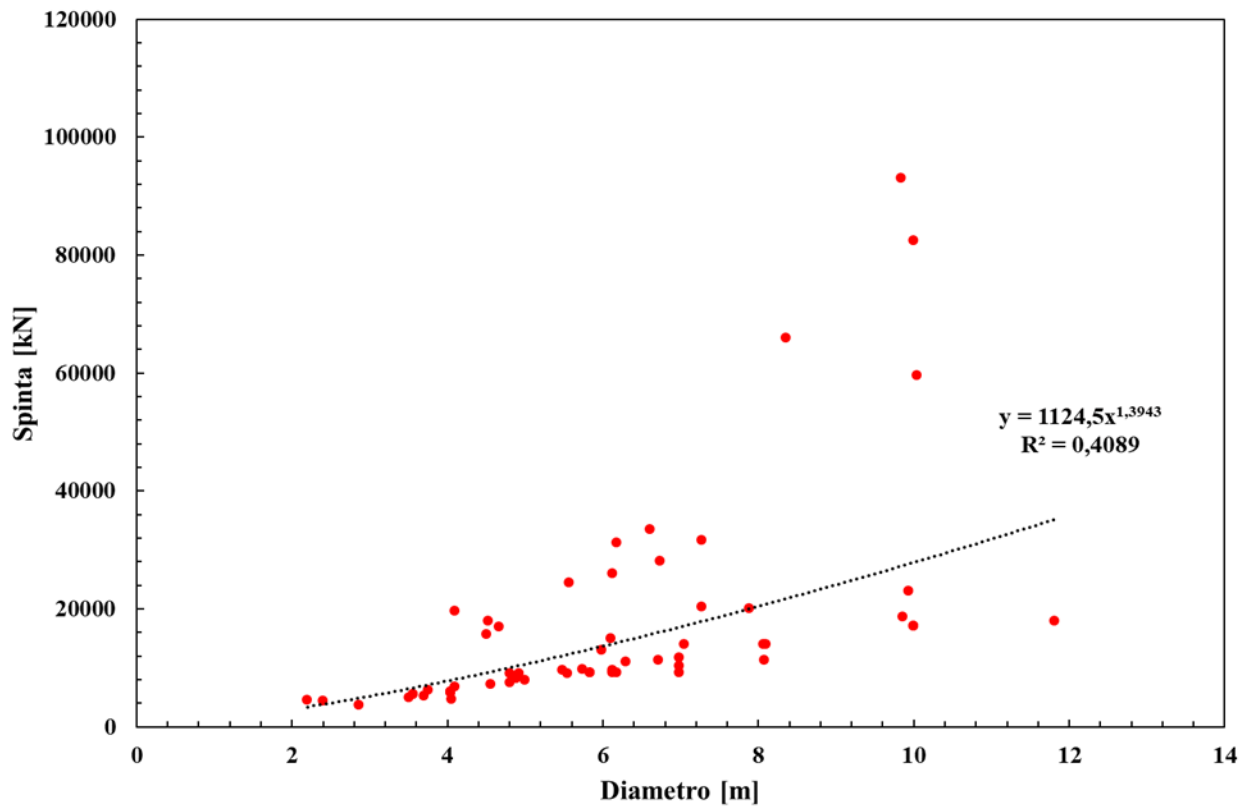


Figura 3.16: Correlazione tra il diametro e la spinta (TBM a doppio scudo)

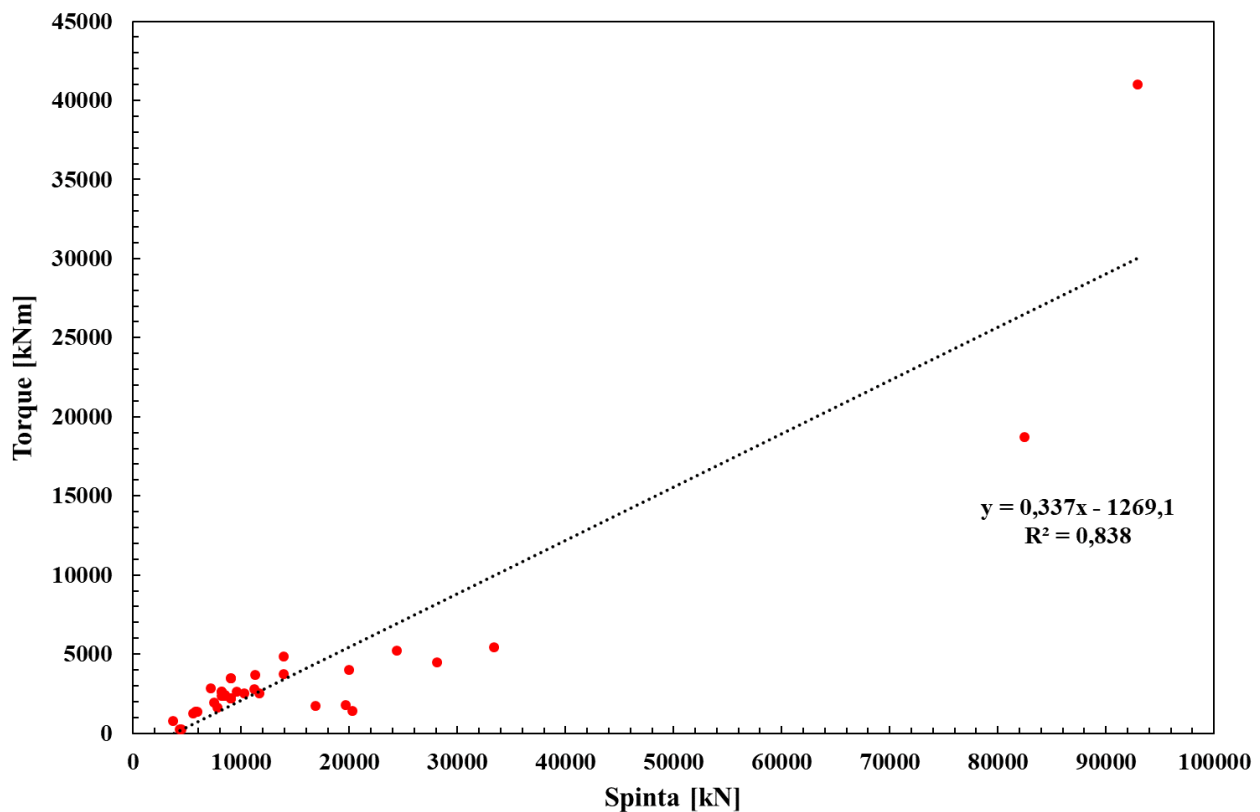


Figura 3.17: Correlazione tra la spinta e la coppia (TBM a doppio scudo)

Esiste anche una forte correlazione tra la potenza e la coppia (Figura 3.18). Le coppie di parametri (in totale 48), si distribuiscono perfettamente secondo una funzione esponenziale per potenze comprese tra 400 e 3500 kW. Per potenze maggiori aumenta la dispersione dei dati che influisce sul parametro R^2 , il quale tuttavia rimane molto alto, pari a 0,8004.

Nell'analisi della correlazione tra la potenza fornita alla testa fresante e la spinta, sono stati analizzati 55 dati, approssimati da una funzione di regressione di potenza (Figura 3.19). Il numero di dati processati statisticamente è pari a 55 ed il coefficiente di determinazione della funzione è uguale a 0,5003. La maggior parte dei punti ricade nell'intervallo di potenza 400 – 3500 kW, come nel caso precedente. La dispersione risulta marcata, in quanto sono state analizzate probabilmente delle casistiche di progetti realizzati in formazioni rocciose differenti dal punto di vista geo - meccanico. Infine, si riporta, in figura 3.20, la correlazione tra il diametro e la velocità di rotazione della testa di scavo, espresso da una potenza. Si osserva ancora una volta, come nei casi delle TBM aperte e a singolo scudo, che al crescere del diametro diminuisce la velocità di rotazione della testa di scavo e viceversa.

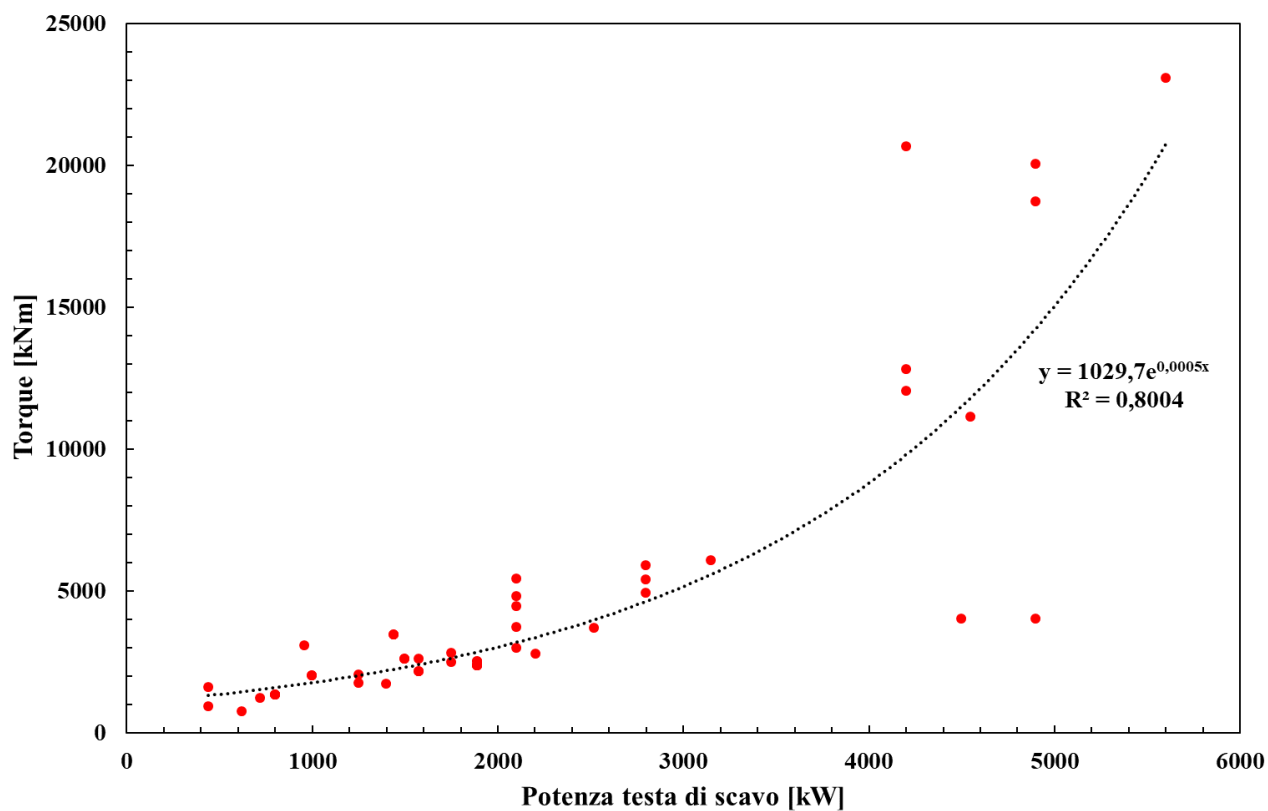


Figura 3.18: Correlazione tra la potenza fornita alla testa di scavo e la coppia (TBM a doppio scudo)

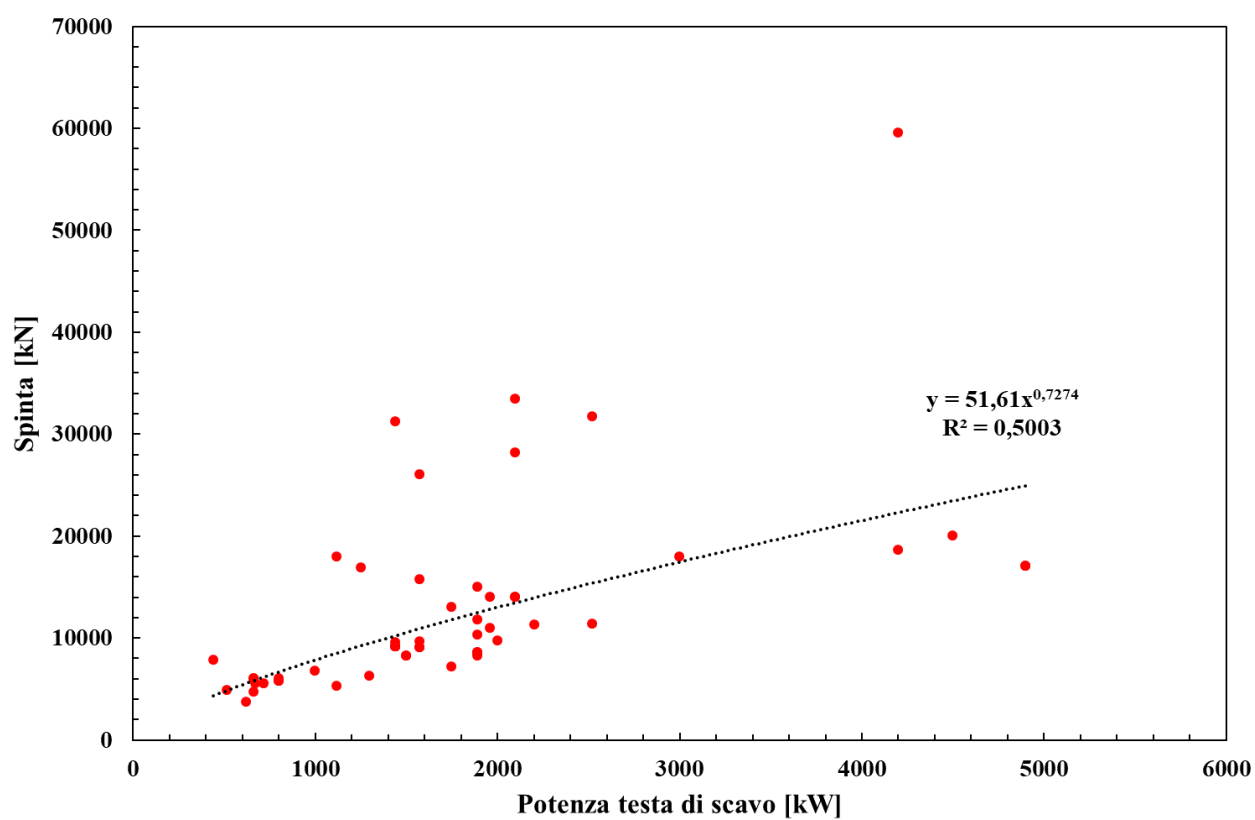


Figura 3.19: Correlazione tra la potenza fornita alla testa di scavo e la spinta (TBM a doppio scudo)

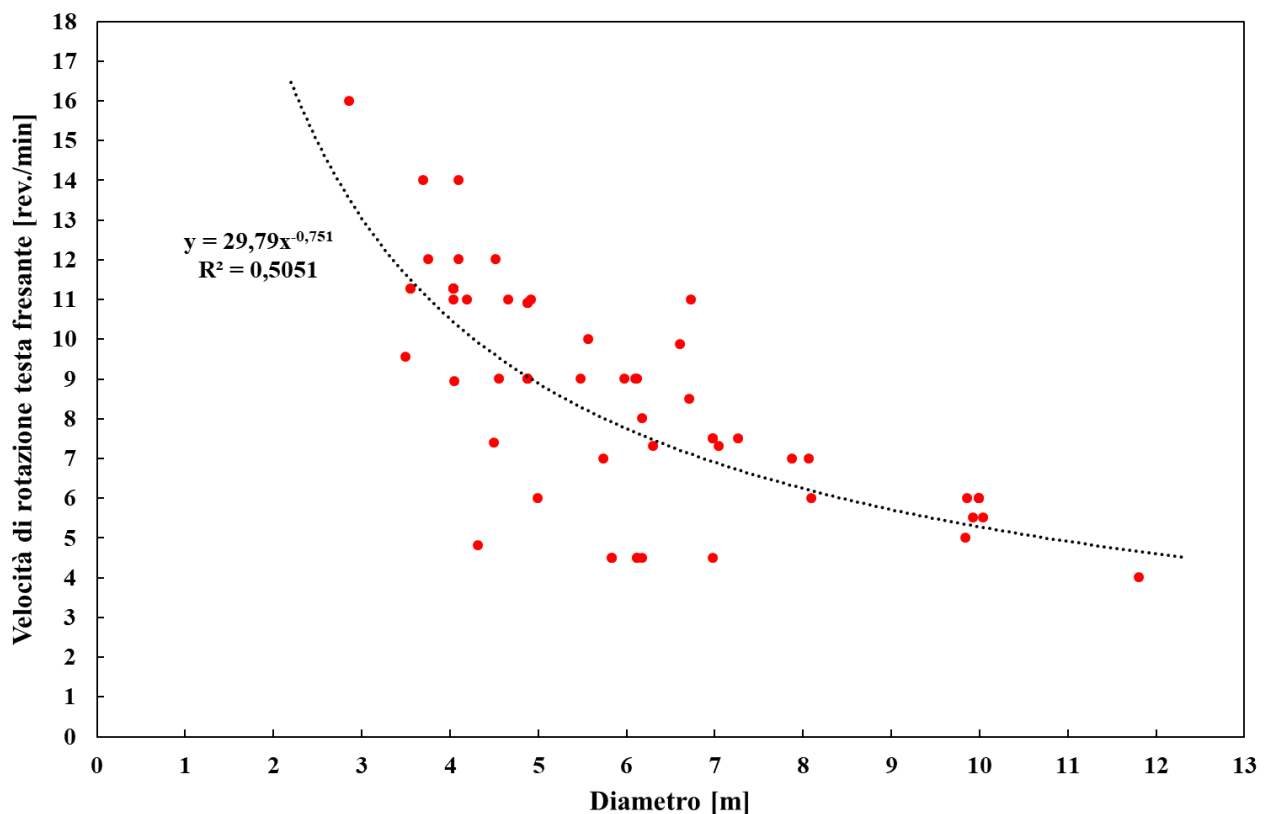


Figura 3.20: Correlazione tra il diametro e la velocità di rotazione della testa di scavo (TBM a doppio scudo)

3.1.2 Analisi delle correlazioni per tipologia di fresa e ammasso roccioso

Nel seguito si riportano ed analizzano i risultati dello studio delle correlazioni tra i parametri meccanici delle frese a piena sezione in roccia, in cui si tiene conto dell'aspetto geologico delle formazioni rocciose. Come detto, le informazioni di carattere geologico, reperite nella fase di ricerca dei dati sperimentali, sono molto superficiali e poco dettagliate. Solo in pochissimi casi, tra l'altro, sono stati rinvenuti parametri geomeccanici e quindi non è stato possibile utilizzarli come input per i modelli di correlazione. Si è cercato comunque di impiegare i dati di carattere geologico a disposizione, con lo scopo di ottenere delle equazioni più precise e specifiche di una determinata tipologia di roccia. A tal proposito, sono state analizzate le correlazioni tra i parametri meccanici, suddividendo le diverse gallerie in 5 gruppi, utilizzando come discriminante 5 tipologie di roccia contenute nelle formazioni rocciose: granito, gneiss, arenaria, calcare e scisto. L'analisi è stata svolta nello stesso modo per le tre tipologie di TBM da roccia.

TBM aperta

✓ *Granito*

Il legame tra il diametro e la potenza fornita alla testa di scavo è lineare ed il coefficiente R^2 è uguale a 0,8926 (Figura 3.21). Il diametro delle macchine impiegate varia tra 3 e 10 m.

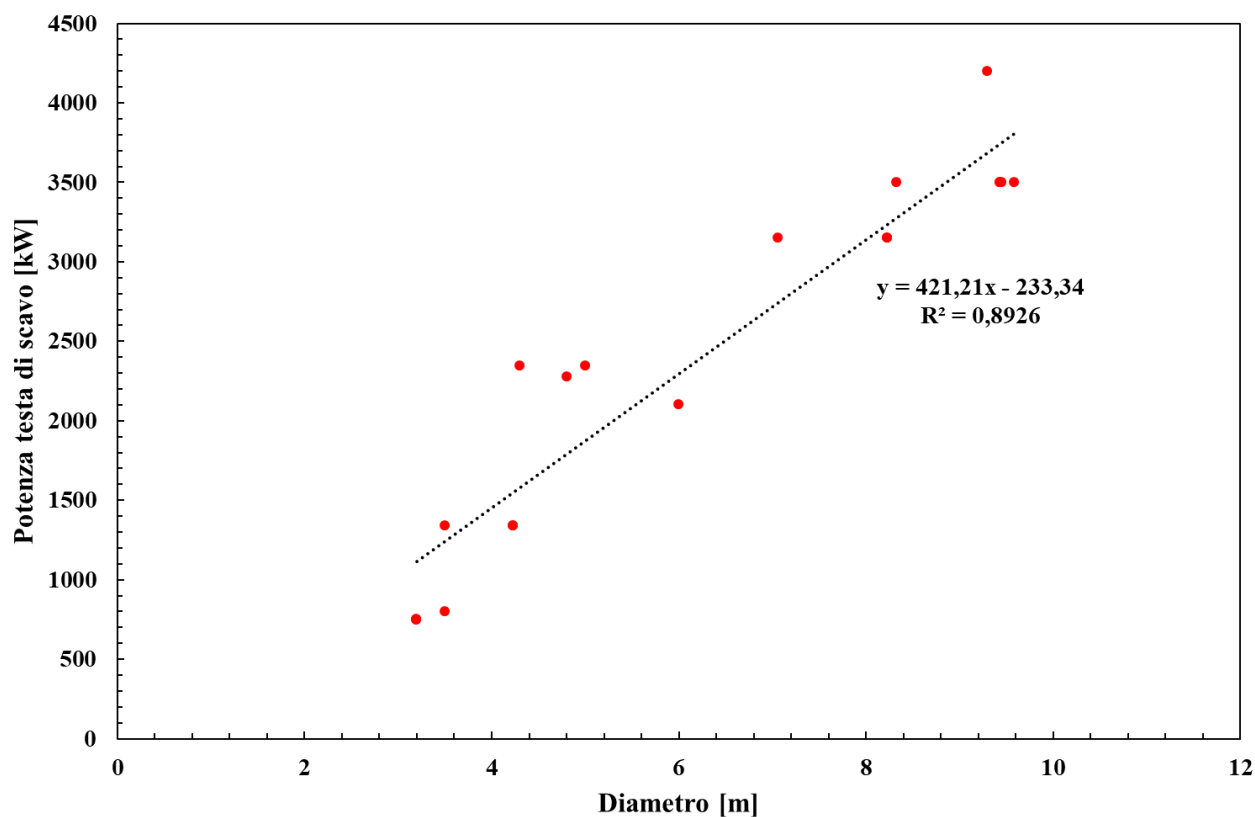


Figura 3.21: Correlazione tra il diametro e la potenza fornita alla testa di scavo in formazioni rocciose con presenza di granito (TBM aperta)

Nell'analisi del legame tra il diametro e la spinta, si individua una funzione di regressione logaritmica con indice R^2 molto alto ed uguale a 0,9031 (Figura 3.22). I dati sperimentali sono approssimati perfettamente dalla funzione; quindi ciò lascia intuire che le proprietà geo meccaniche del granito sono molto simili nei diversi casi analizzati, in cui sono state impiegate per lo scavo macchine aventi diametro differente. I dati analizzati sono 13, con diametri delle frese variabili da 3 a 8 m, cui corrispondono spinte tra 5000 e 17000 kN.

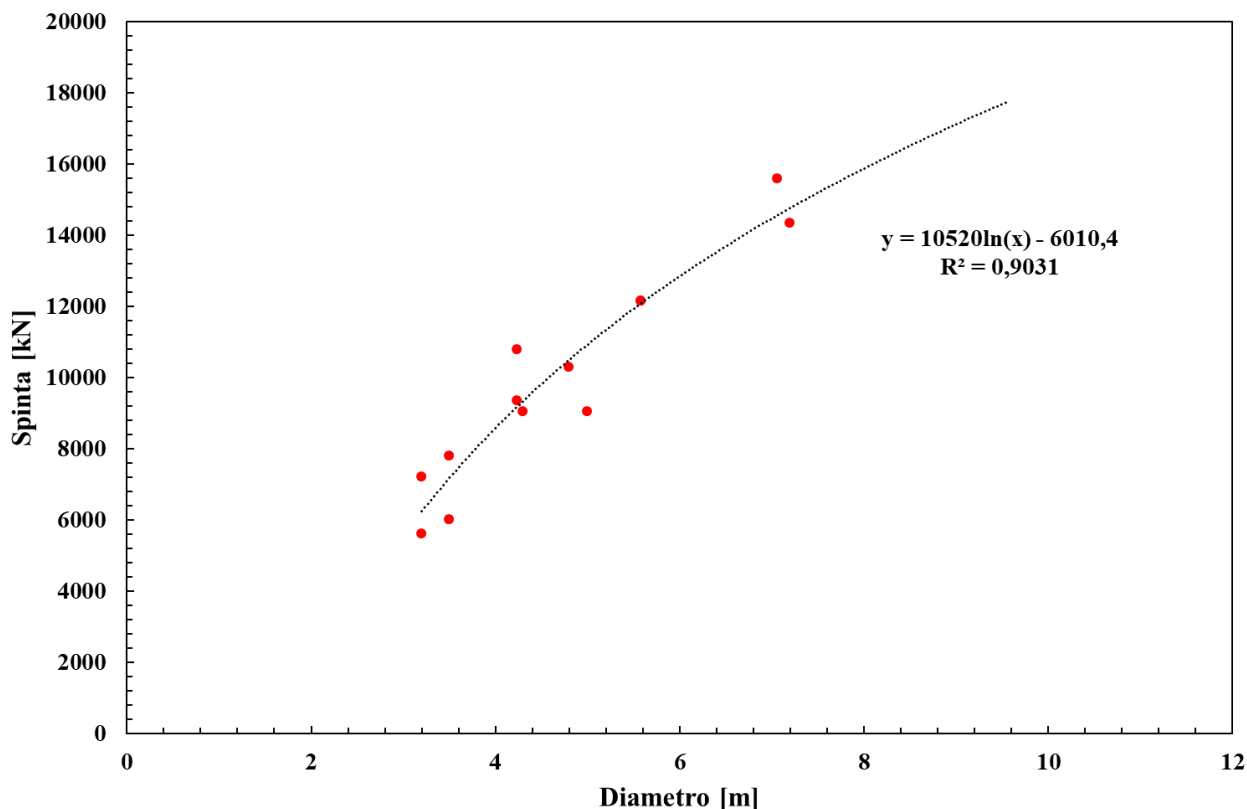


Figura 3.22: Correlazione tra il diametro e la spinta in formazioni rocciose con presenza di granito (TBM aperta)

Anche il diametro e la coppia paiono molto ben correlati. I punti sperimentali sono infatti rappresentabili da una funzione esponenziale con coefficiente di determinazione R^2 uguale a 0,9334 (Figura 3.23). Si individua solo un caso in cui il granito sembra avere diverse proprietà meccaniche: infatti, ad un diametro della macchina poco minore di 10 m, corrispondono 4 diversi valori di momento torcente. In tutti gli altri casi la coppia aumenta esponenzialmente all'aumentare del diametro.

L'ultima correlazione analizzata è quella tra la potenza alla testa di scavo e la coppia (Figura 3.24). Anche in questo caso gli 11 punti sperimentali sono approssimati da una funzione di regressione esponenziale con indice R^2 uguale a 0,9187. La potenza alla testa di scavo varia tra 700 e 4400 kW, cui corrispondono valori di coppia compresi tra 400 e 11000 kNm.

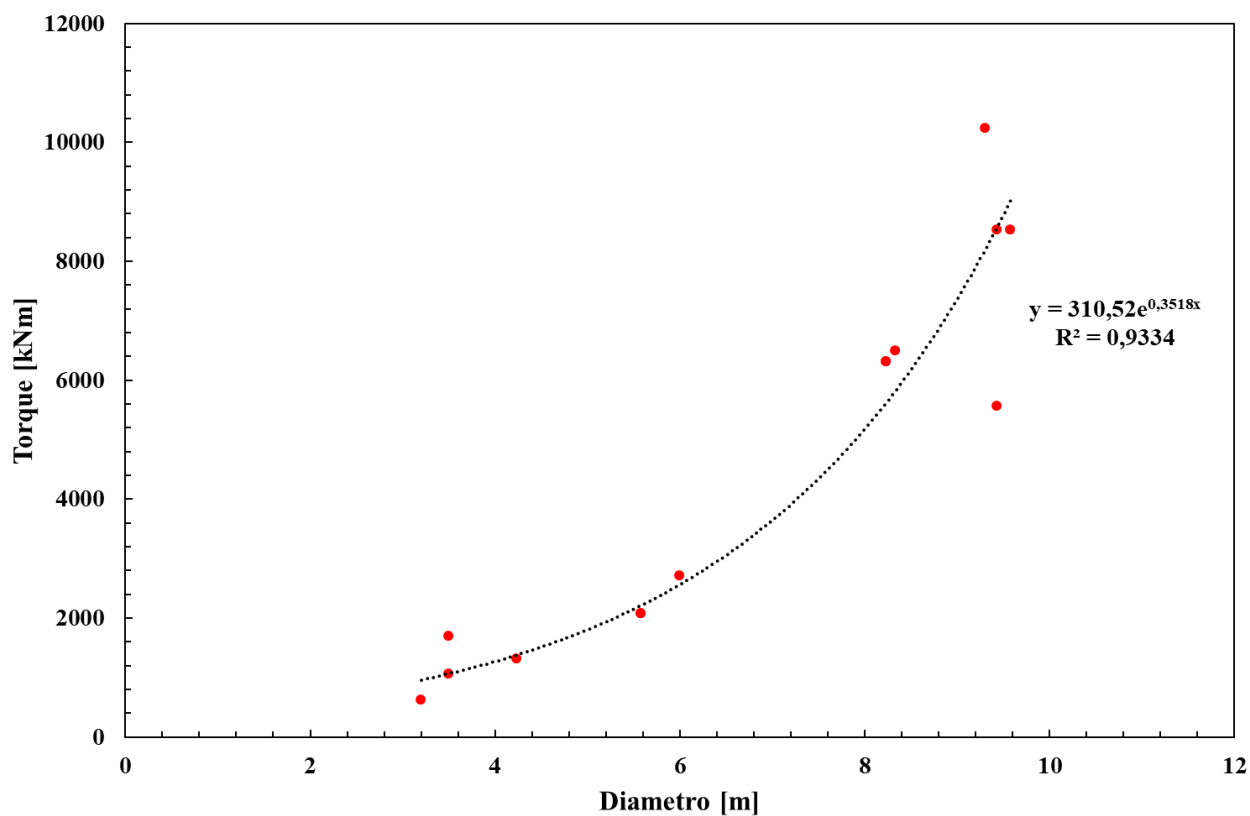


Figura 3.23: Correlazione tra il diametro e la coppia in formazioni rocciose con presenza di granito (TBM aperta)

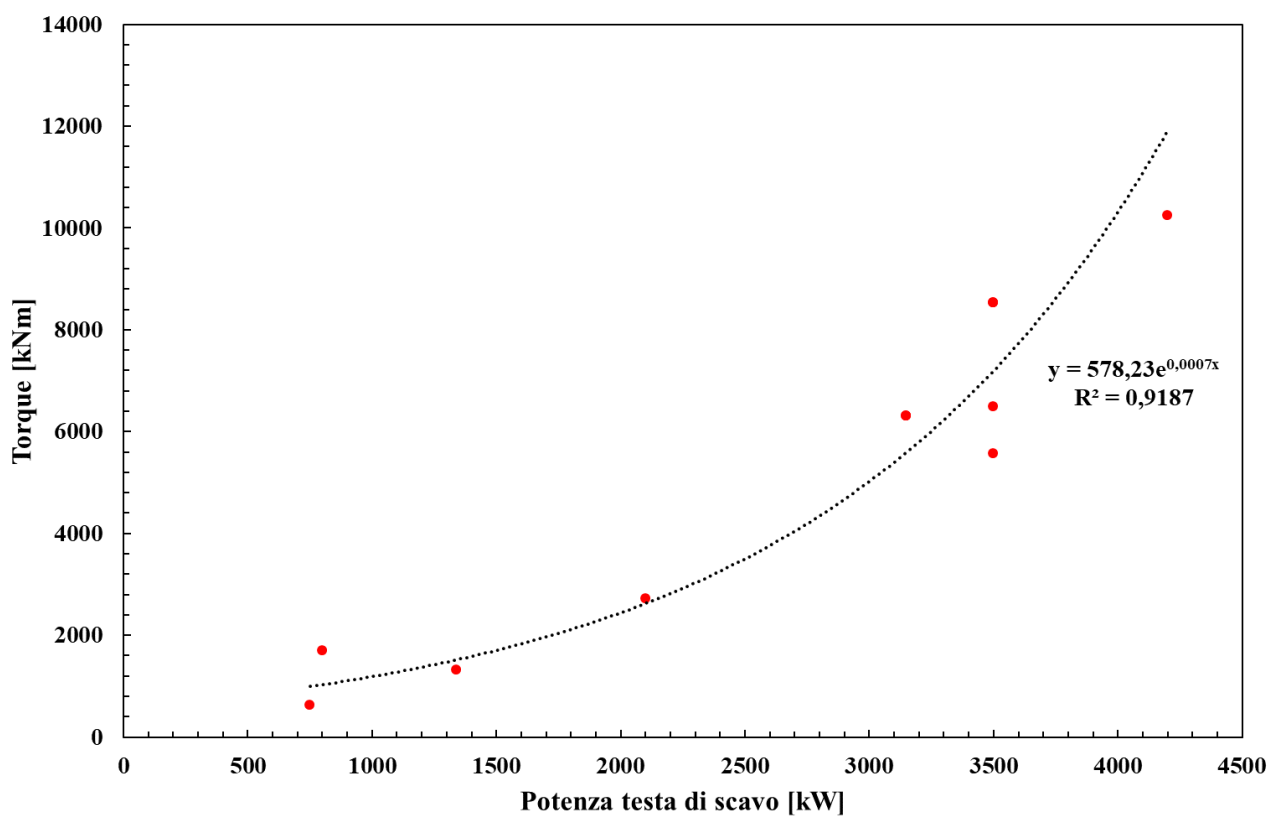


Figura 3.24: Correlazione tra la potenza fornita alla testa di scavo e la coppia in formazioni rocciose con presenza di granito (TBM aperta)

✓ *Gneiss*

Considerando i parametri meccanici di TBM aperte utilizzate per realizzare gallerie in formazioni rocciose contenenti gneiss, innanzitutto si ricava un andamento lineare della potenza fornita alla testa di scavo in funzione del diametro (Figura 3.25). In questo caso, a differenza del granito, il numero di dati analizzati è più alto (30), ed è maggiore la dispersione riscontrata; infatti, ad un determinato diametro corrispondono spesso più valori di potenza, ad indicazione del fatto che le formazioni rocciose con presenza di gneiss hanno proprietà meccaniche differenti le une dalle altre. In ogni caso, l'equazione di regressione individuata ha un coefficiente di determinazione medio - alto di 0,6648.

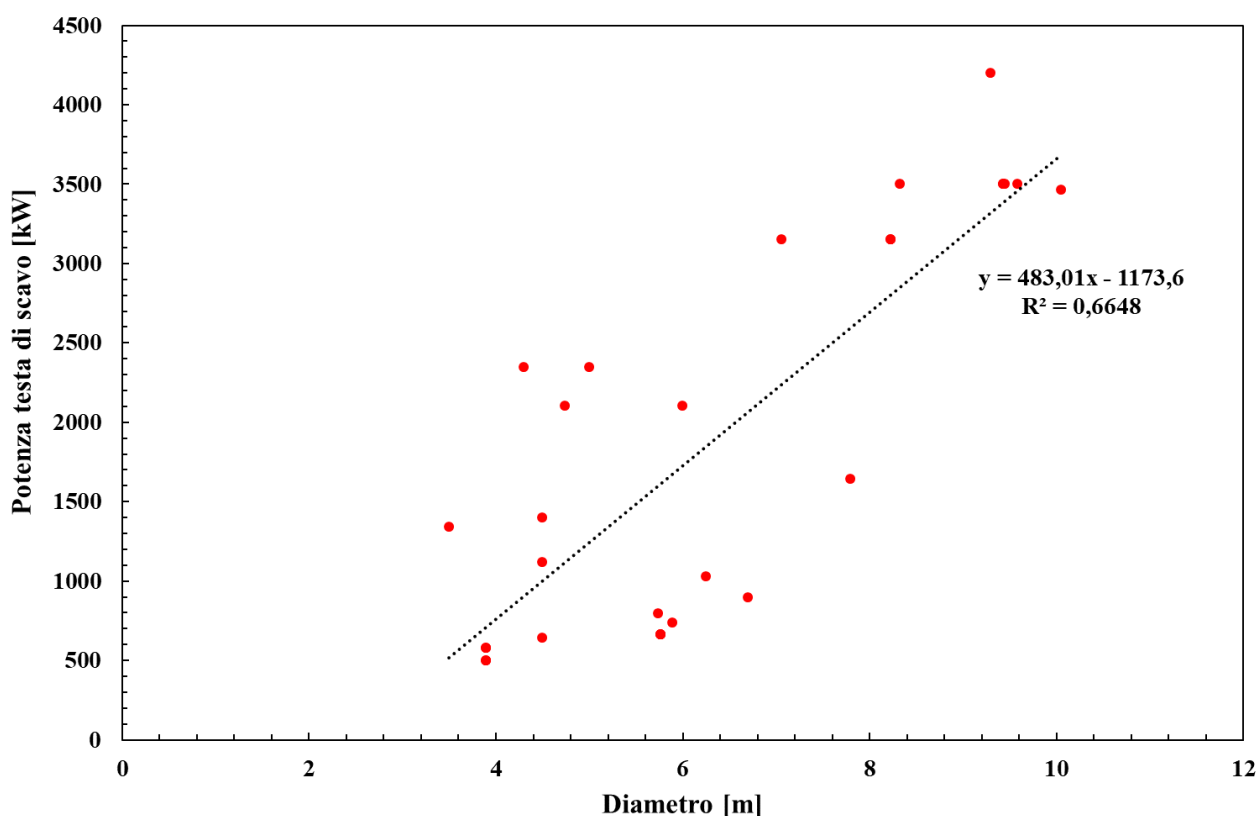


Figura 3.25: Correlazione tra il diametro e la potenza fornita alla testa di scavo in formazioni rocciose con presenza di gneiss (TBM aperta)

Si riporta, in figura 3.26, l'andamento della spinta in funzione del diametro della macchina. Si osserva che la funzione di regressione è un'esponenziale, con coefficiente R^2 uguale a 0,8209. Le proprietà meccaniche delle rocce appaiono molto simili in quanto i dati sperimentali sono perfettamente rappresentati dalla suddetta funzione con uno scarto piccolissimo. Il diametro delle macchine varia tra 3 e 10 m, con spinte comprese nell'intervallo tra 5 e 28 MN.

Come si osserva in figura 3.27, il diametro e la coppia sono inoltre ben correlati, essendo i due parametri direttamente proporzionali.

Sono stati analizzati anche i legami esistenti tra la potenza e la coppia (Figura 3.28) e tra la potenza e la spinta (Figura 3.29). Nel primo caso, il fitting dei dati è stato realizzato con una funzione di

potenza che approssima molto bene i dati sperimentali, mentre nel secondo caso l'equazione di regressione è un'esponenziale ($R^2 = 0,6524$).

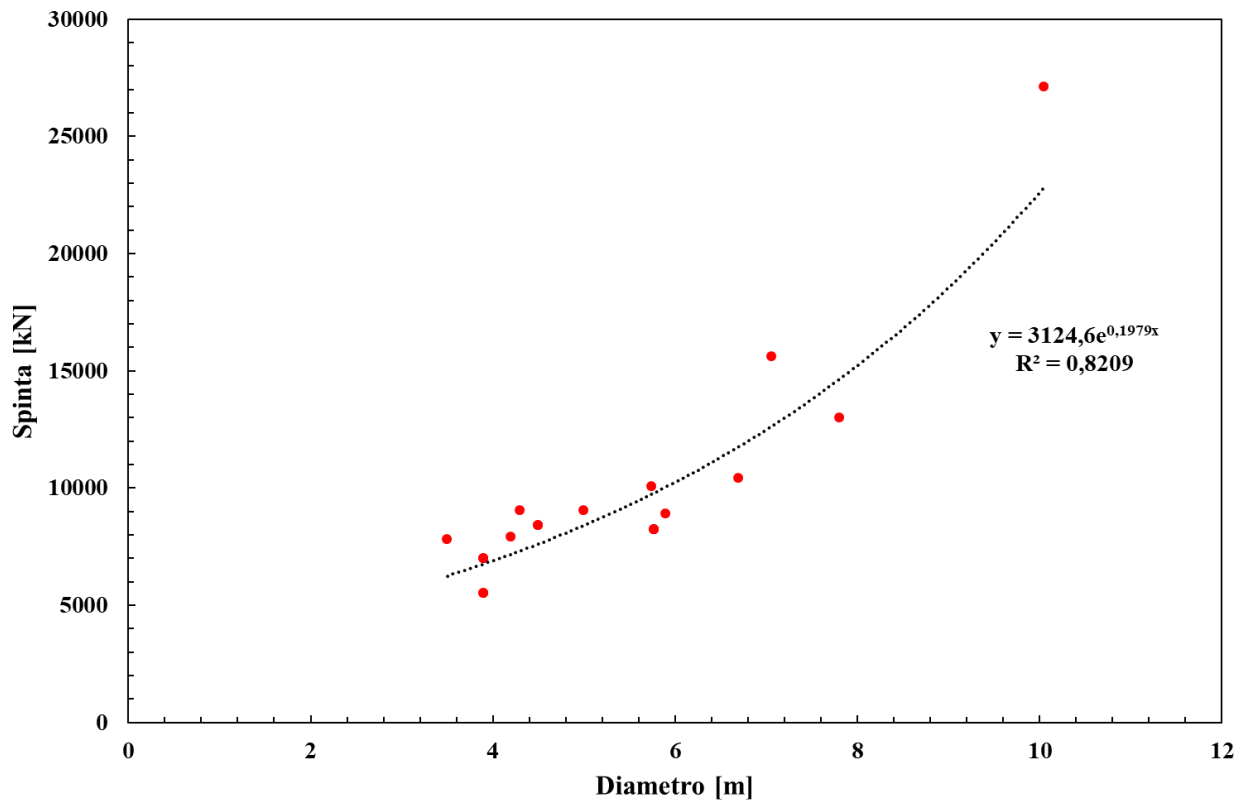


Figura 3.26: Correlazione tra il diametro e la spinta in formazioni rocciose con presenza di gneiss (TBM aperta)

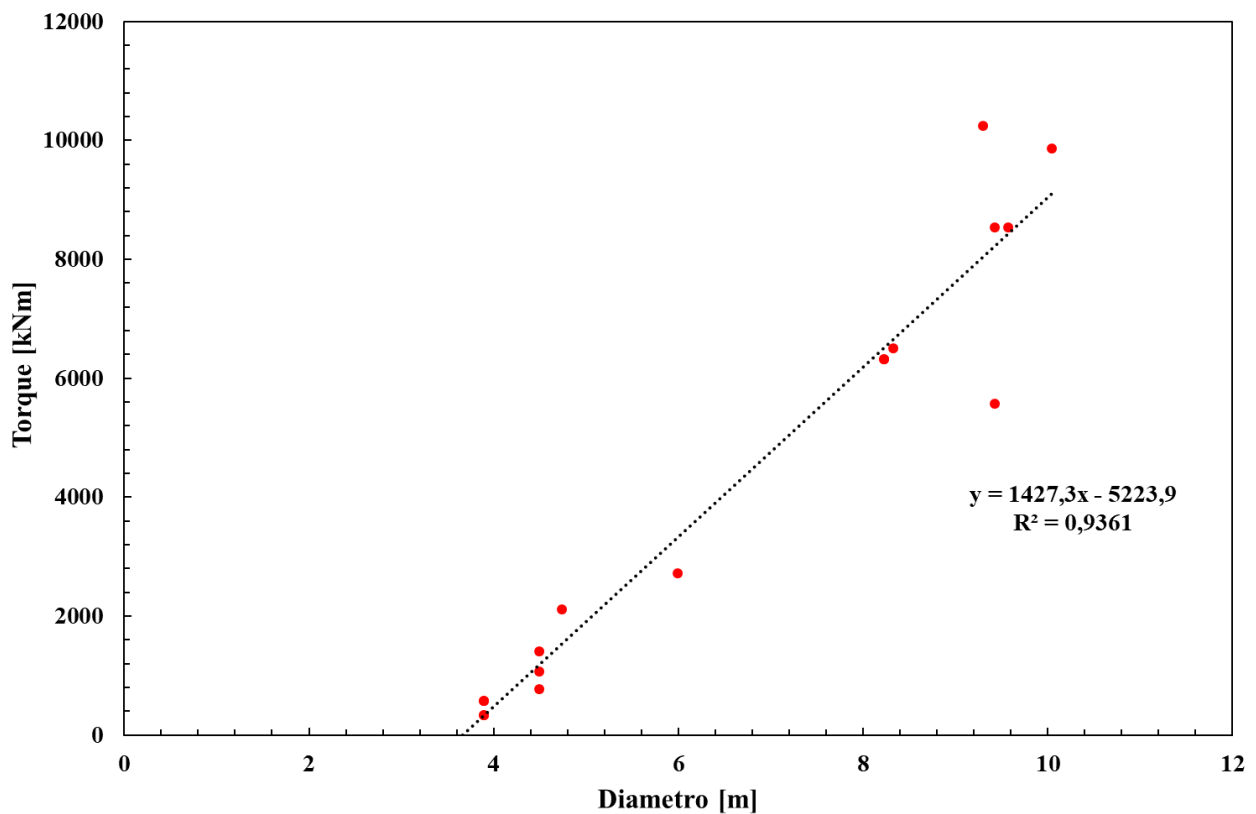


Figura 3.27: Correlazione tra il diametro e la coppia in formazioni rocciose con presenza di gneiss (TBM aperta)

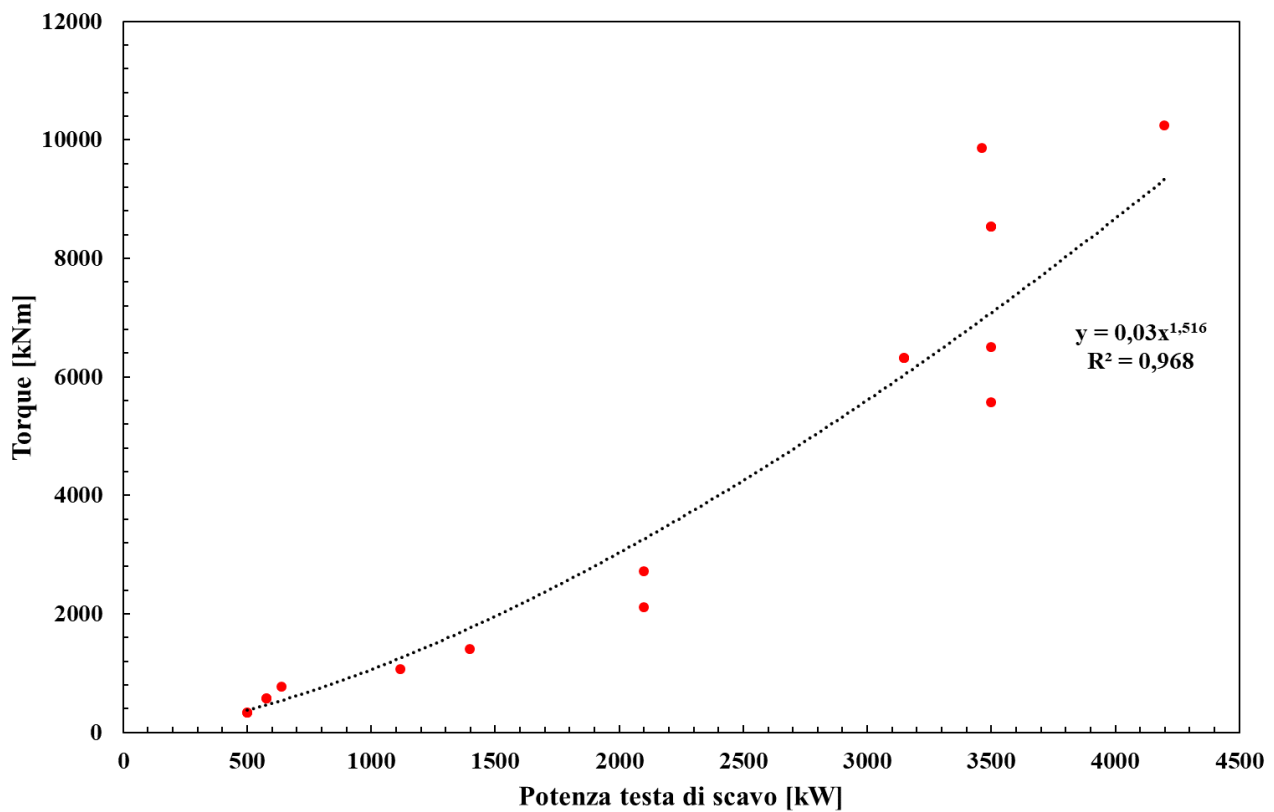


Figura 3.28: Correlazione tra la potenza fornita alla testa di scavo e la coppia in formazioni rocciose con presenza di gneiss (TBM aperta)

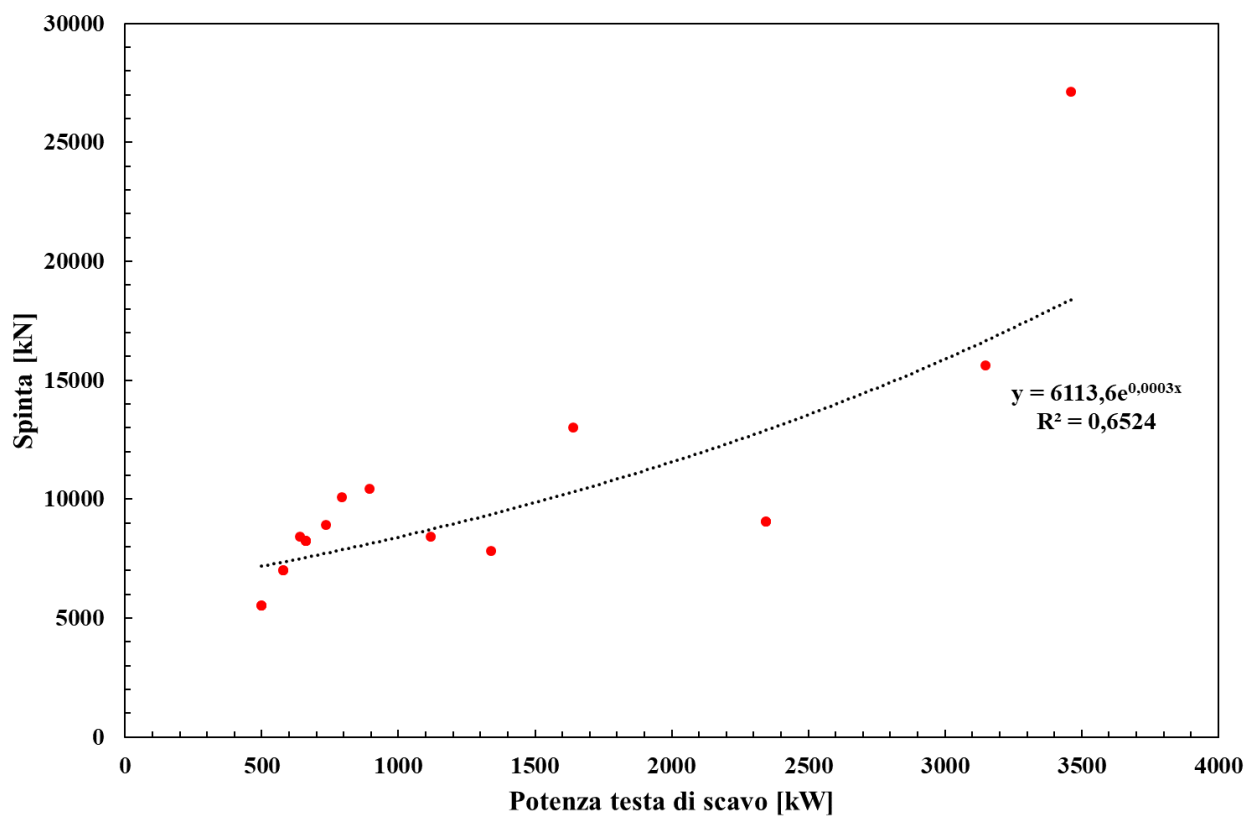


Figura 3.29: Correlazione tra la potenza fornita alla testa di scavo e la spinta in formazioni rocciose con presenza di gneiss (TBM aperta)

✓ Scisto

Nell'analisi delle correlazioni tra i parametri meccanici di TBM aperte in formazioni rocciose contenenti roccia scistosa, sono stati ottenuti quasi sempre indici di correlazione bassi nei casi studio esaminati, ad eccezione della correlazione tra spinta e coppia.

L'equazione che esprime la correlazione tra il diametro e la spinta (Figura 3.30) è lineare ed è stata ottenuta analizzando 24 coppie di parametri. Il parametro R^2 , pari a 0,556, è basso rispetto alle aspettative poiché quasi tutti i dati a disposizione ricadono in un intervallo di diametro molto piccolo, compreso tra 3 e 6 m. Quindi, a parità di diametro, si hanno più valori di spinta che derivano dall'avere scavato in formazioni rocciose con caratteristiche meccaniche variabili.

La stessa situazione si ripresenta nello studio del legame tra il diametro e la coppia (Figura 3.31), in cui l'intervallo di variazione dei diametri è ancor più ristretto.

La spinta e la coppia, come accennato in precedenza, paiono invece ben correlati. La funzione che approssima i dati sperimentali è un'esponenziale (Figura 3.32). Infine, è stato effettuato il fitting delle coppie di parametri potenza – spinta tramite una funzione logaritmica (Figura 3.33). In questo caso però vi sono molte coppie di dati uguali fra loro.

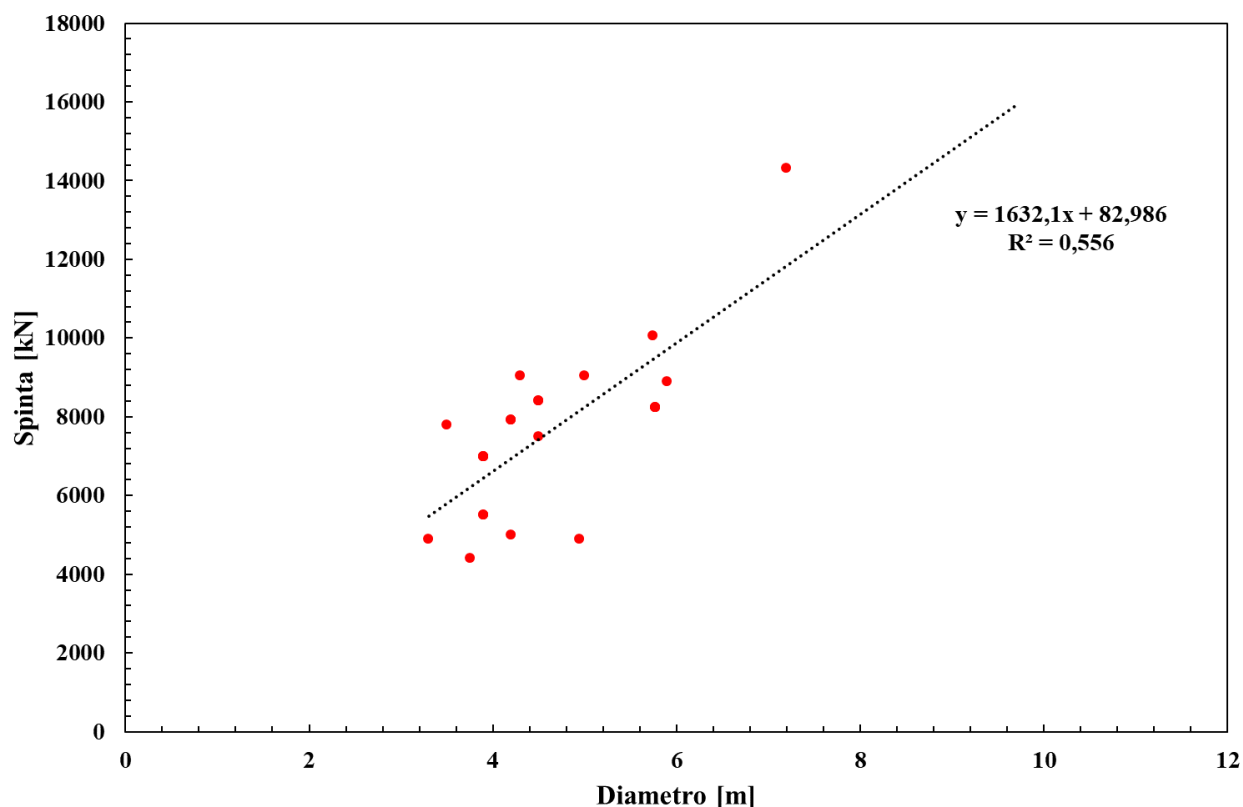


Figura 3.30: Correlazione tra il diametro e la spinta in formazioni rocciose con presenza di roccia scistosa (TBM aperta)

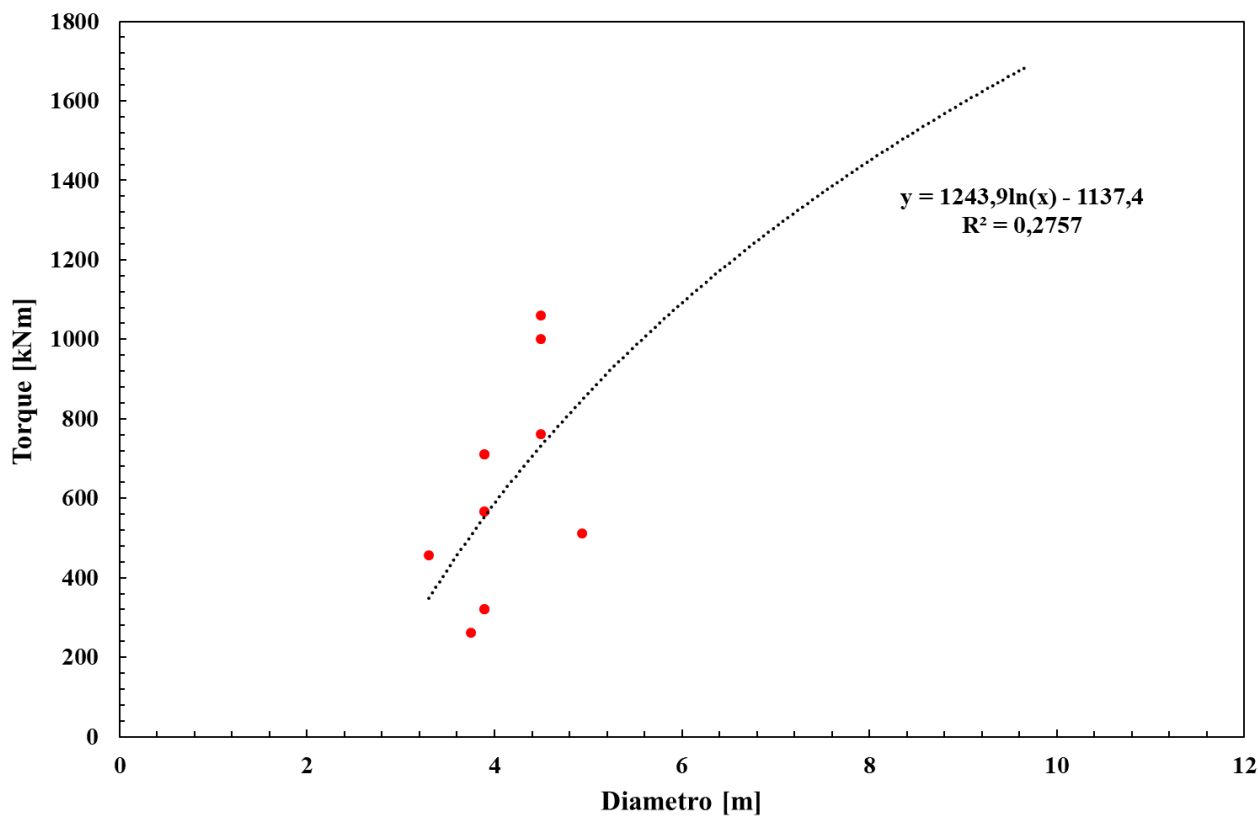


Figura 3.31: Correlazione tra il diametro e la coppia in formazioni rocciose con presenza di roccia scistosa (TBM aperta)

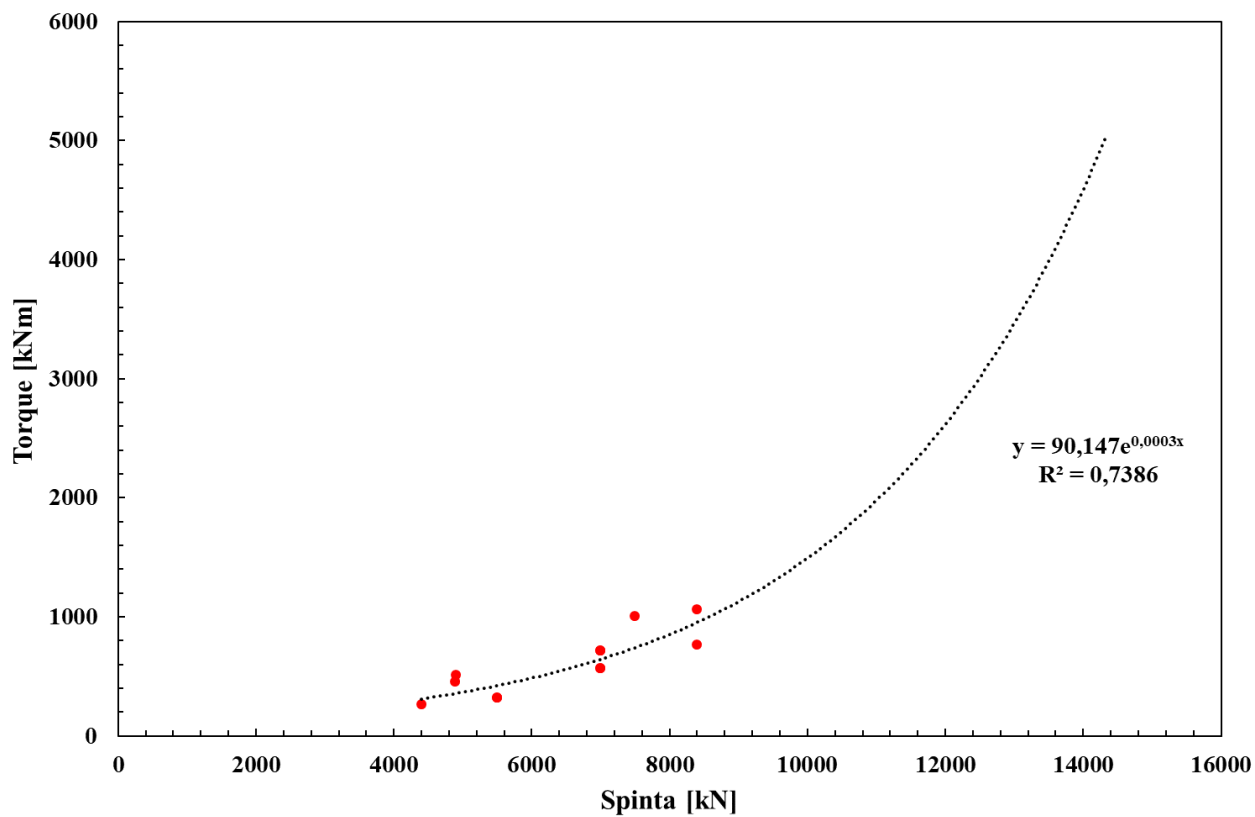


Figura 3.32: Correlazione tra la spinta e la coppia in formazioni rocciose con presenza di roccia scistosa (TBM aperta)

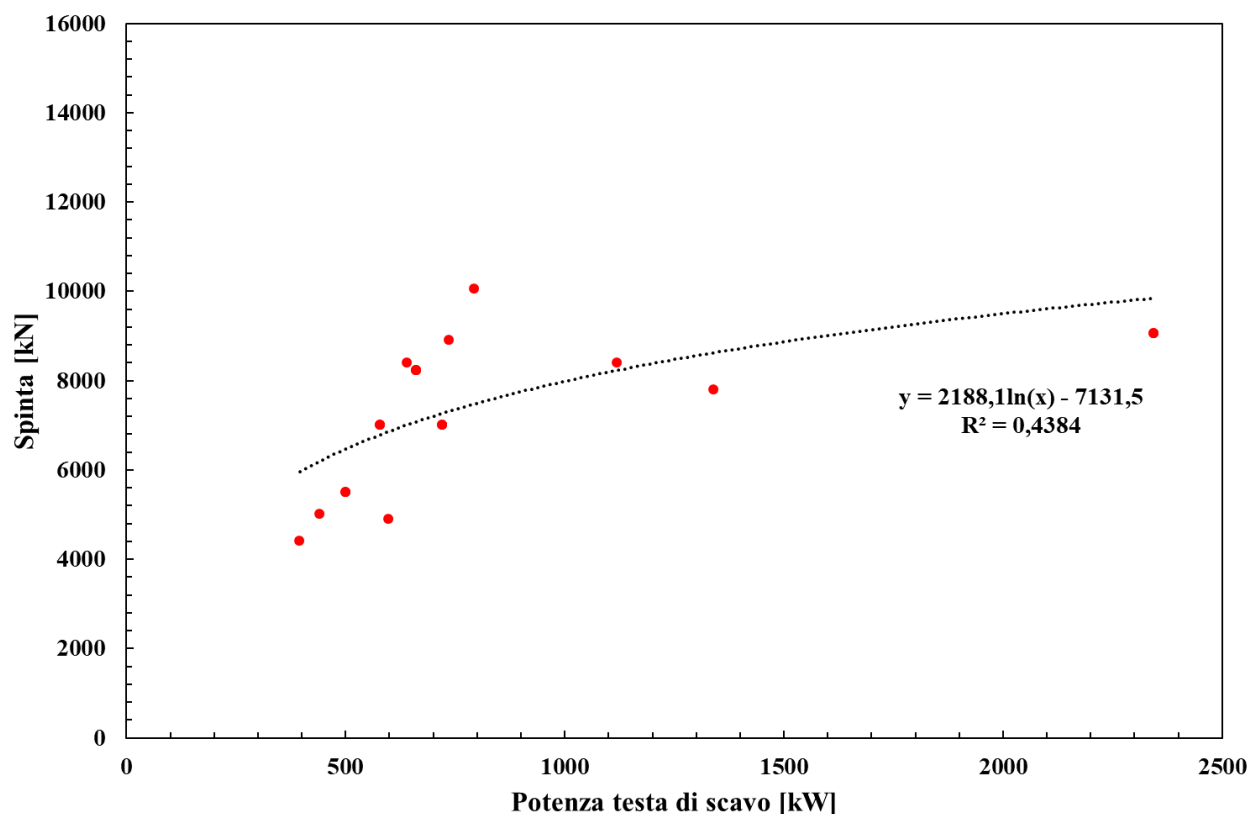


Figura 3.33: Correlazione tra la potenza fornita alla testa di scavo e la spinta in formazioni rocciose con presenza di roccia scistosa (TBM aperta)

TBM a singolo scudo

✓ *Arenaria*

La correlazione tra il diametro e la potenza fornita alla testa di scavo, nel caso di TBM a singolo scudo operanti in formazioni rocciose contenenti arenaria, è espressa da una funzione di potenza (Figura 3.34). Il numero di coppie di parametri impiegate nell'analisi è uguale a 20 ed il coefficiente R^2 è pari a 0,8413. Per valori di diametro minori di 8 m, si evidenzia uno scarto rispetto alla media molto piccolo che invece aumenta per diametri maggiori.

Un forte legame si riscontra anche tra il diametro e la coppia (Figura 3.35) e tra la potenza fornita alla testa fresante e la coppia (Figura 3.36). Entrambe le correlazioni sono descritte da una potenza con parametro R^2 maggiore di 0,7. Nel primo caso si evidenzia, come nel grafico di figura 3.34, uno scarto rispetto alla media molto piccolo per valori di diametro minori di 8 m, crescente all'aumentare di quest'ultimo. Nel secondo caso, invece, la funzione di regressione approssima molto bene i dati sperimentali in tutto il dominio delle potenze, compreso tra 200 e 5200 kW. Il legame tra il diametro e la spinta appare invece molto debole (Figura 3.37).

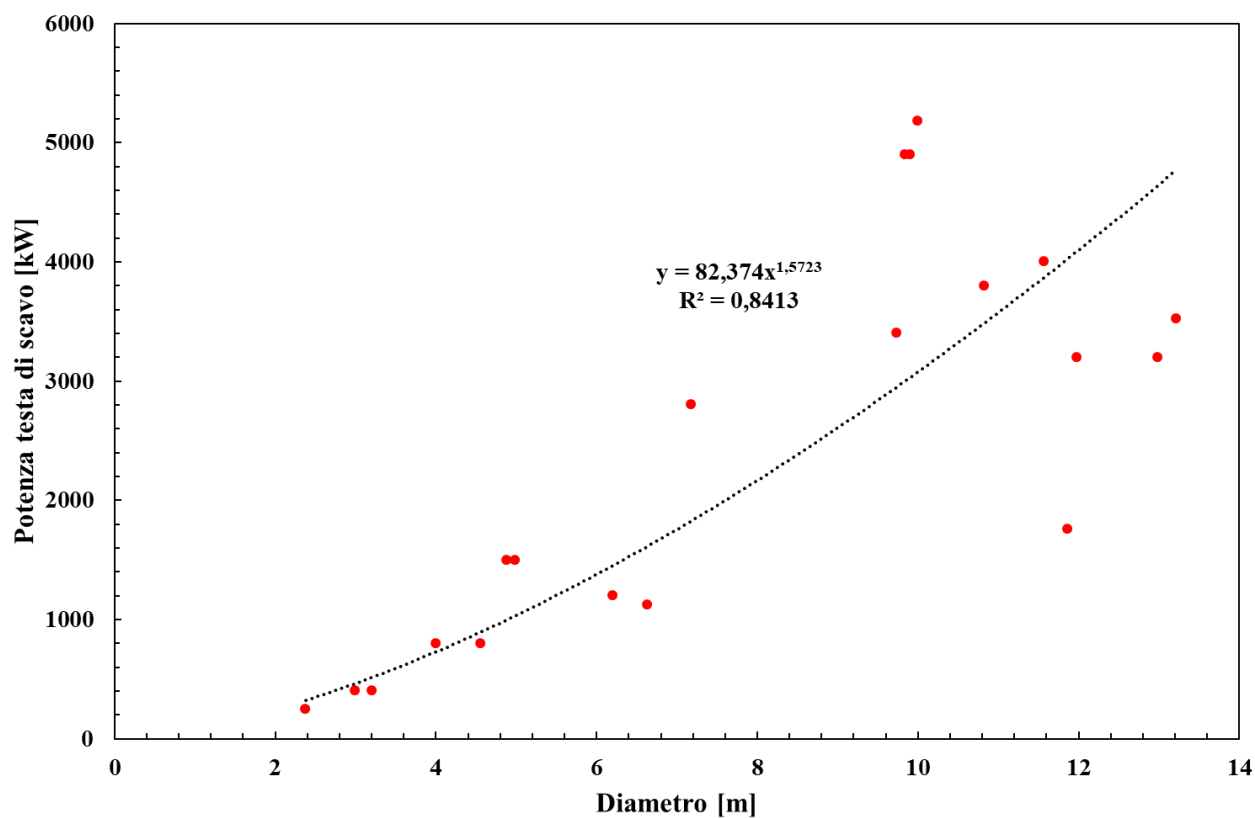


Figura 3.34: Correlazione tra il diametro e la potenza fornita alla testa di scavo in formazioni rocciose con presenza di arenaria (TBM a singolo scudo)

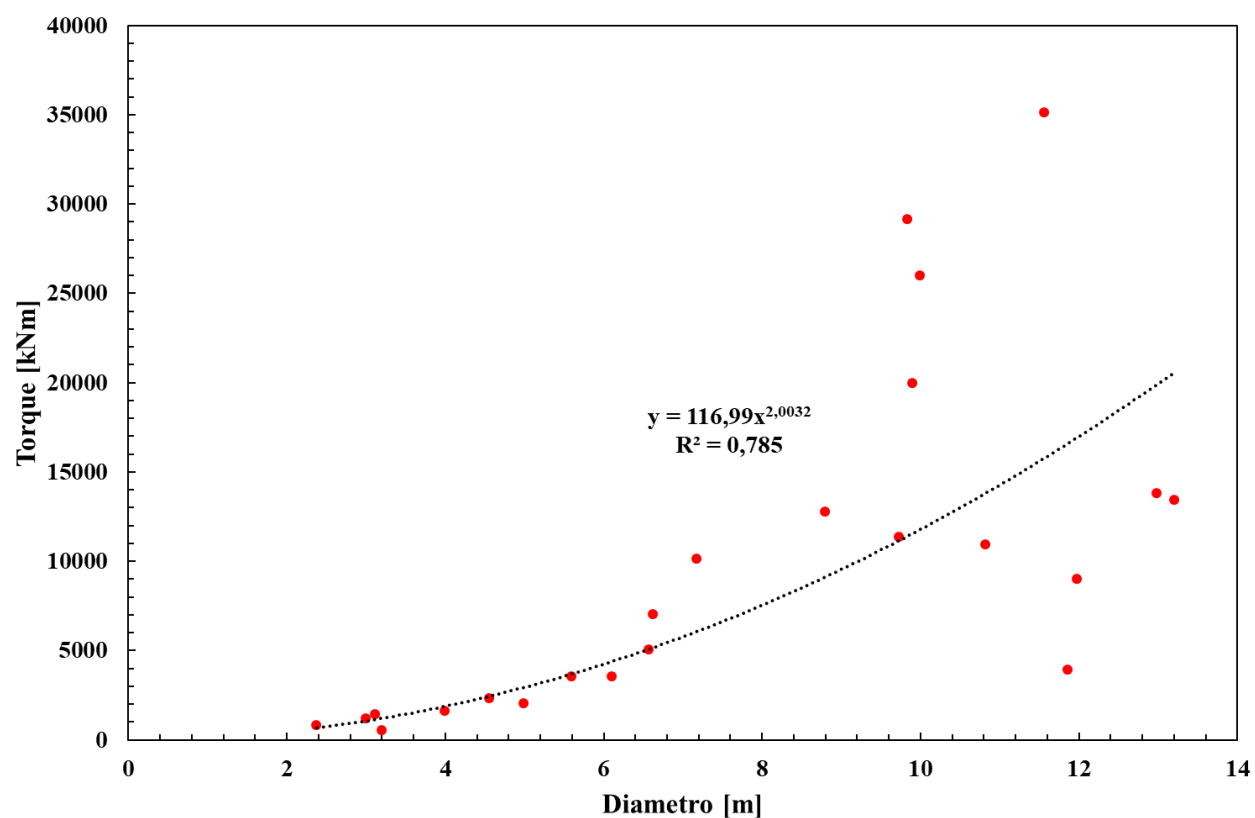


Figura 3.35: Correlazione tra il diametro e la coppia in formazioni rocciose con presenza di arenaria (TBM a singolo scudo)

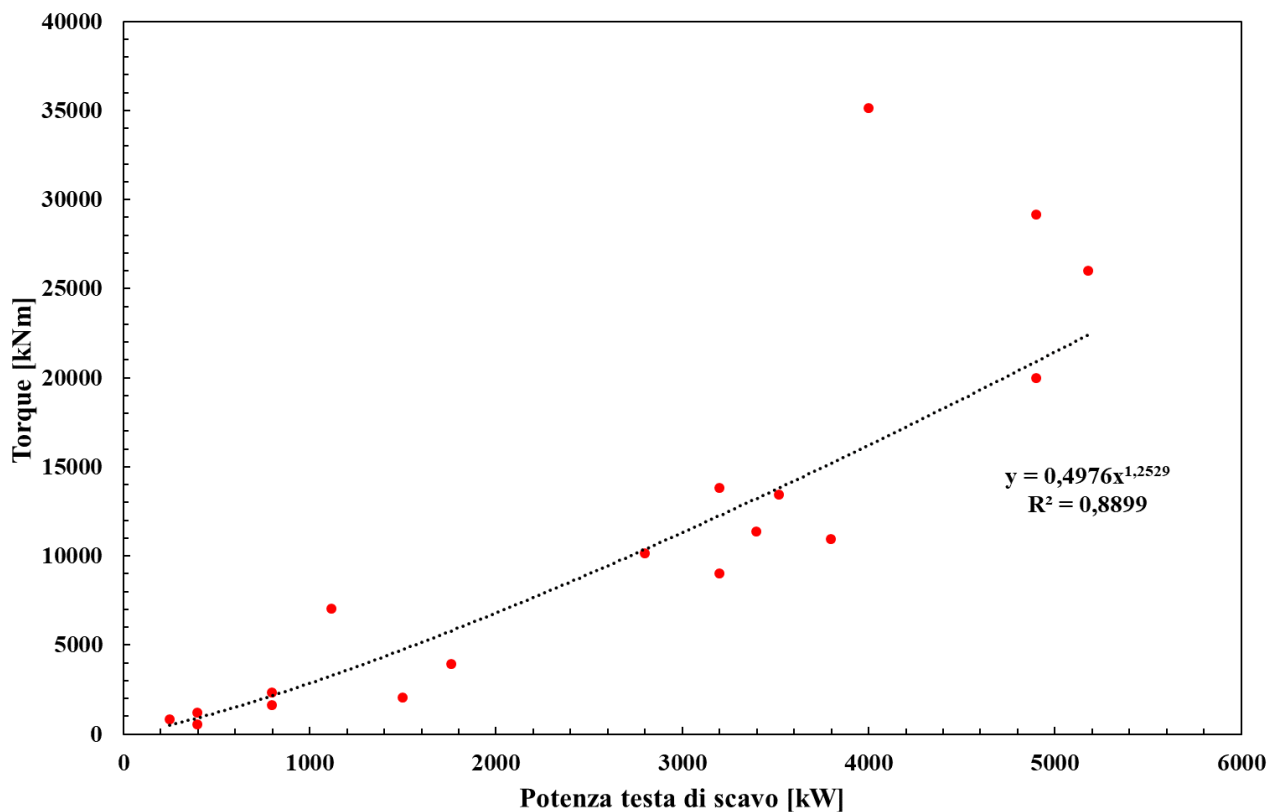


Figura 3.36: Correlazione tra la potenza fornita alla testa di scavo e la coppia in formazioni rocciose con presenza di arenaria (TBM a singolo scudo)

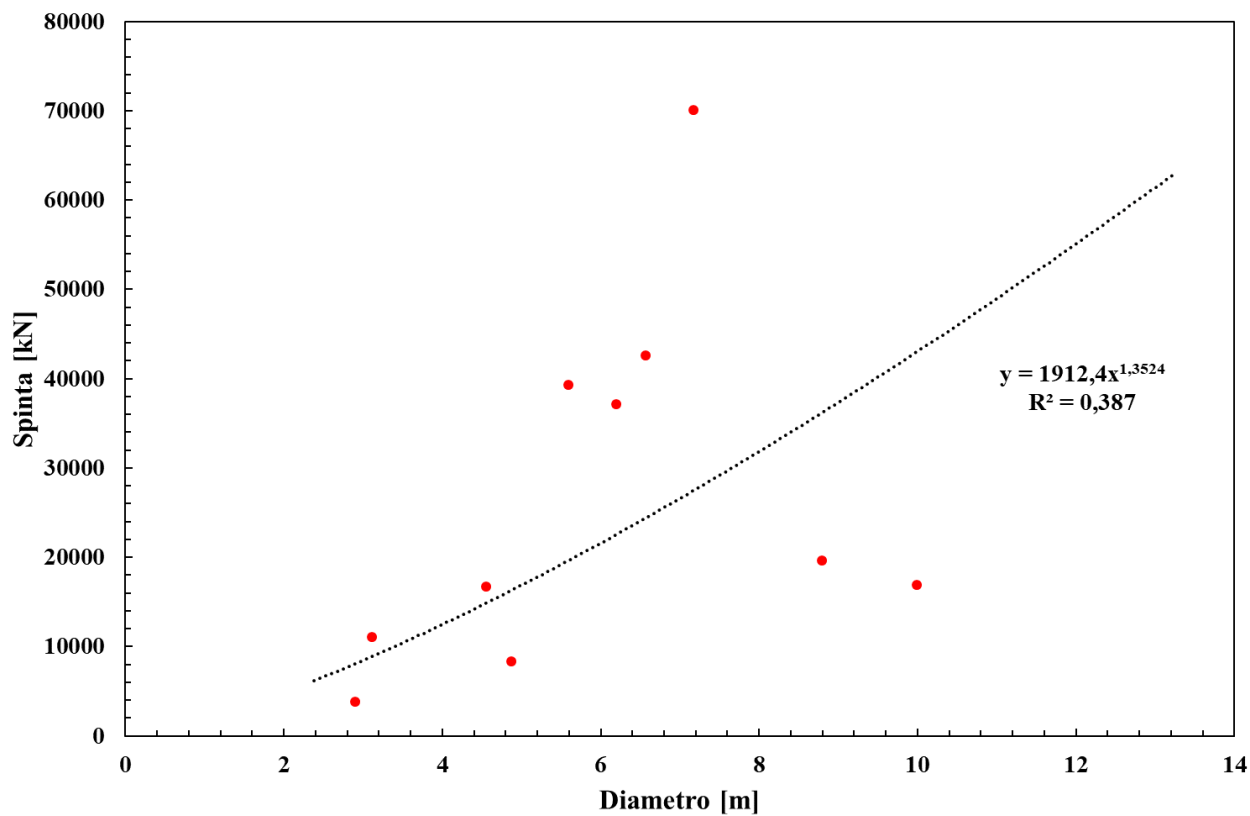


Figura 3.37: Correlazione tra il diametro e la spinta in formazioni rocciose con presenza di arenaria (TBM a singolo scudo)

✓ *Calcare*

Si riportano nel seguito i risultati dell'analisi delle correlazioni tra i parametri meccanici di TBM a singolo scudo, impiegate nello scavo di formazioni rocciose contenenti calcare. Nel grafico di figura 3.38 si osserva l'andamento della potenza fornita alla testa di scavo in funzione del diametro della macchina; i punti sperimentali sono approssimati da una funzione di potenza ($R^2=0,7858$).

Il diametro e la spinta (Figura 3.39) sono invece poco correlati e i dati sperimentali appaiono dispersi, ad indicazione della variabilità delle rocce attraversate nello scavo nei vari casi esaminati. Si effettua, comunque, il fitting dei punti sperimentali utilizzando una funzione di potenza ($R^2=0,5187$).

Infine, si evidenziano elevate correlazioni tra il diametro e la coppia (Figura 3.40) e tra la potenza fornita alla testa di scavo e la coppia (Figura 3.41).

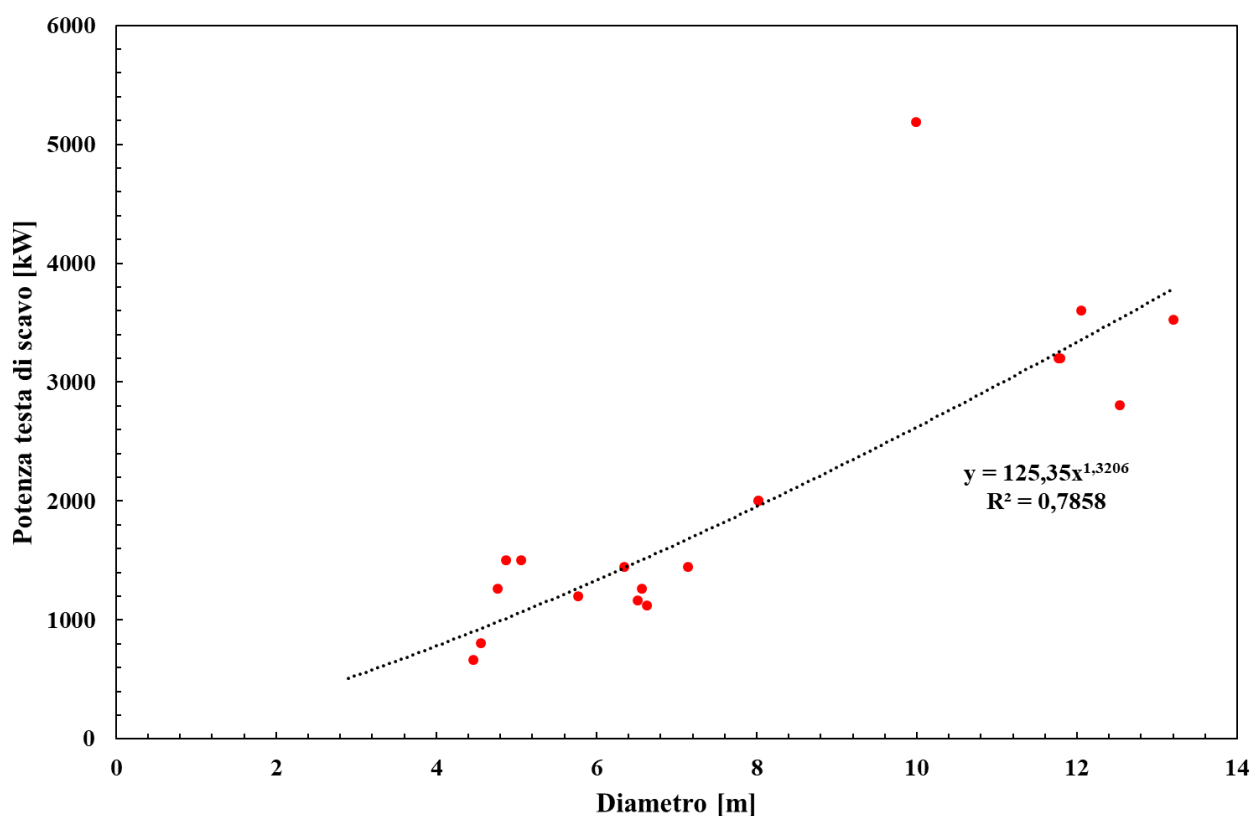


Figura 3.38: Correlazione tra il diametro e la potenza fornita alla testa di scavo in formazioni rocciose con presenza di calcare (TBM a singolo scudo)

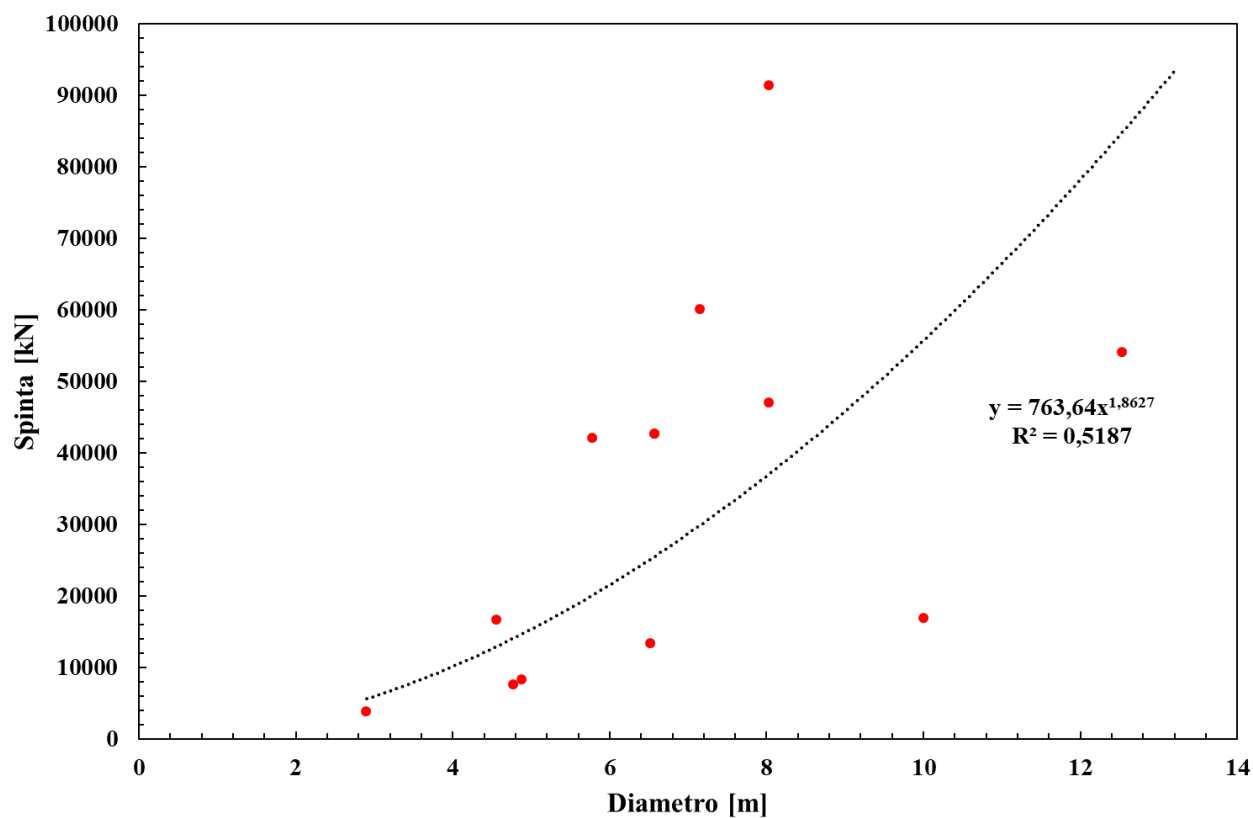


Figura 3.39: Correlazione tra il diametro e la spinta in formazioni rocciose con presenza di calcare (TBM a singolo scudo)

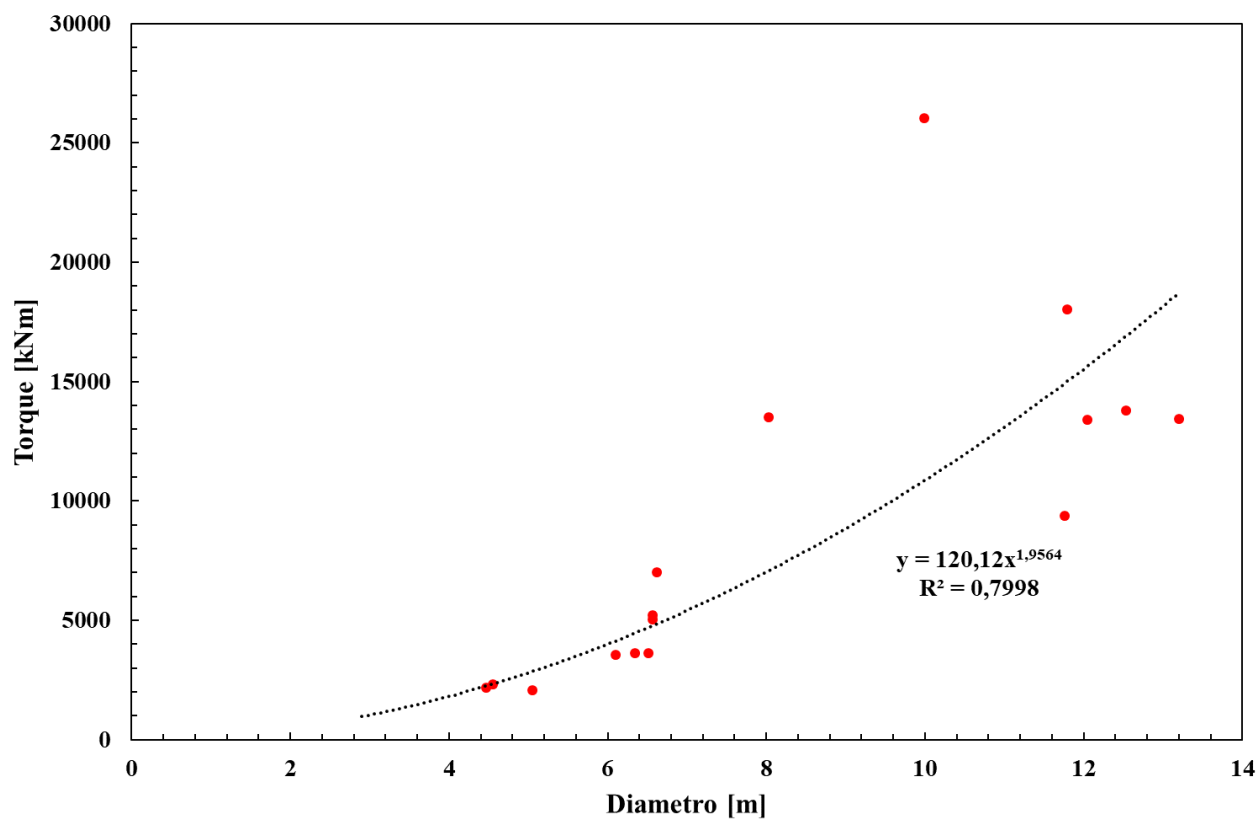


Figura 3.40: Correlazione tra il diametro e la coppia in formazioni rocciose con presenza di calcare (TBM a singolo scudo)

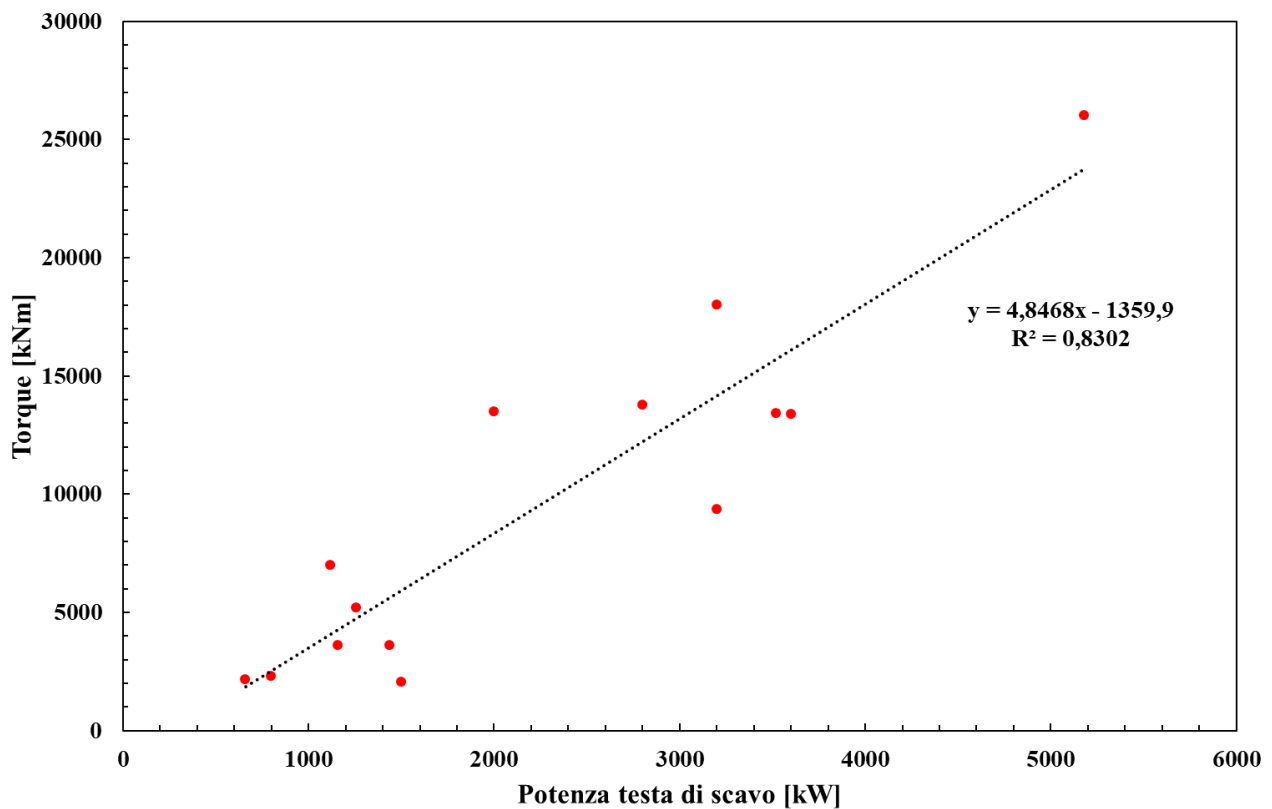


Figura 3.41: Correlazione tra la potenza fornita alla testa di scavo e la coppia in formazioni rocciose con presenza di calcare (TBM a singolo scudo)

✓ *Scisto*

Per quanto riguarda l'analisi dei dati circa lo scavo in roccia scistosa mediante TBM a singolo scudo, è stato possibile valutare solo la correlazione tra il diametro e la coppia (Figura 3.42) espressa da una funzione di potenza con coefficiente R^2 pari a 0,8992.

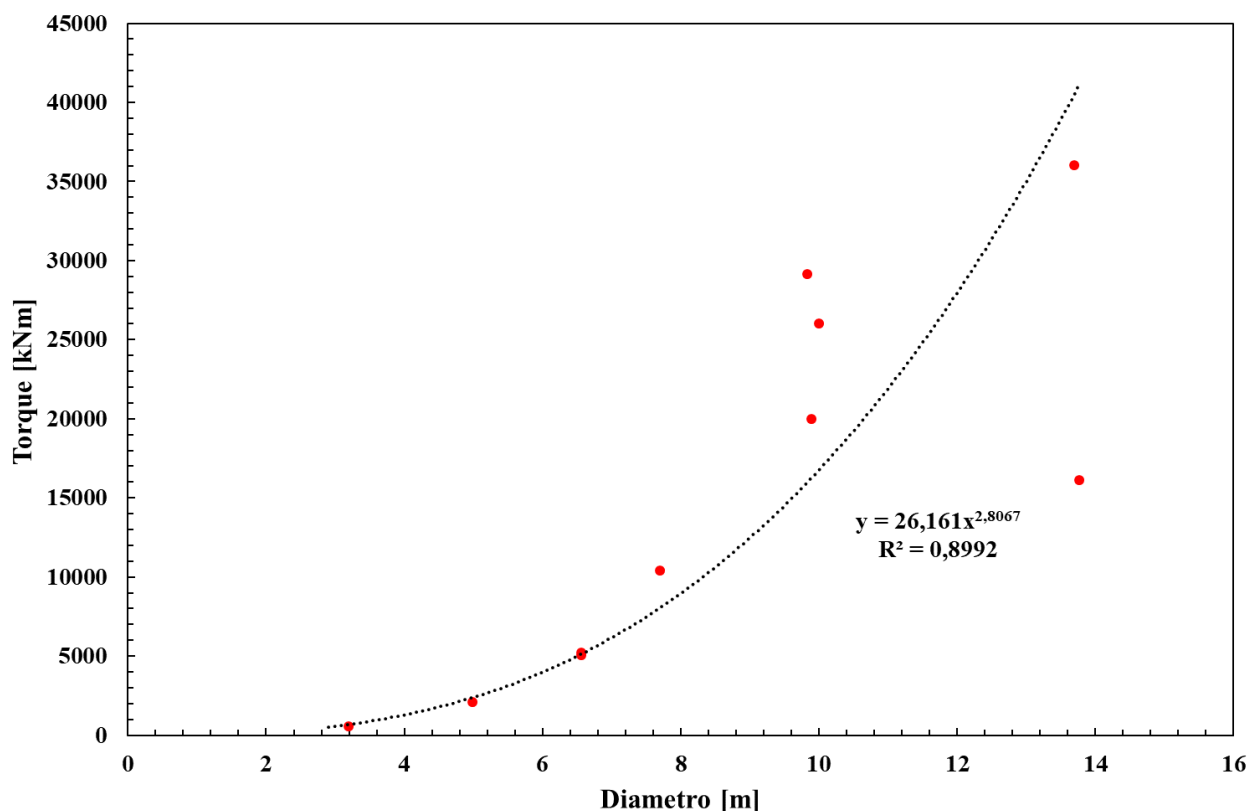


Figura 3.42: Correlazione tra il diametro e la coppia in formazioni rocciose con presenza di roccia scistosa (TBM a singolo scudo)

TBM a doppio scudo

✓ **Granito**

Dall'analisi delle correlazioni tra i parametri meccanici di TBM a doppio scudo impiegate in ammassi rocciosi granitici, è stato possibile ricavare le correlazioni tra il diametro e la potenza fornita alla testa di scavo (Figura 3.43) e tra il diametro e la coppia (Figura 3.44). Nel primo caso, i 13 dati sperimentali sono stati approssimati da una funzione lineare ($R^2 = 0,9114$), mentre nel secondo caso la funzione di regressione è una potenza ($R^2 = 0,7645$). In entrambi i casi la bassa dispersione dei dati lascia intendere che sono stati analizzati scavi di gallerie in formazioni rocciose aventi un comportamento geomeccanico analogo.

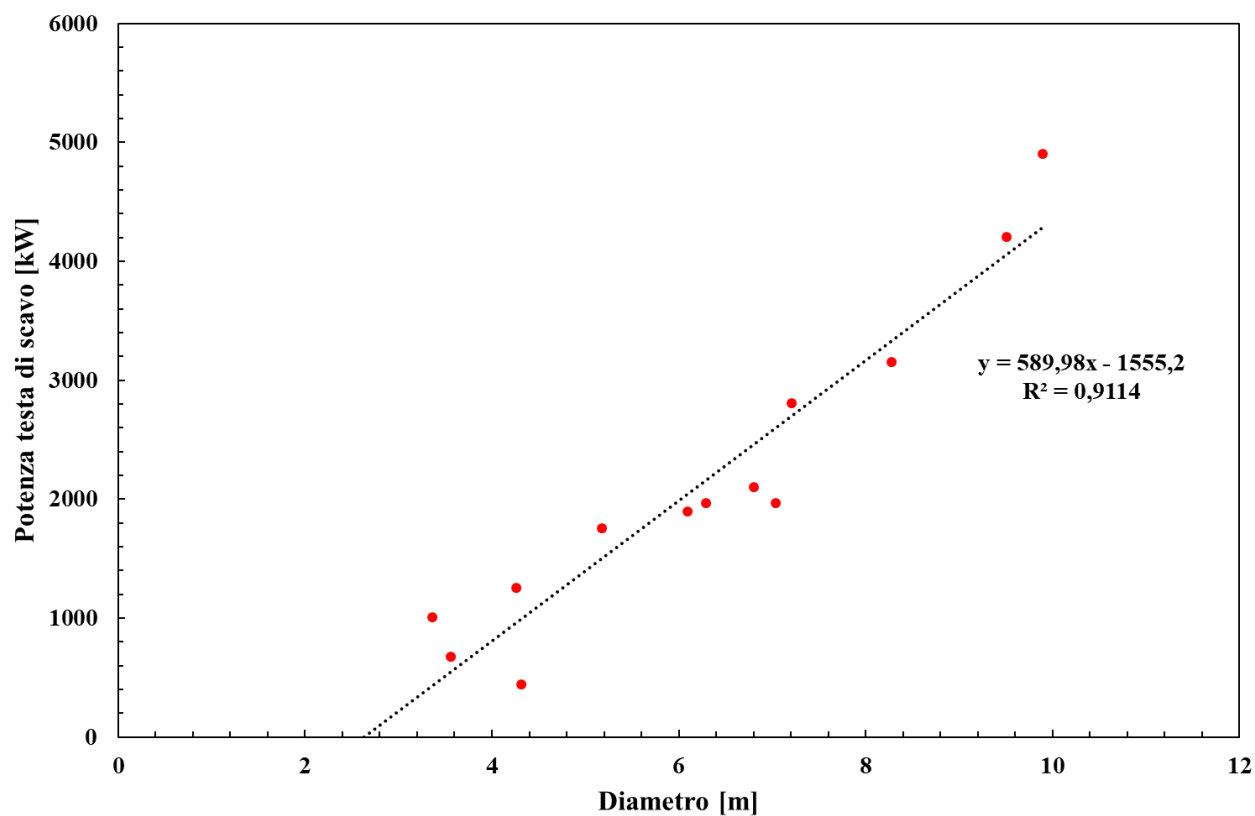


Figura 3.43: Correlazione tra il diametro e la potenza fornita alla testa di scavo in formazioni rocciose con presenza di granito (TBM a doppio scudo)

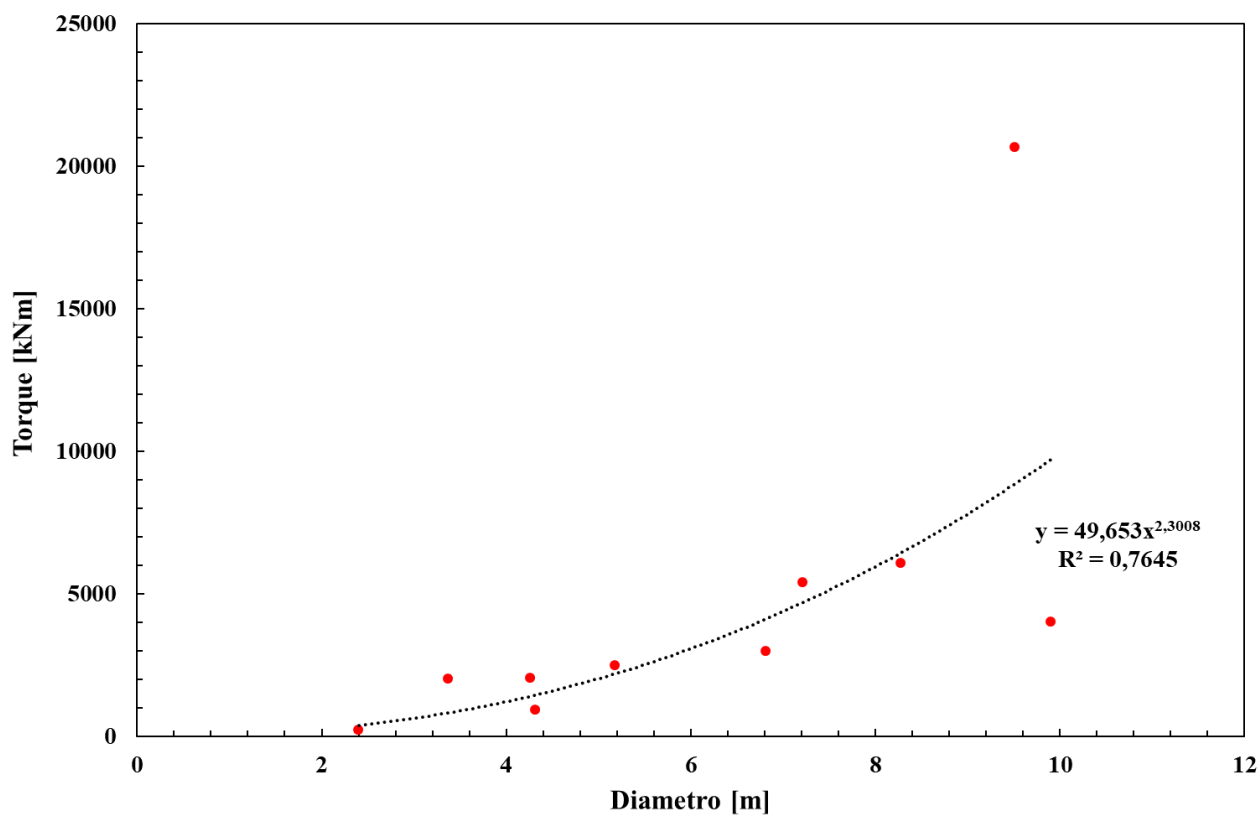


Figura 3.44: Correlazione tra il diametro e la coppia in formazioni rocciose con presenza di granito (TBM a doppio scudo)

✓ *Arenaria*

Le correlazioni fra i parametri meccanici di TBM a doppio scudo in arenaria risultano molto elevate. In figura 3.45 si riporta l'andamento della potenza fornita alla testa di scavo in funzione del diametro, rappresentato da una equazione lineare con coefficiente R^2 pari a 0,9166.

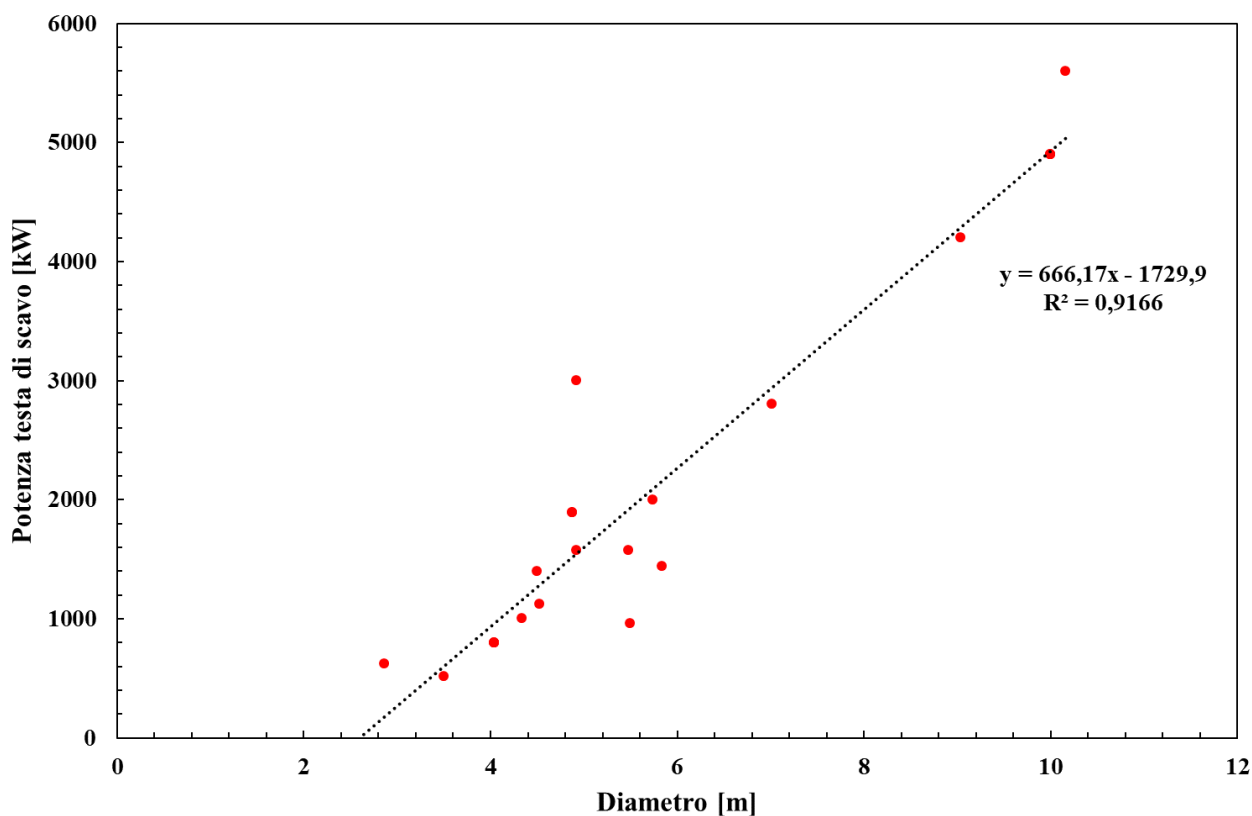


Figura 3.45: Correlazione tra il diametro e la potenza fornita alla testa di scavo in formazioni rocciose con presenza di arenaria (TBM a doppio scudo)

La funzione di regressione che correla il diametro e la spinta è un'esponenziale (Figura 3.46), che approssima molto bene i punti sperimentali per diametri compresi tra 2 e 6 m. Con un diametro pari a 10 m, si individuano invece tre valori di spinta molto diversi tra loro.

In figura 3.47 si riporta l'andamento della coppia in funzione del diametro. I due parametri sono ben correlati ed i punti sperimentali si distribuiscono perfettamente secondo una funzione di potenza ($R^2 = 0,942$). Il dominio dei diametri è compreso tra 2 e 10 m, mentre il momento torcente varia tra 200 e 23000 kNm. Si evidenzia l'esistenza di un solo punto sperimentale "anomalo", rappresentato da una macchina a doppio scudo avente diametro di 10 m e coppia maggiore di 40000 kNm.

Gli ultimi casi analizzati riguardano l'andamento della coppia in funzione della spinta (Figura 3.48), della coppia in funzione della potenza fornita alla testa di scavo (Figura 3.49) e della spinta in funzione della potenza fornita alla testa fresante (Figura 3.50).

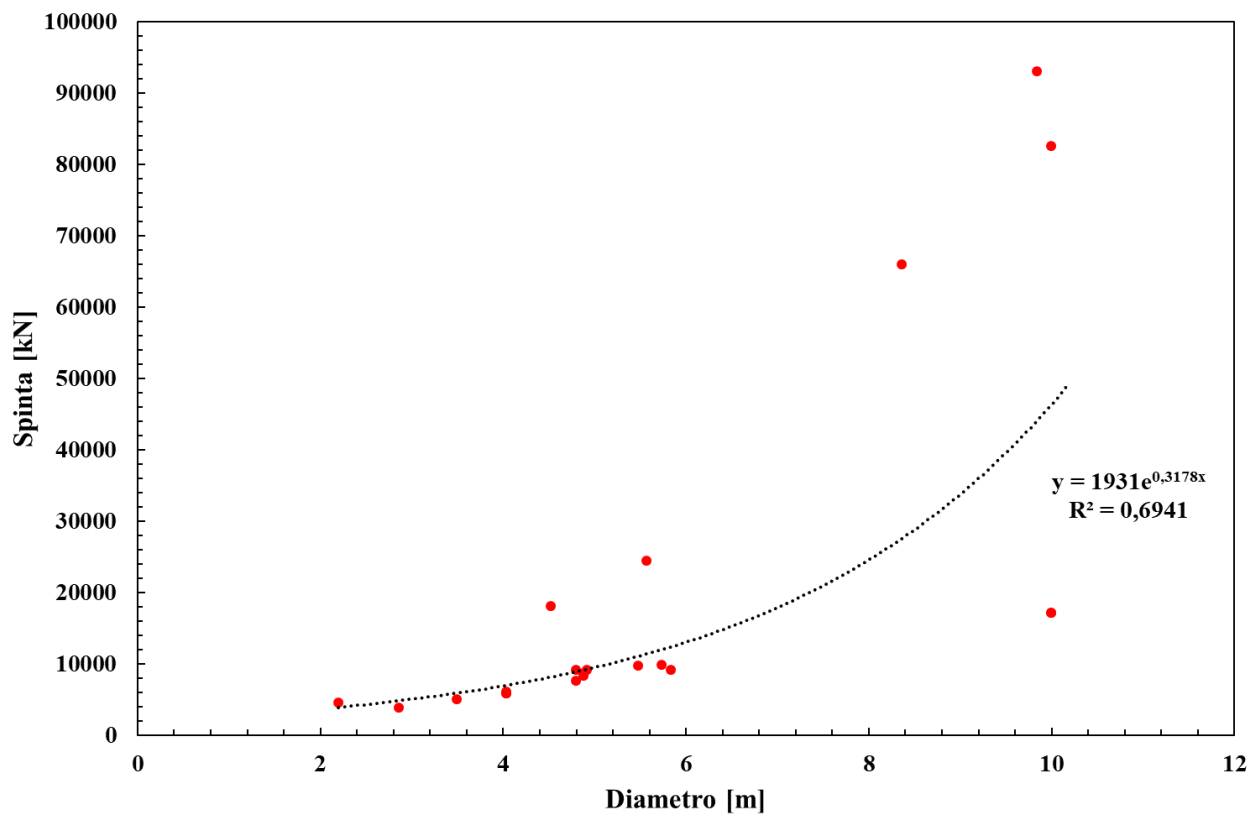


Figura 3.46: Correlazione tra il diametro e la spinta in formazioni rocciose con presenza di arenaria (TBM a doppio scudo)

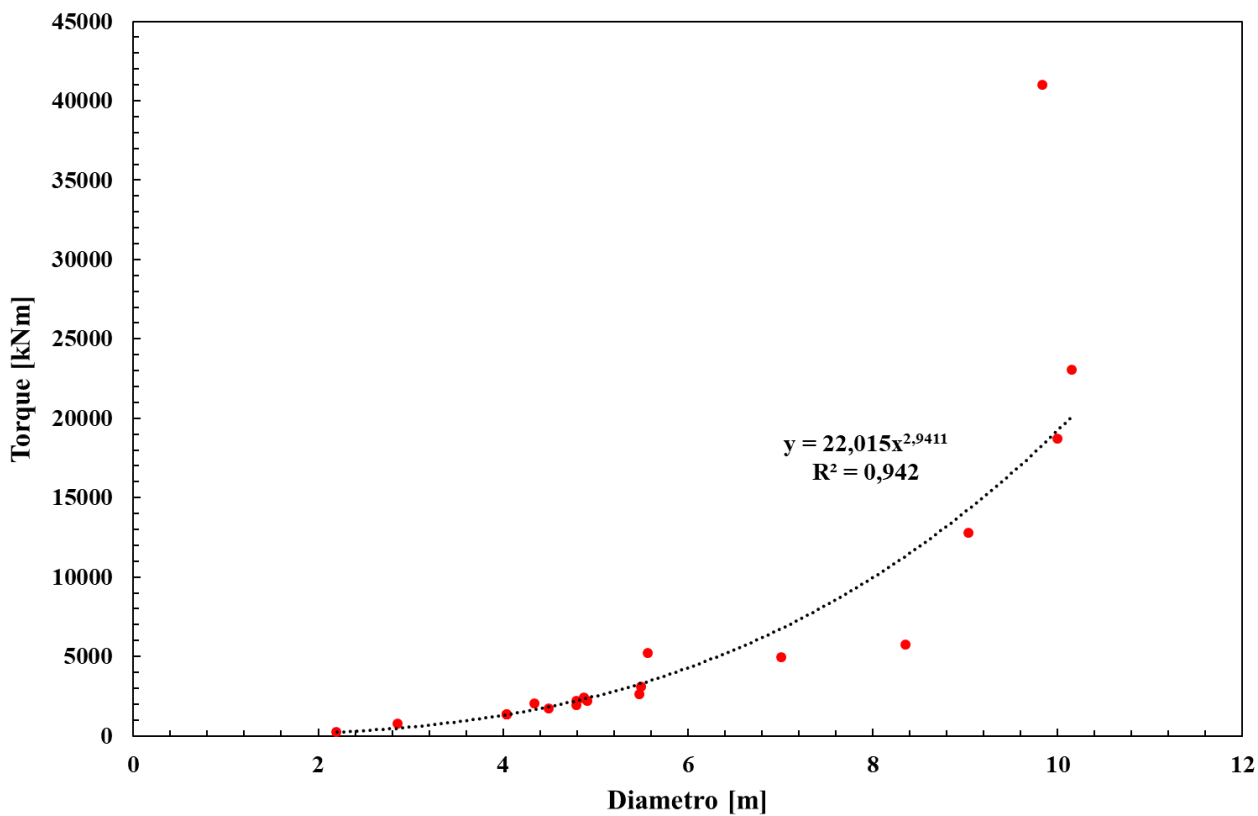


Figura 3.47: Correlazione tra il diametro e la coppia in formazioni rocciose con presenza di arenaria (TBM a doppio scudo)

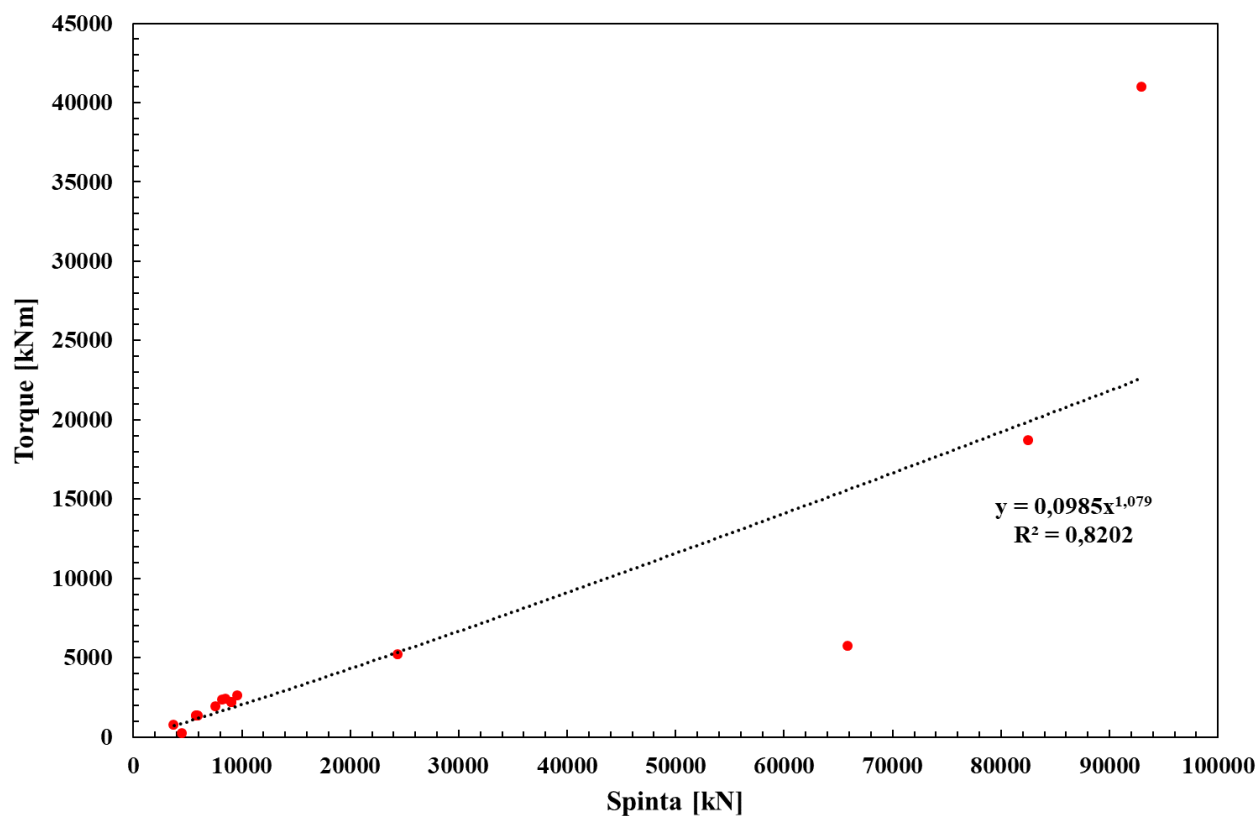


Figura 3.48: Correlazione tra la spinta e la coppia in formazioni rocciose con presenza di arenaria (TBM a doppio scudo)

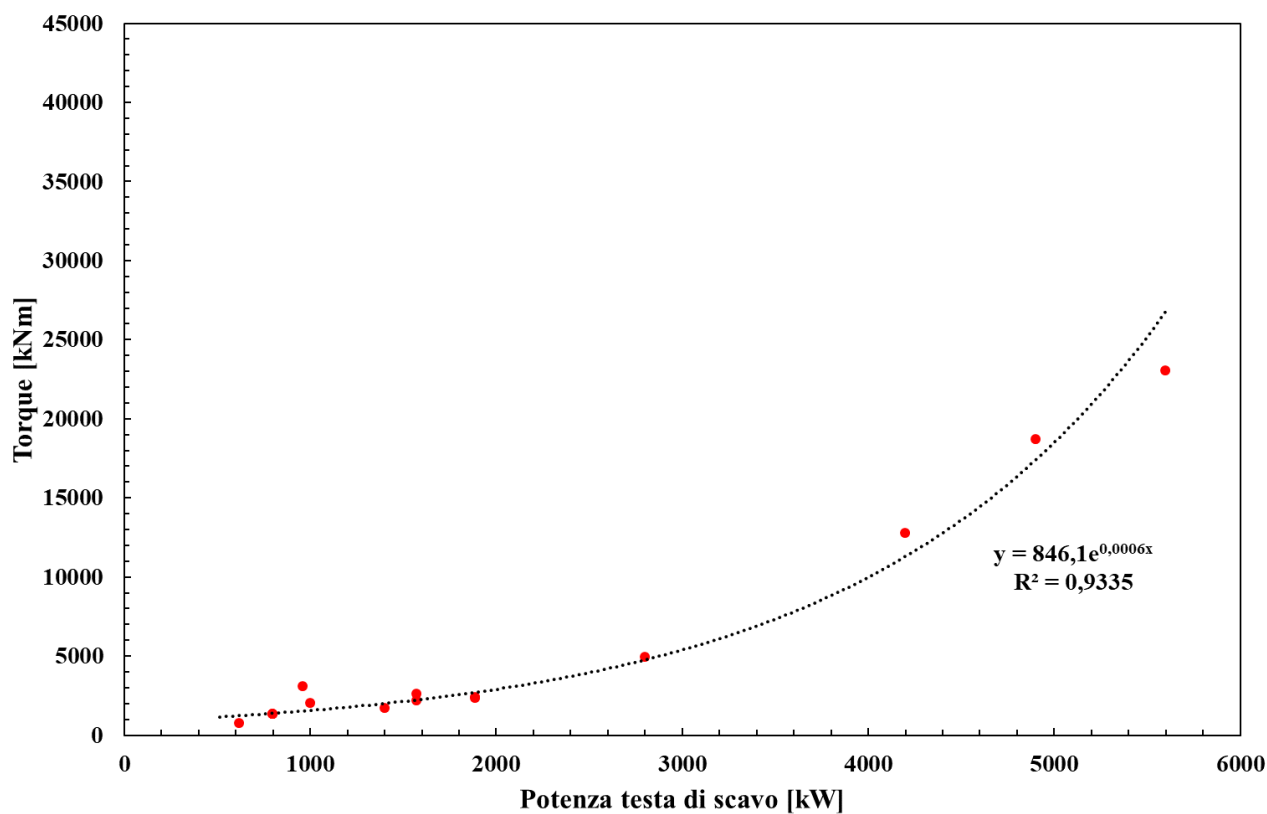


Figura 3.49: Correlazione tra la potenza fornita alla testa di scavo e la coppia in formazioni rocciose con presenza di arenaria (TBM a doppio scudo)

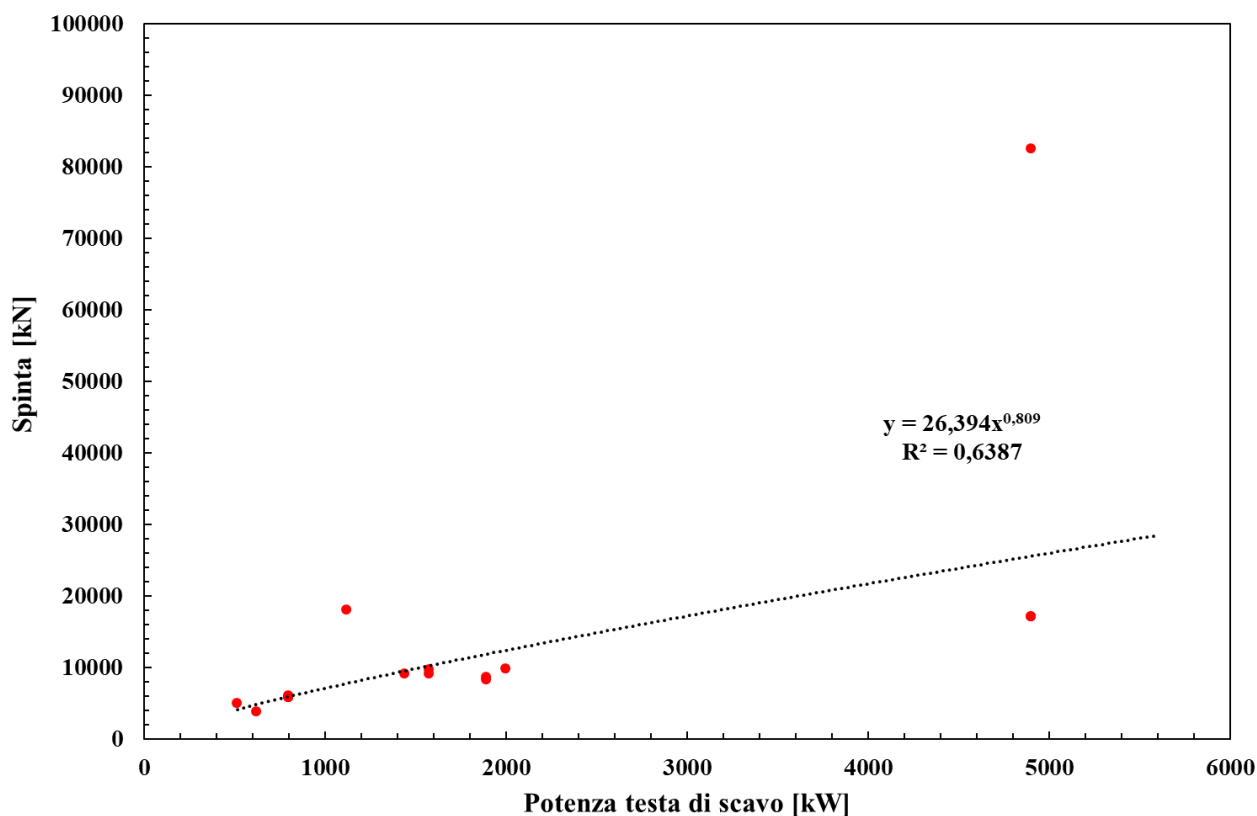


Figura 3.50: Correlazione tra la potenza fornita alla testa di scavo e la spinta in formazioni rocciose con presenza di arenaria (TBM a doppio scudo)

✓ *Calcare*

Come nelle formazioni rocciose contenenti arenaria, anche in quelle calcaree si individuano delle buone correlazioni tra i parametri meccanici delle TBM a doppio scudo. Le uniche eccezioni sono rappresentate dalla spinta in funzione del diametro e dalla spinta in funzione della potenza, in cui gli indici R^2 sono minori di 0,5. L'andamento della potenza fornita alla testa di scavo in funzione del diametro della macchina è lineare ($R^2 = 0,627$) (Figura 3.51).

In figura 3.52 si osserva l'andamento della spinta in funzione del diametro, espresso da una funzione di potenza ($R^2=0,4563$). Ottime correlazioni si osservano invece fra il diametro e la coppia (Figura 3.53), la spinta e la coppia (Figura 3.54) e la potenza fornita alla testa di scavo e la coppia (Figura 3.55). Il grafico di figura 3.53 mostra un'ottima approssimazione punti sperimentali mediante una regressione esponenziale, con scarto molto piccolo ed il parametro R^2 elevato e pari a 0,9067. In figura 3.54 si riporta invece l'andamento della coppia in funzione della spinta, rappresentato da una funzione lineare con R^2 uguale a 0,9495. Tutti i punti sperimentali, ad eccezione di uno, mostrano valori di spinta minori di 30000 kN e coppie minori di 6000 kNm.

Le correlazioni tra la potenza fornita alla testa di scavo e la coppia (Figura 3.55) e tra la potenza fornita alla testa fresante e la spinta (Figura 3.56) sono invece espresse da due funzioni esponenziali: nel primo caso il coefficiente R^2 è uguale a 0,7838, nel secondo caso è uguale a 0,4899.

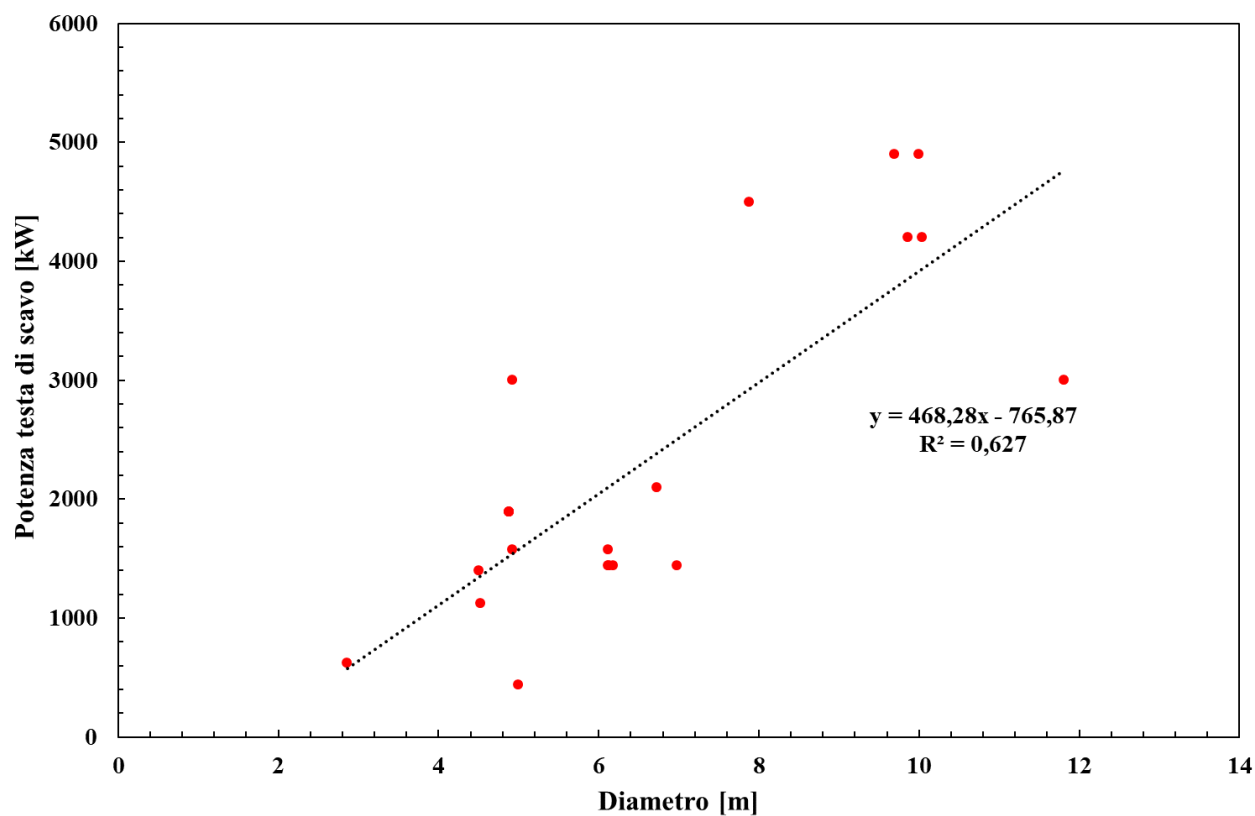


Figura 3.51: Correlazione tra il diametro e la potenza fornita alla testa di scavo in formazioni rocciose con presenza di calcare (TBM a doppio scudo)

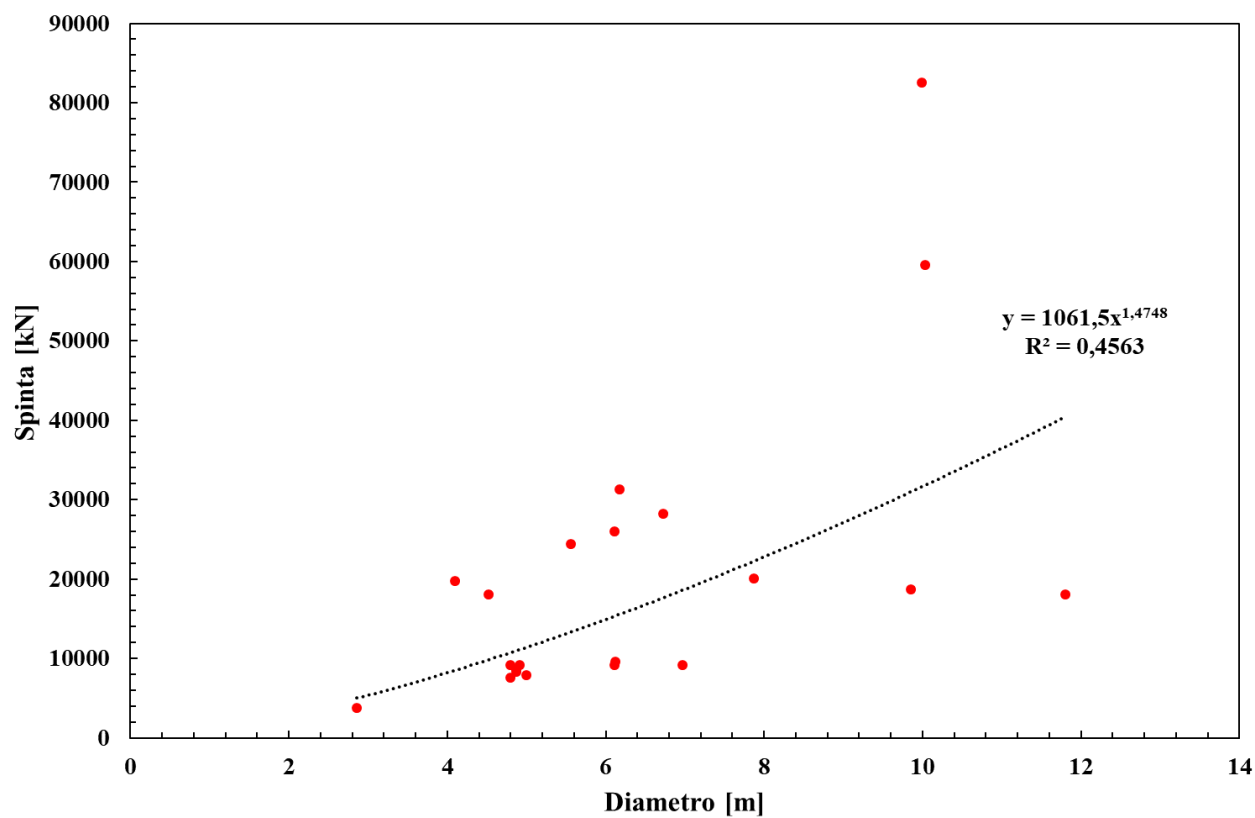


Figura 3.52: Correlazione tra il diametro e la spinta in formazioni rocciose con presenza di calcare (TBM a doppio scudo)

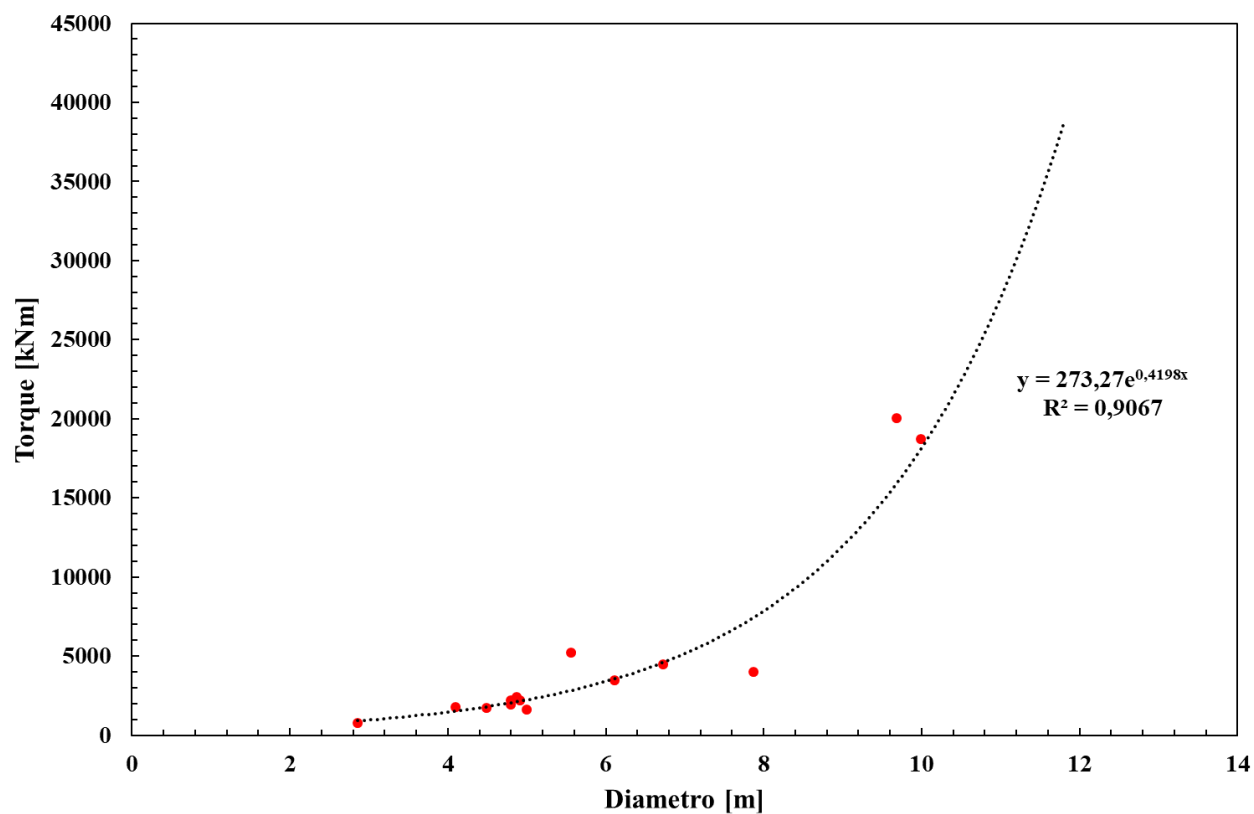


Figura 3.53: Correlazione tra il diametro e la coppia in formazioni rocciose con presenza di calcare (TBM a doppio scudo)

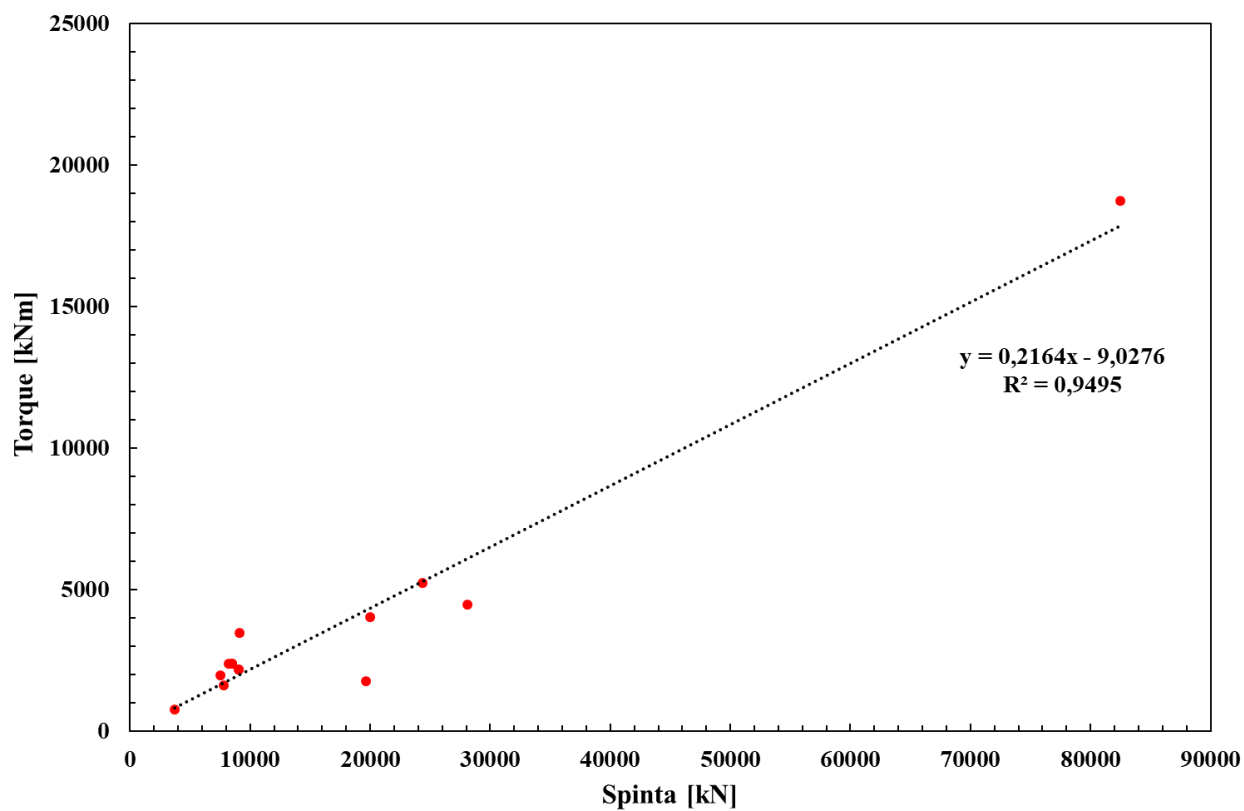


Figura 3.54: Correlazione tra la spinta e la coppia in formazioni rocciose con presenza di calcare (TBM a doppio scudo)

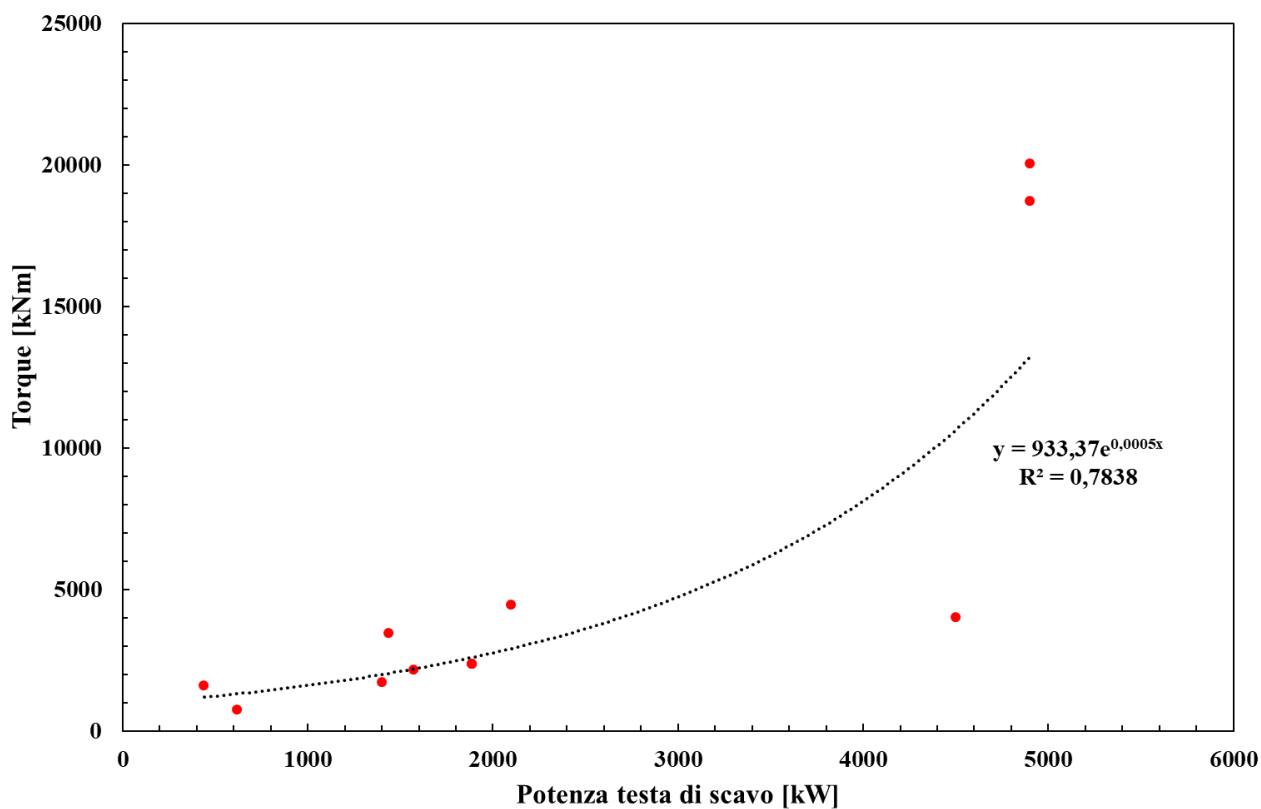


Figura 3.55: Correlazione tra la potenza fornita alla testa di scavo e la coppia in formazioni rocciose con presenza di calcare (TBM a doppio scudo)

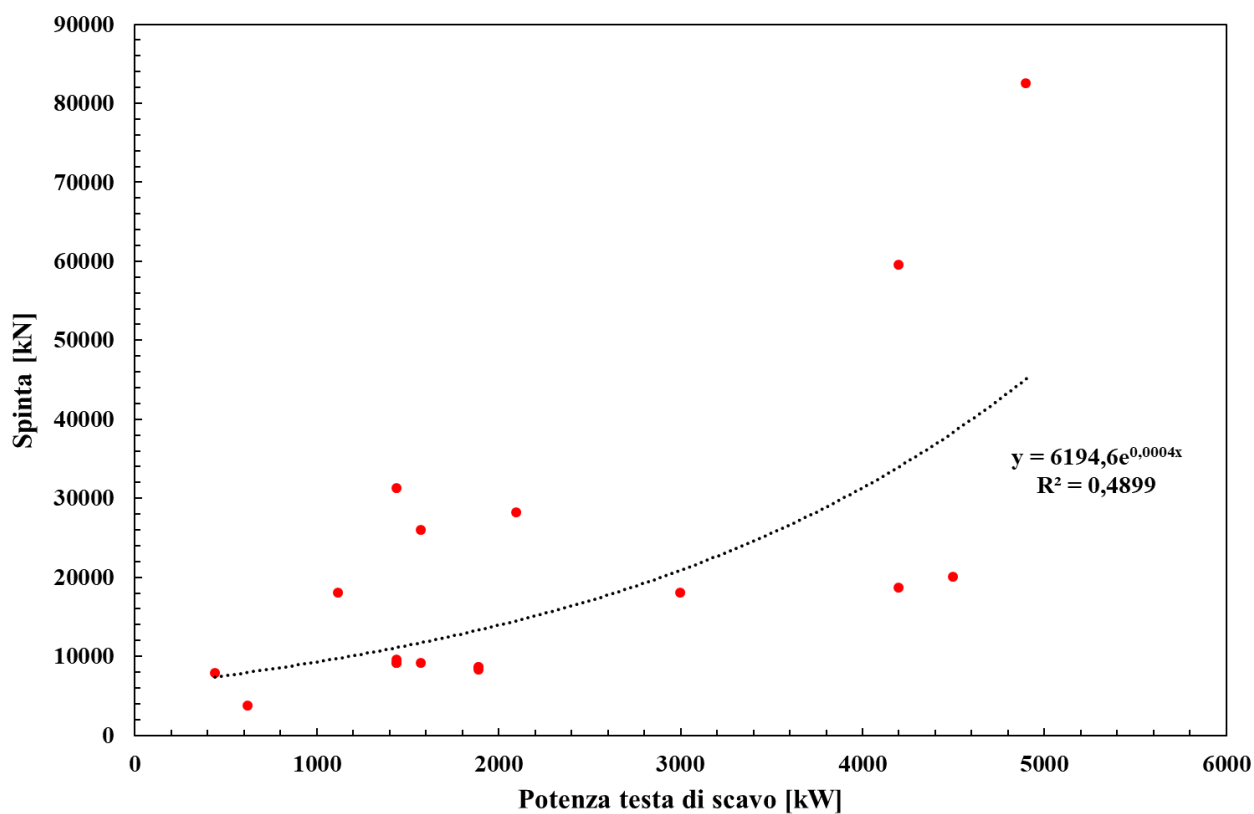


Figura 3.56: Correlazione tra la potenza fornita alla testa di scavo e la spinta in formazioni rocciose con presenza di calcare (TBM a doppio scudo)

✓ *Scisto*

Infine, sono state analizzate le correlazioni tra i parametri meccanici di TBM a doppio scudo impiegate in formazioni rocciose scistose. In particolare, sono stati valutati i legami tra il diametro e la potenza fornita alla testa di scavo (Figura 3.57) e tra il diametro e la coppia (Figura 3.58). Nel primo caso la funzione di regressione è lineare ($R^2 = 0,8378$); i dati sperimentali si concentrano principalmente in un intervallo di diametri compreso tra 3 e 8 m, cui corrispondono valori di potenza tra 200 e 2500 kW. Si individuano, inoltre, due punti isolati per un diametro di 10 m, cui sono associati due valori di potenza maggiori di 4 MW. Nel secondo caso, in figura 3.58, si riporta l'andamento esponenziale del momento torcente in funzione del diametro ($R^2=0,892$). Si evidenzia che in entrambi i casi lo scarto rispetto alla media è piccolo.

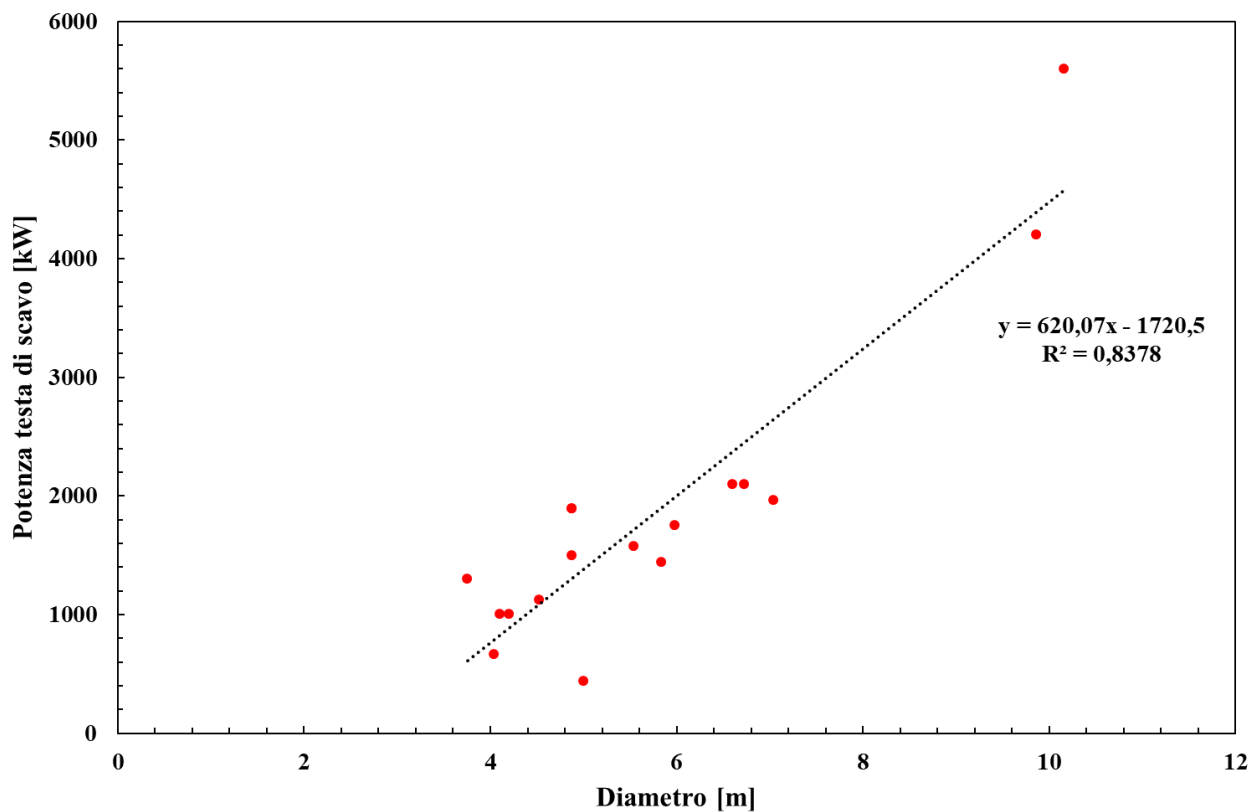


Figura 3.57: Correlazione tra il diametro e la potenza fornita alla testa di scavo in formazioni rocciose con presenza di roccia scistosa (TBM a doppio scudo)

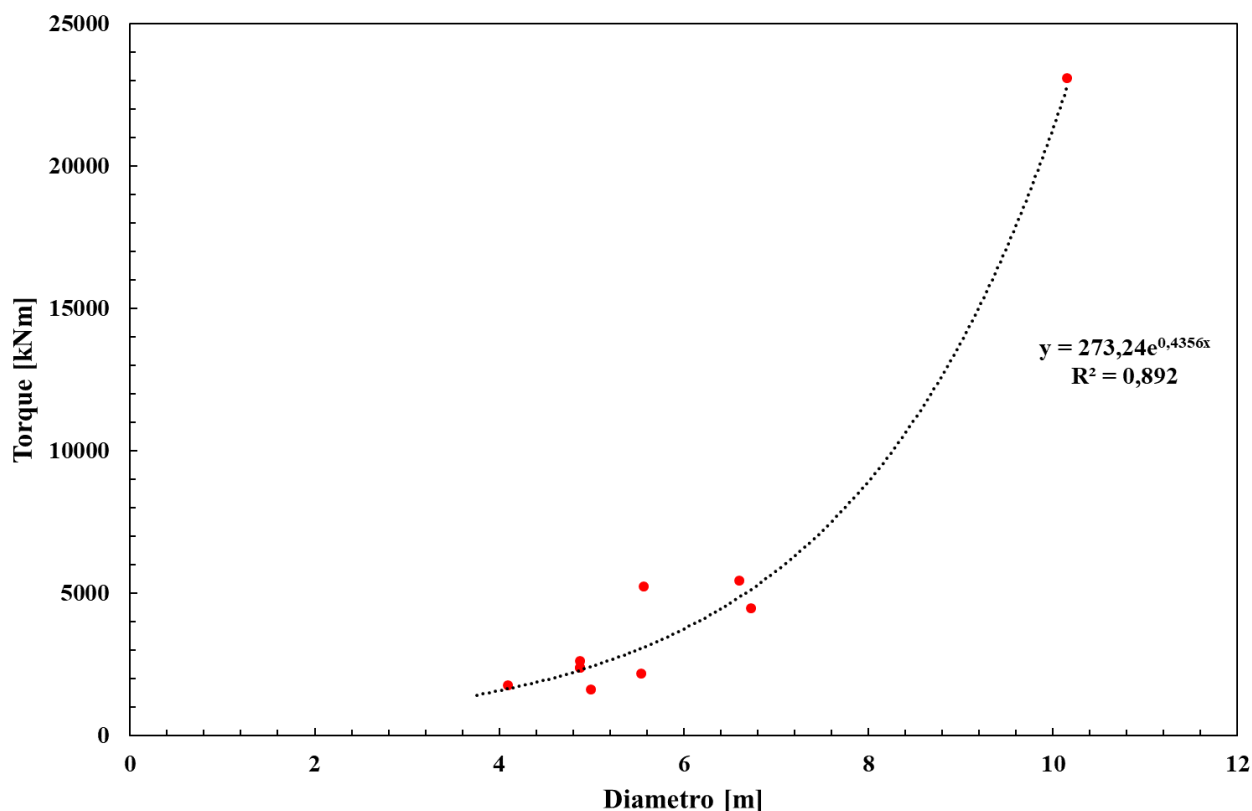


Figura 3.58: Correlazione tra il diametro e la coppia in formazioni rocciose con presenza di roccia scistosa (TBM a doppio scudo)

3.1.3 Confronto tra i risultati per tipologia di fresa

Nel seguito si propone un confronto tra i risultati ottenuti dall'analisi delle correlazioni tra i parametri delle TBM, comparando i legami trovati in funzione della tipologia di fresa. Ad ogni fresa è stato assegnato un colore differente: **rosso** per le TBM aperte, **blu** per le TBM a singolo scudo e **verde** per le TBM a doppio scudo.

In figura 3.59 si riporta l'andamento della potenza fornita alla testa di scavo in funzione del diametro della macchina per le tre tipologie di TBM. Come descritto al paragrafo precedente, il legame tra le due grandezze è lineare per le frese aperte ($R^2=0,6663$) e per quelle a doppio scudo ($R^2=0,7903$), mentre è espresso da una funzione di potenza per le frese a singolo scudo ($R^2=0,7833$). Si osserva che per diametri minori di 3 m non si dispone di un numero di dati sperimentali sufficiente ad effettuare un confronto significativo. Superata tale soglia, dal grafico in figura 3.59 si nota che per diametri compresi tra 3 e 5 m le funzioni di regressione delle TBM aperte e a doppio scudo coincidono: a parità di diametro (maggiore di 5 m), alle frese a doppio scudo viene fornita una potenza alla testa maggiore rispetto alle altre due tipologie di TBM; seguono le frese aperte ed infine le frese a singolo scudo. Analoghi risultati sono stati ottenuti nello studio effettuato da Park et Al. (2018), descritto al capitolo 2 (Caso studio II). Gli andamenti della potenza fornita alla testa di scavo in

funzione del diametro, per TBM aperta e a doppio scudo, sono anche in quel caso lineari ed il coefficiente R^2 è in entrambi i casi uguale a 0,6 (Figura 2.18). Inoltre, confrontando i grafici di figura 2.18, a parità di diametro, le frese a doppio scudo sono caratterizzate da valori di potenza fornita alla testa maggiore delle frese aperte. Gli autori non hanno invece potuto valutare il legame tra le due grandezze per TBM a singolo scudo, per mancanza di dati.

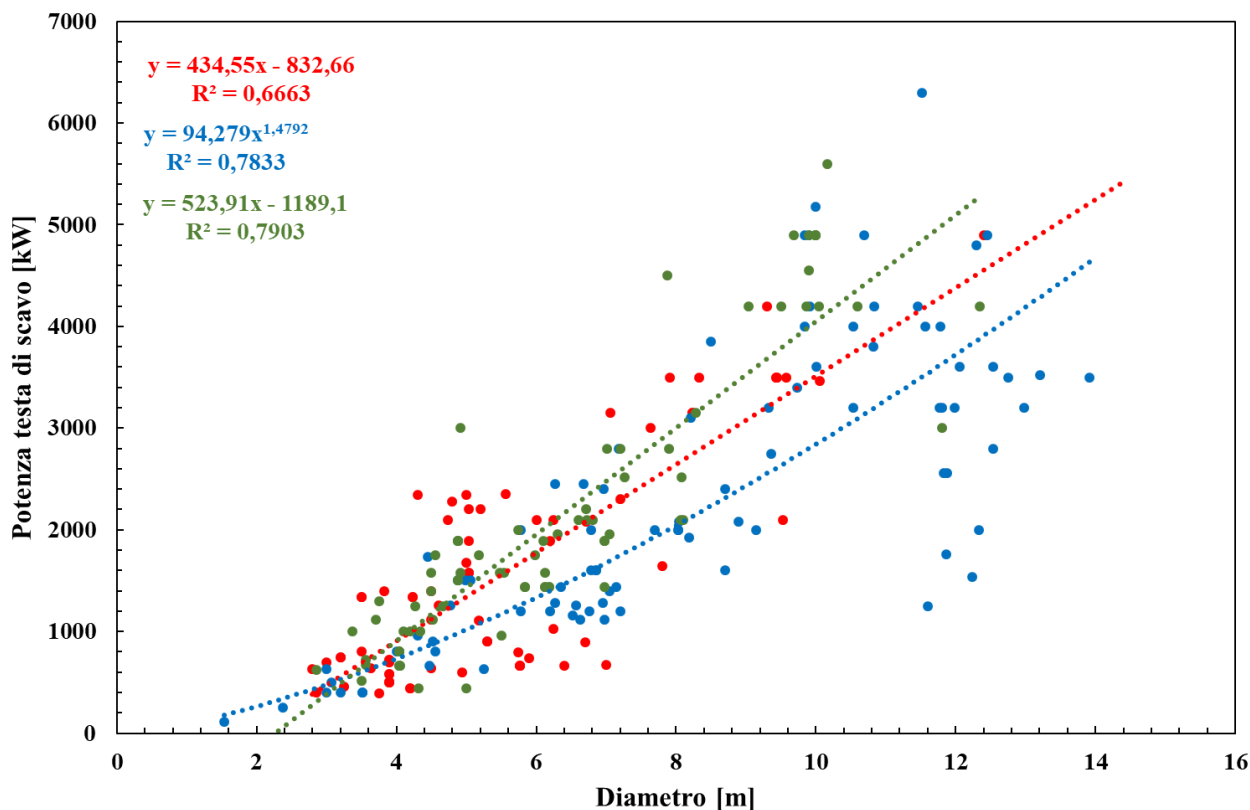


Figura 3.59: Correlazione tra il diametro e la potenza fornita alla testa di scavo nel caso di TBM aperta (**rosso**), TBM a singolo scudo (**blu**) e TBM a doppio scudo (**verde**)

In figura 3.60 si osserva invece l'andamento della coppia in funzione del diametro. In questo caso le correlazioni sono rappresentate da una funzione lineare, per quanto riguarda le TBM aperte, e da funzioni di potenza, nel caso di TBM a singolo e a doppio scudo.

I risultati sono in linea con quelli ottenuti da Ates et Al., 2014 (Caso studio I in Figura 2.9), mentre si rileva solo una forte analogia nella forma della funzione di regressione per TBM aperte nel caso studio II effettuato da Park et Al., 2018 (Figura 2.16). Focalizzando l'attenzione sul grafico di figura 3.60, si nota che in tutto il dominio, a parità di diametro, le frese a singolo scudo (curva **blu**) operano con un momento torcente più grande. Per diametri compresi tra 3 e 10 m l'andamento rappresentato in **rosso** (TBM aperte) e quello in **verde** (TBM a doppio scudo) praticamente coincidono. Superata la soglia dei 10 m, comincia a formarsi un gap che aumenta progressivamente al crescere del diametro, e di conseguenza, a parità di diametro, le TBM aperte lavorano con un momento torcente minore delle altre due tipologie di fresa a piena sezione.

Nel grafico di figura 2.9 si osserva che, scelto un determinato diametro, nell'intervallo compreso tra 7 e 12,5 m, le TBM a doppio scudo lavorano con una coppia alla testa di scavo più grande rispetto alle due tipologie di fresa (Ates et Al.,2014). Questa differenza rispetto al risultato riportato in figura 3.60, è da attribuire al basso numero di dati sperimentali relativi alle TBM a singolo scudo, analizzati da Ates et Al. nel 2014.

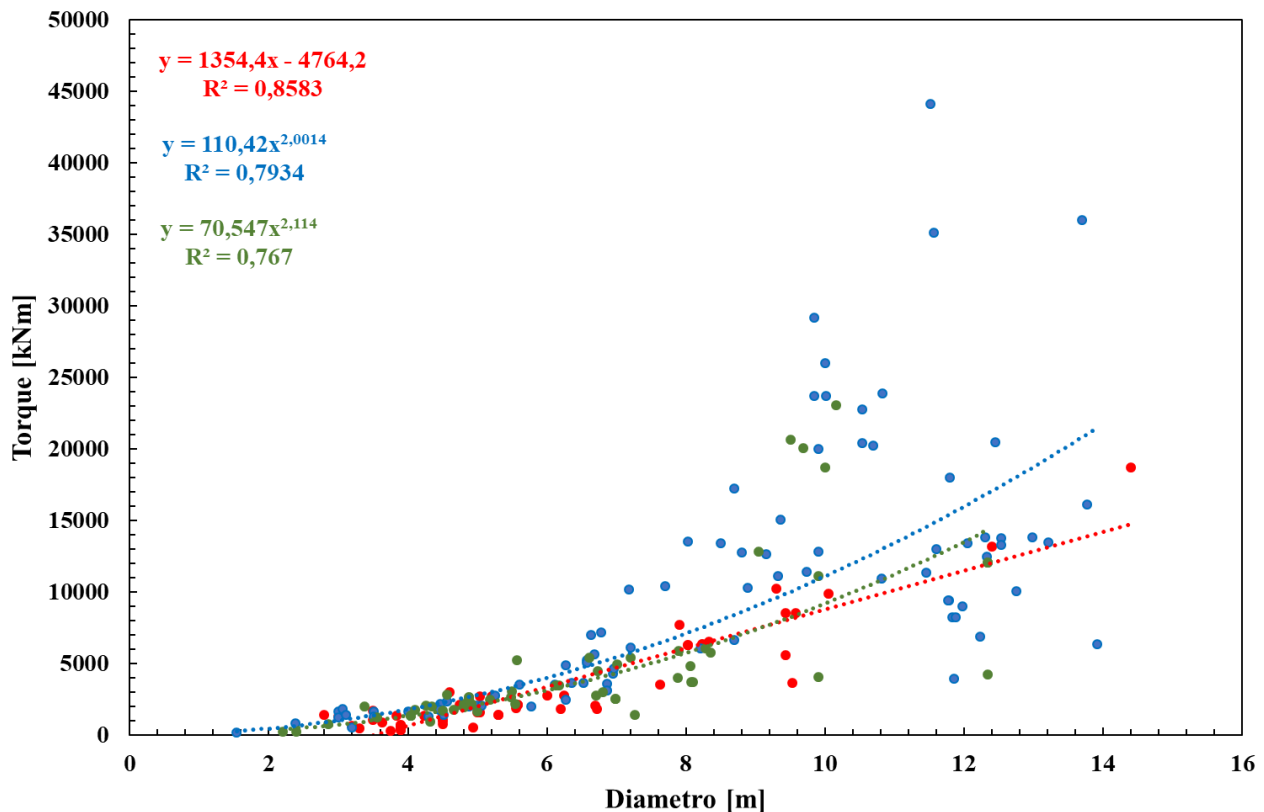


Figura 3.60: Correlazione tra il diametro e la coppia nel caso di TBM aperta (rosso), TBM a singolo scudo (blu) e TBM a doppio scudo (verde)

In figura 3.61 si riporta il grafico di confronto della correlazione tra il diametro e la spinta per le tre tipologie di fresa. Considerando l'intersezione dei domini delle tre funzioni ed esaminando, quindi, un intervallo dei diametri compreso tra 2 e 12,5 m, si nota che l'andamento rappresentato dalla curva blu (TBM a singolo scudo) si trova sempre al di sopra rispetto alle altre due funzioni. Per valori di diametro compresi tra 2 e 6 m, le curve che rappresentano l'andamento della spinta in funzione del diametro, per frese aperte e a doppio scudo, praticamente coincidono. Per valori maggiori di 6 m, a parità di diametro, la spinta esercitata dalle TBM a doppio scudo è maggiore di quella esercitata dalle TBM aperte. Tale spinta è inoltre tanto maggiore quanto maggiore è il diametro.

Esaminando la figura 2.10, si nota che la correlazione tra diametro e spinta per frese a singolo scudo è anche in questo caso espressa da una potenza, mentre le forme delle funzioni per frese aperte e a doppio scudo non coincidono con quelle riportate in figura 3.61. Si evidenzia inoltre che, in linea con quanto osservabile in figura 3.61, a parità di diametro e in particolare per diametri compresi tra 2 e

12,5 m, le TBM a singolo e a doppio scudo esercitano spinte maggiori delle TBM aperte per via degli attriti esistenti tra lo scudo e la roccia (Ates et Al., 2014). In figura 2.15, infine, si osserva che, l'andamento della spinta in funzione del diametro è lineare per le macchine a doppio scudo (Park et Al., 2018). Tale differenza rispetto al modello descritto in figura 3.61 è legata all'esiguo numero di dati processati (8) da Park et Al. (2018), oltre alla probabile differenza di caratteristiche geomeccaniche delle formazioni rocciose analizzate.

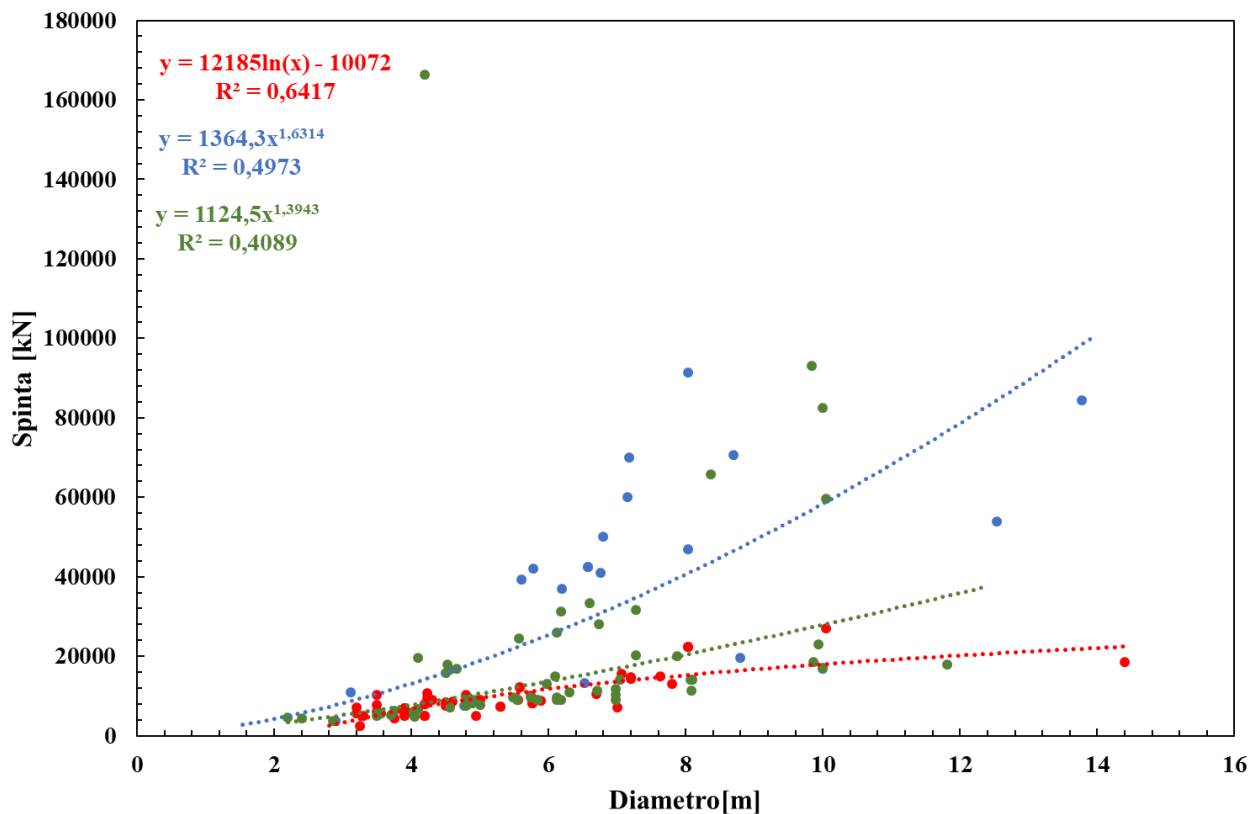


Figura 3.61: Correlazione tra il diametro e la spinta nel caso di TBM aperta (rosso), TBM a singolo scudo (blu) e TBM a doppio scudo (verde)

In figura 3.62 si osserva il confronto fra l'andamento della coppia in funzione della spinta per le tre tipologie di TBM. Le tre funzioni di regressione hanno diverso campo di appartenenza ed il confronto può essere effettuato solo per valori di spinta minori di 20 MN. In tale intervallo si nota che, a parità di spinta, le macchine a singolo scudo richiedono una coppia maggiore delle altre due tipologie di fresa, i cui andamenti si sovrappongono.

Dalla figura 2.11, in accordo con quanto riportato in figura 3.62, si può inoltre osservare che il legame tra spinta e coppia è lineare per TBM a singolo e a doppio scudo ed è invece espresso da una potenza per TBM aperte (Ates et Al., 2014).

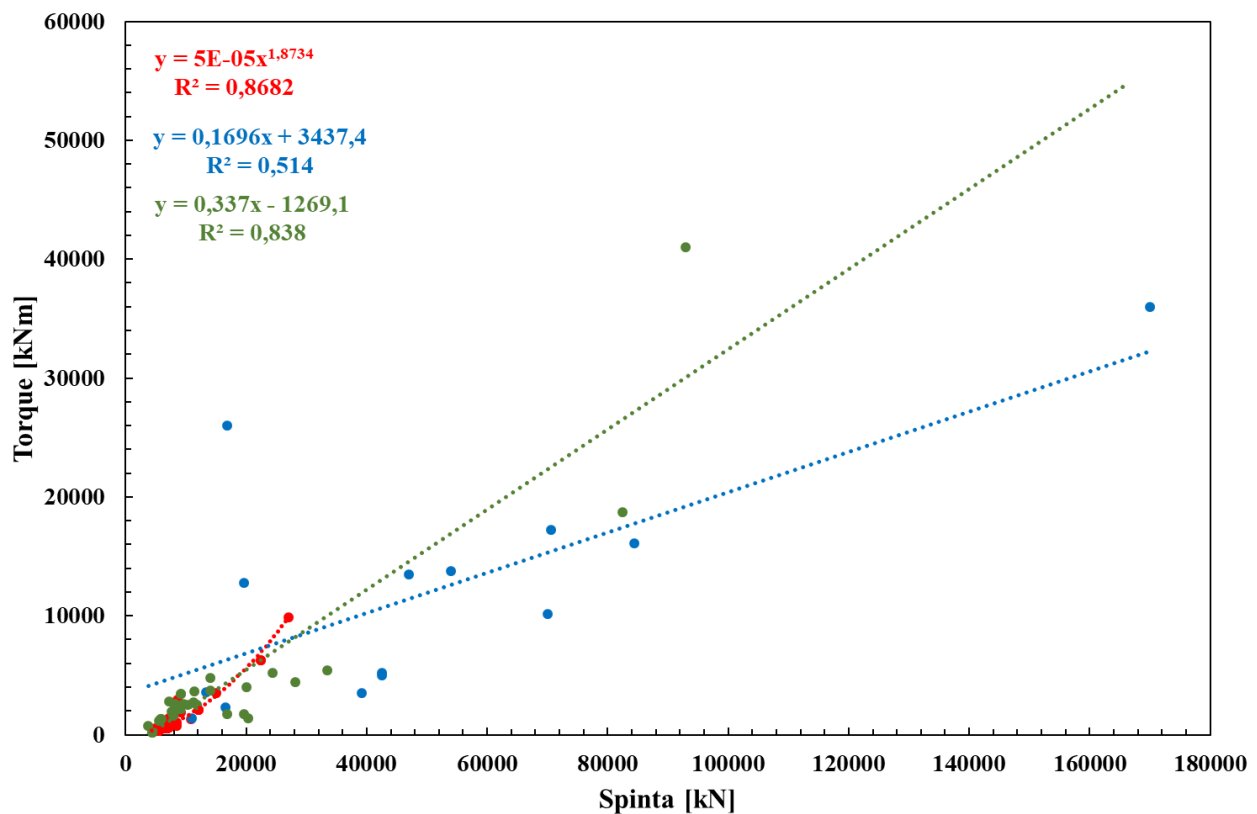


Figura 3.62: Correlazione tra la spinta e la coppia nel caso di TBM aperta (rosso), TBM a singolo scudo (blu) e TBM a doppio scudo (verde)

In figura 3.63 si riportano gli andamenti del momento torcente in funzione della potenza fornita alla testa di scavo. Come già osservato, il legame tra le due grandezze è espresso da una funzione di potenza per TBM aperte (rosso) e TBM a singolo scudo (blu) ed è un'esponenziale per TBM a doppio scudo (verde). Dal grafico in figura 3.63 si osserva che, in tutto il dominio delle potenze fornite alla testa di scavo, le frese a singolo scudo lavorano con un momento torcente maggiore rispetto alle altre due tipologie di fresa. Inoltre, per valori di potenza compresi tra 400 e 3000 kW, la curva rossa e la curva verde si sovrappongono. In tale intervallo si nota inoltre che, al crescere della potenza fornita alla testa di scavo, aumenta la differenza tra la coppia con cui lavorano le TBM a singolo scudo e quella con cui operano le TBM aperte e a doppio scudo. Superata la soglia dei 3000 kW, a parità di potenza, le frese a doppio scudo presentano valori di momento torcente maggiori delle frese aperte. Si evidenzia infine che, al crescere della potenza fornita alla testa di scavo, per valori maggiori di 3000 kW, si riduce il gap tra la curva blu e la curva verde.

Si confrontano in figura 3.64 le correlazioni tra la potenza fornita alla testa di scavo e la spinta per TBM aperte e a doppio scudo. Analizzando il dominio delle potenze, compreso tra 400 e 3600 kW, si nota che nell'intervallo tra 400 e 1400 kW, le due funzioni di regressione si sovrappongono. Superata la soglia dei 1400 kW, a parità di potenza fornita alla testa di scavo, le macchine a doppio

scudo operano con spinte maggiori delle TBM aperte e tale spinta è tanto maggiore quanto maggiore è la potenza riscontrata.

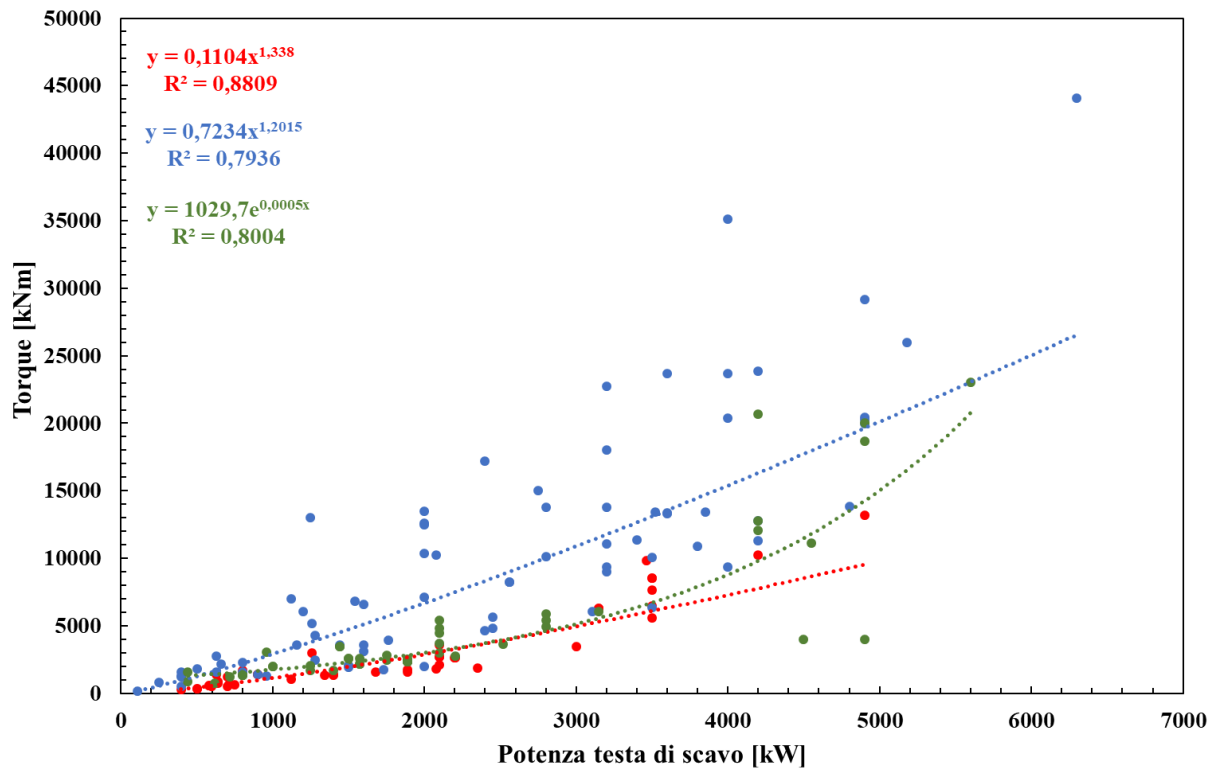


Figura 3.63: Correlazione tra la potenza fornita alla testa di scavo e la coppia nel caso di TBM aperta (**rosso**), TBM a singolo scudo (**blu**) e TBM a doppio scudo (**verde**)

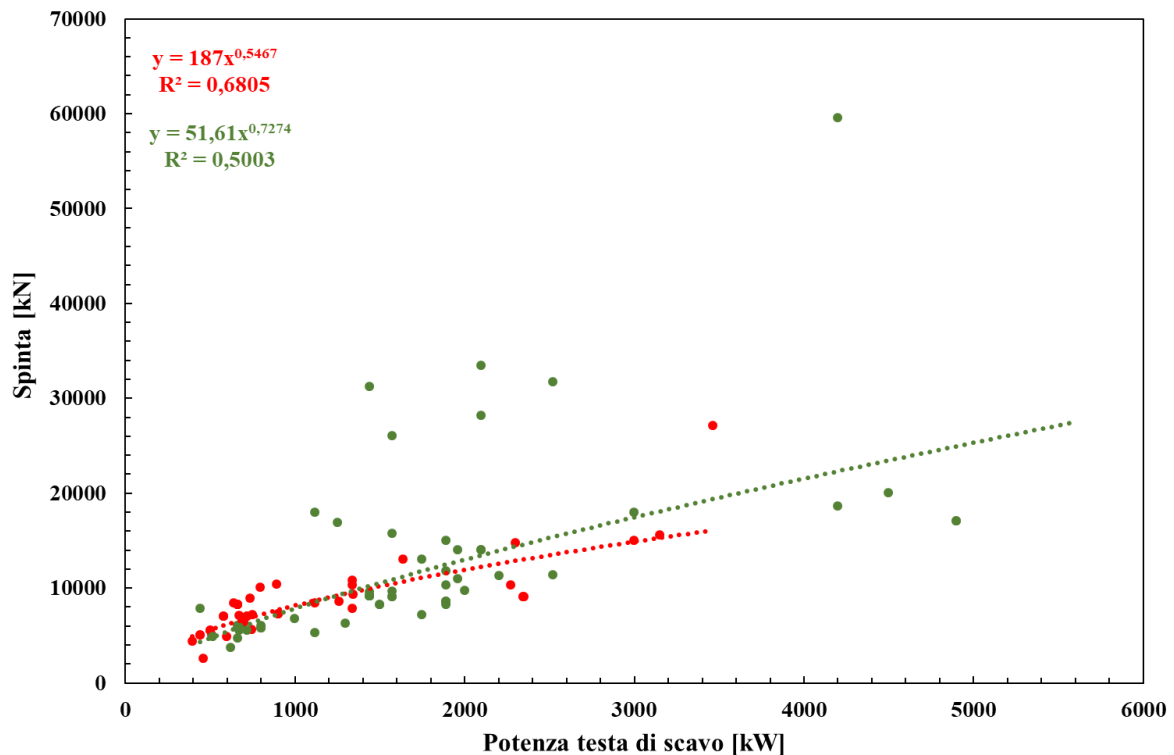


Figura 3.64: Correlazione tra la potenza fornita alla testa di scavo e la spinta nel caso di TBM aperta (**rosso**) e TBM a doppio scudo (**verde**)

In figura 3.65, si propone il confronto fra gli andamenti della velocità di rotazione della testa di scavo in funzione del diametro. Come detto, le funzioni di regressione sono, per tutte le tipologie di frese, espresse da potenze con esponente negativo: ciò implica che, all'aumentare del diametro, la velocità di rotazione della testa di scavo diminuisce, e viceversa. Osservando il grafico in figura 3.65 si nota che, scelto un diametro compreso all'interno dell'intersezione dei campi d'esistenza delle tre funzioni, le macchine a doppio scudo hanno velocità di rotazione della testa maggiore rispetto alle altre due tipologie di fresa; in ordine seguono poi le TBM aperte e le TBM a singolo scudo. Risulta inoltre che la differenza tra la curva verde e la curva rossa è molto esigua.

Dal grafico di figura 2.14 si evince che, in linea con quanto riportato in figura 3.65, l'andamento della velocità di rotazione della testa di scavo in funzione del diametro è una potenza per TBM aperte e per TBM a doppio scudo. Il legame tra le due grandezze è invece espresso da una funzione lineare nel caso di TBM a singolo scudo. Inoltre, in accordo con quanto riportato in figura 3.65, si evidenzia che le macchine a singolo scudo hanno velocità di rotazione più bassa rispetto alle altre tipologie di fresa. Osservando sempre il grafico in figura 2.14 si nota che, a differenza di quanto emerge dal presente studio (figura 3.65), le TBM aperte sono caratterizzate da velocità di rotazione della testa maggiori rispetto alle altre due tipologie di fresa (Ates et Al.,2014). Quest'ultima differenza è anche in parte legata alla differente mole di dati relativi alle TBM a doppio scudo analizzata.

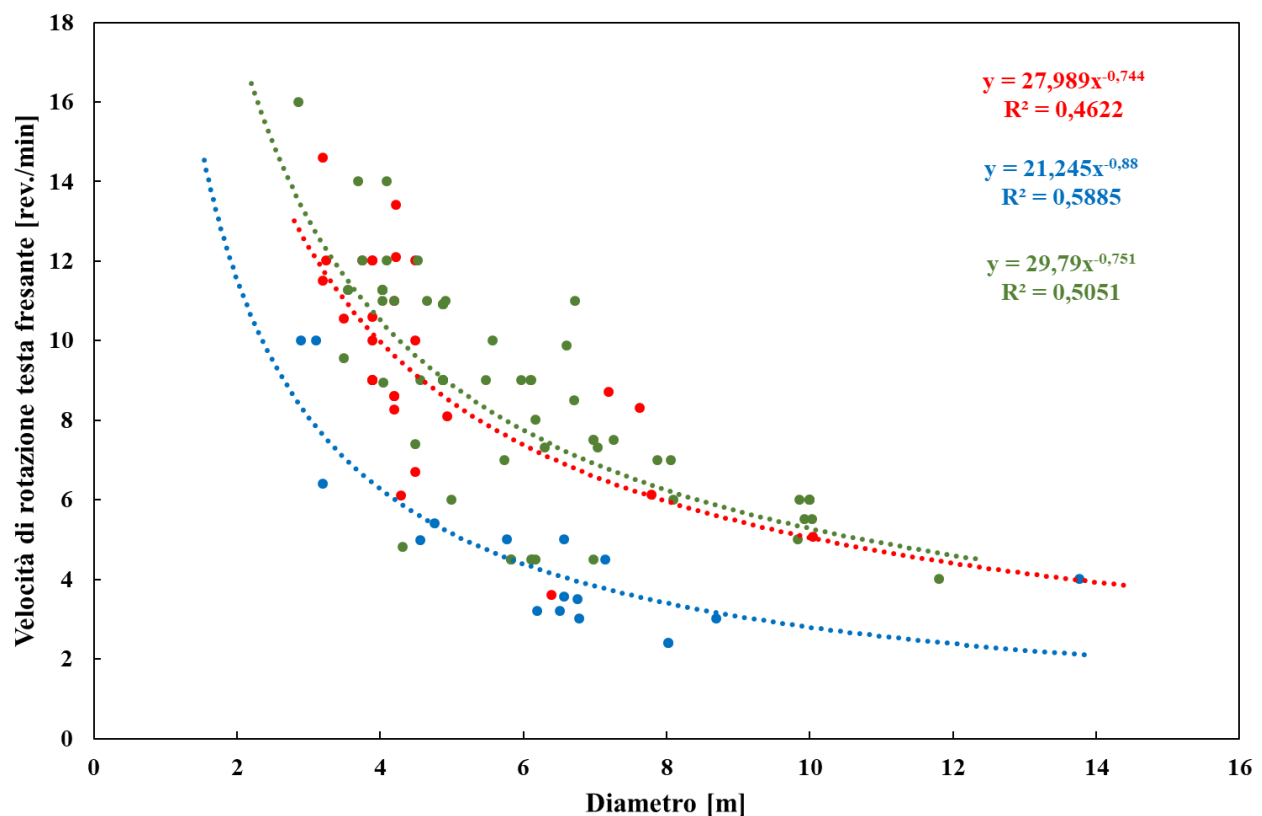


Figura 3.65: Correlazione tra il diametro e la velocità di rotazione della testa fresante nel caso di TBM aperta (rosso), TBM a singolo scudo (blu) e TBM a doppio scudo (verde)

3.1.4 Confronto tra i risultati per tipologia di fresa e ammasso roccioso

Si analizzano di seguito i confronti tra i risultati ottenuti nell'analisi delle correlazioni tra i parametri delle TBM per tipologia di fresa, prendendo in considerazione anche l'aspetto geologico. Ad ogni tipologia di fresa è stato assegnato il medesimo colore utilizzato nel paragrafo precedente.

✓ **Granito**

Si osservano, in figura 3.66, gli andamenti lineari della potenza fornita alla testa di scavo in funzione del diametro in rocce granitiche, nel caso di TBM aperte e a doppio scudo. Considerando l'intervallo di diametri compreso tra 3 e 8 m, si osserva che, a parità di diametro, le TBM aperte sono caratterizzate da potenze fornite alla testa di scavo maggiori rispetto alle frese a doppio scudo. La differenza tra i due valori di potenza, si riduce al crescere del diametro sino ad annullarsi per valori intorno ad 8 m. Superata tale soglia, il trend si inverte e la linea **verde** supera quella **rossa**.

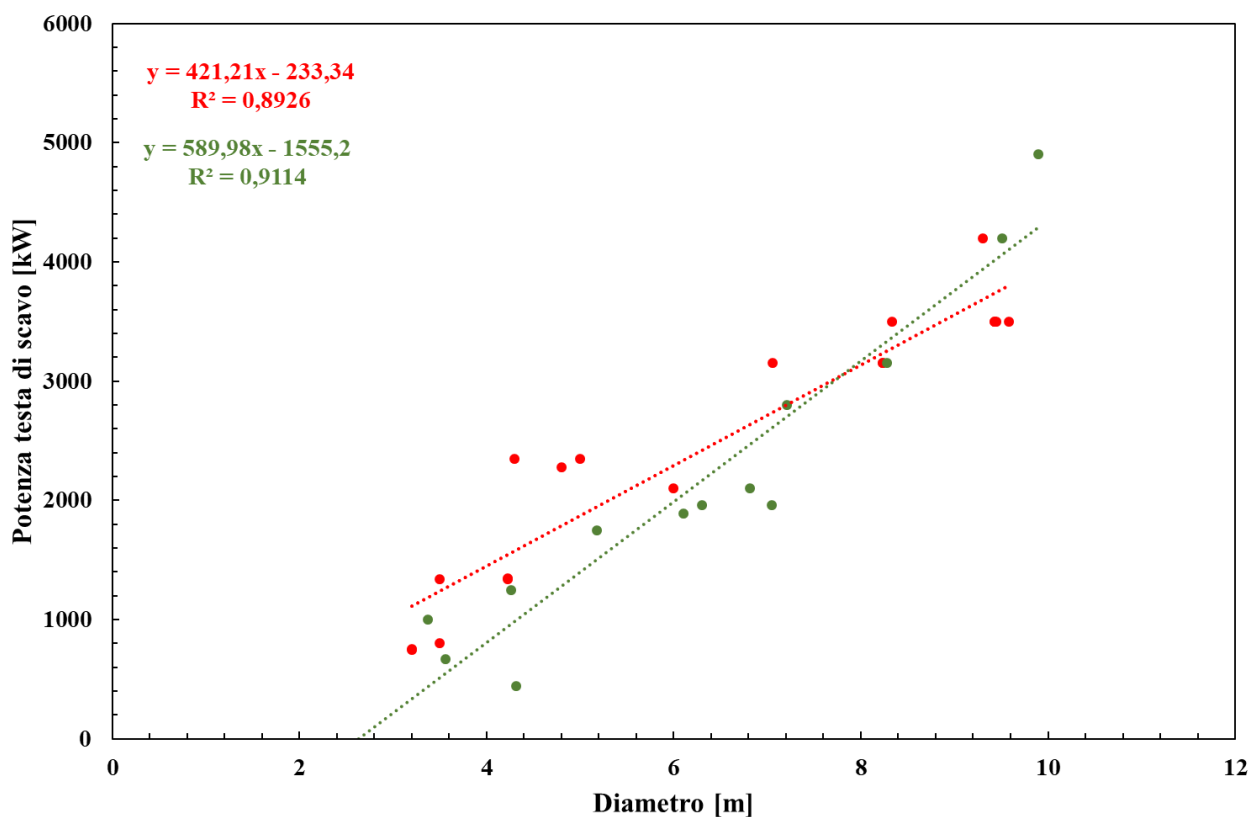


Figura 3.66: Correlazione tra il diametro e la potenza fornita alla testa di scavo in formazioni rocciose con presenza di granito nel caso di TBM aperta (rosso) e TBM a doppio scudo (verde)

In figura 3.67 si confrontano le correlazioni tra il diametro e la coppia per frese aperte e a doppio scudo. Considerando l'intervallo di diametro compreso tra 3 e 9,5 m, si osserva che in un primo momento le due curve coincidono fino a diametri intorno a 5 m. Superato tale valore, le TBM a doppio scudo lavorano con una coppia più alta rispetto a quelle aperte. Si nota, inoltre, che in corrispondenza di un diametro pari a 9,5 m, le due curve praticamente si intersecano.

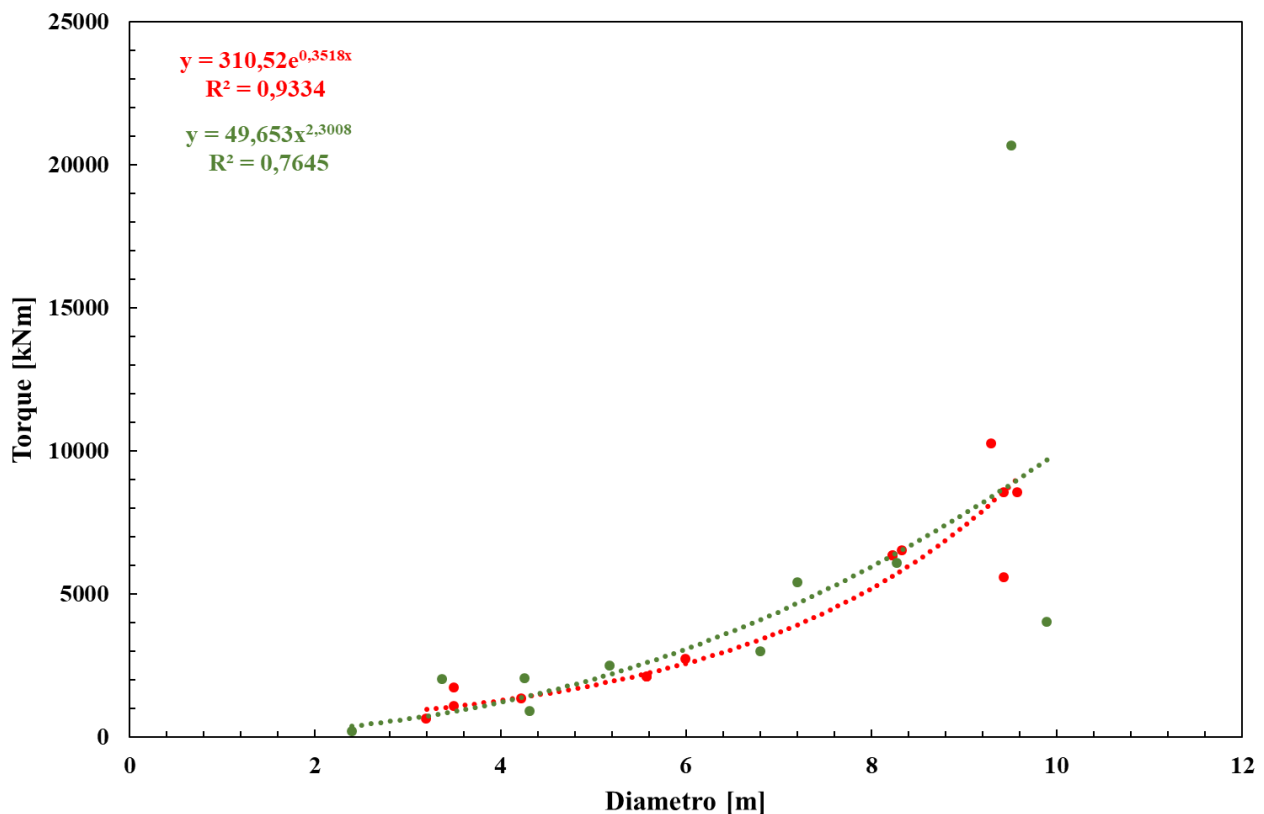


Figura 3.67: Correlazione tra il diametro e la coppia in formazioni rocciose con presenza di granito nel caso di TBM aperta (rosso) e TBM a doppio scudo (verde)

✓ Arenaria

In figura 3.68 si analizza il confronto tra gli andamenti della potenza fornita alla testa di scavo in funzione del diametro in formazioni rocciose arenacee, per quanto riguarda frese a singolo e a doppio scudo. Si osserva, in particolare, un gap tra la funzione lineare delle TBM a doppio scudo e la funzione di potenza delle TBM a singolo scudo per diametri compresi tra 3,5 e 10 m: scegliendo inoltre un valore di diametro in questo intervallo, si osserva che le macchine a doppio scudo operanti in questa tipologia di materiale, sono caratterizzate da valori di potenza alla testa di scavo maggiori rispetto a quelle a singolo scudo.

Nel grafico in figura 3.69 si confrontano gli andamenti tra diametro e spinta per TBM a singolo e a doppio scudo, operanti in arenaria. Considerando l'intersezione tra i due campi d'esistenza delle funzioni, si evidenzia che, a parità di diametro, le frese a singolo scudo richiedono spinte maggiori di quelle a doppio scudo. Questo risultato è ragionevole, in quanto lo scudo delle TBM single shield si estende maggiormente in lunghezza rispetto a quello anteriore delle frese double shield e dunque si sviluppano attriti maggiori.

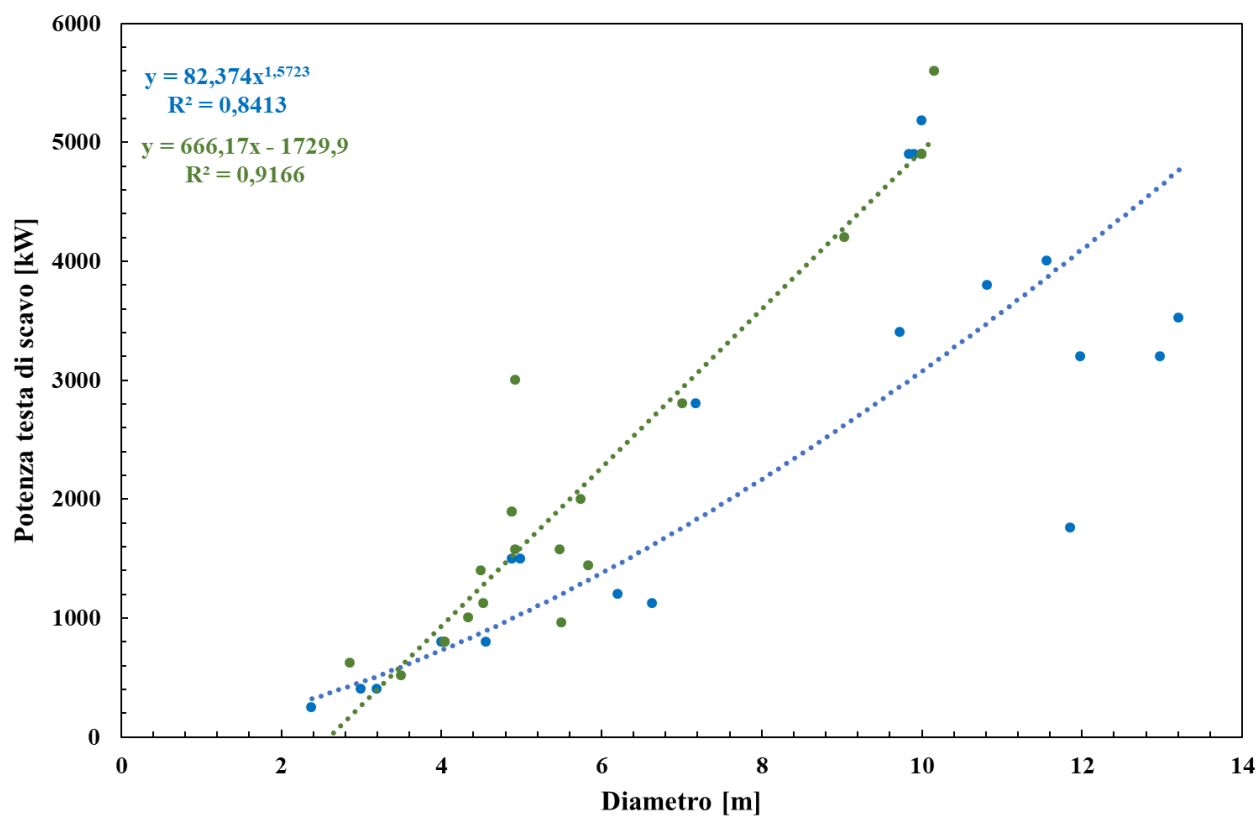


Figura 3.68: Correlazione tra il diametro e la potenza fornita alla testa di scavo in formazioni rocciose con presenza di arenaria nel caso di TBM a singolo scudo (blu) e TBM a doppio scudo (verde)

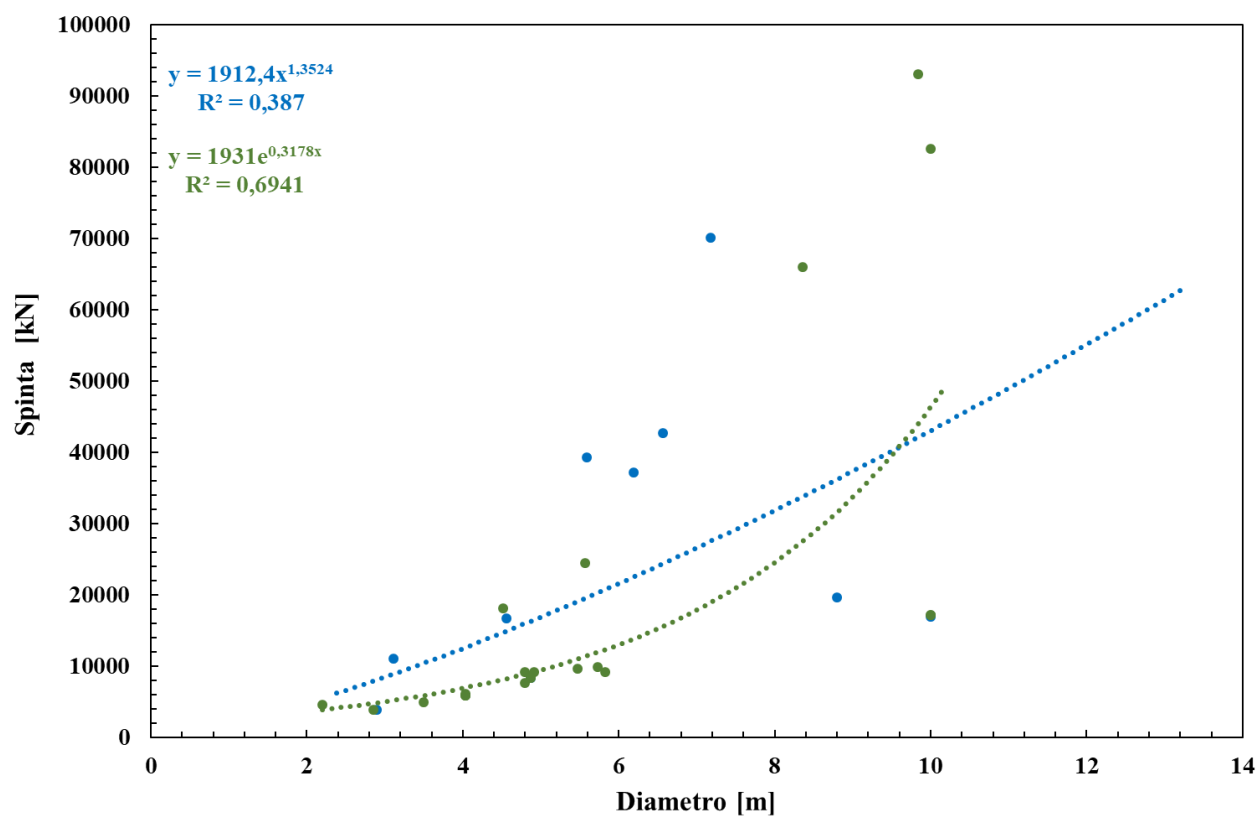


Figura 3.69: Correlazione tra il diametro e la spinta in formazioni rocciose con presenza di arenaria nel caso di TBM a singolo scudo (blu) e TBM a doppio scudo (verde)

In figura 3.70 si riportano le funzioni di correlazione tra il diametro e la coppia per TBM a singolo e a doppio scudo, operanti in formazioni rocciose arenacee. Si osserva che, per diametri compresi tra 2 e 7 m, le funzioni tendono a sovrapporsi. Superata la soglia dei 7 m, al crescere del diametro aumenta la differenza tra la coppia con cui lavorano le TBM a singolo scudo e quella con cui operano le TBM a doppio scudo, la quale risulta più grande. Si confrontano, infine, in figura 3.71, gli andamenti della coppia in funzione della potenza fornita alla testa per TBM a singolo e a doppio scudo. In tutto il dominio delle potenze, la curva **blu** presenta valori superiori a quelli espressi dalla curva **verde**. Dunque, a parità di potenza fornita alla testa di scavo, le macchine a singolo scudo sono caratterizzate da coppie superiori rispetto alle frese a doppio scudo.

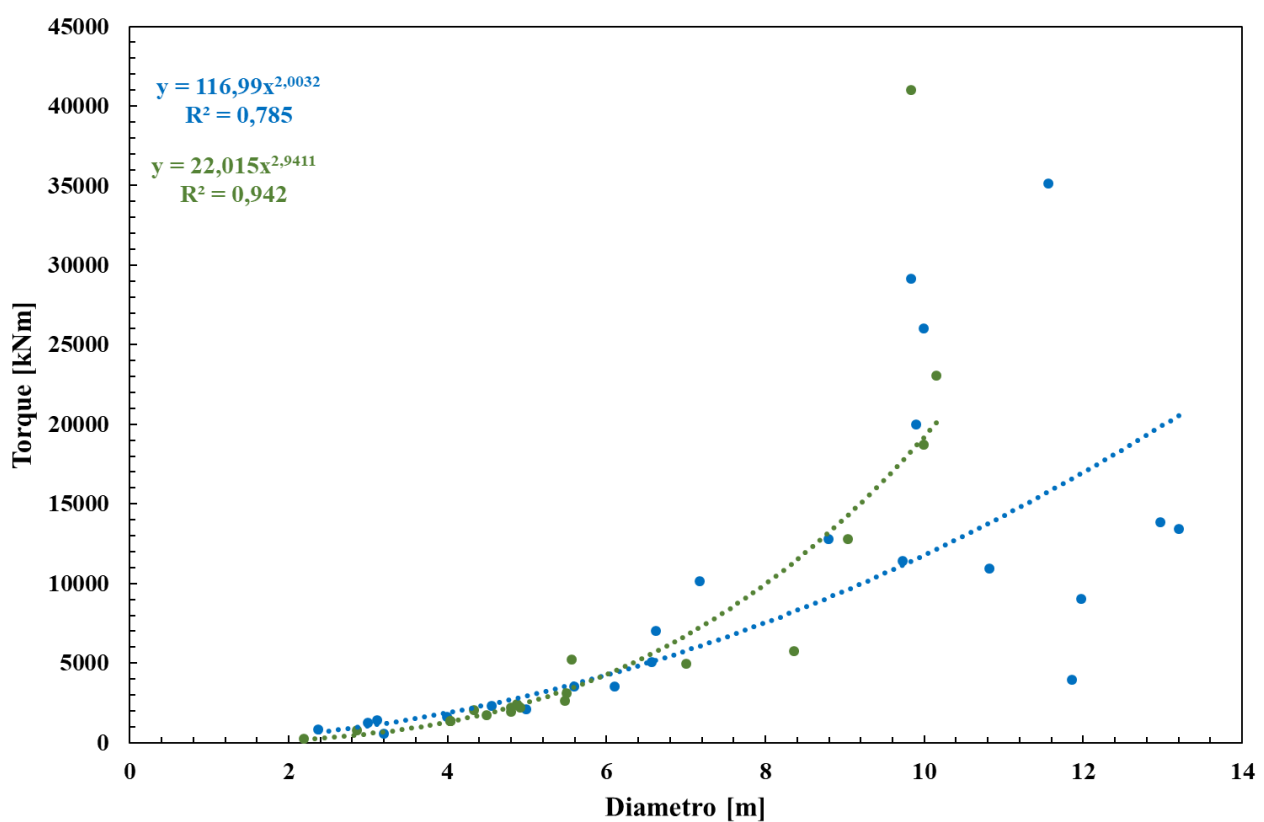


Figura 3.70: Correlazione tra il diametro e la coppia in formazioni rocciose con presenza di arenaria nel caso di TBM a singolo scudo (blu**) e TBM a doppio scudo (**verde**)**

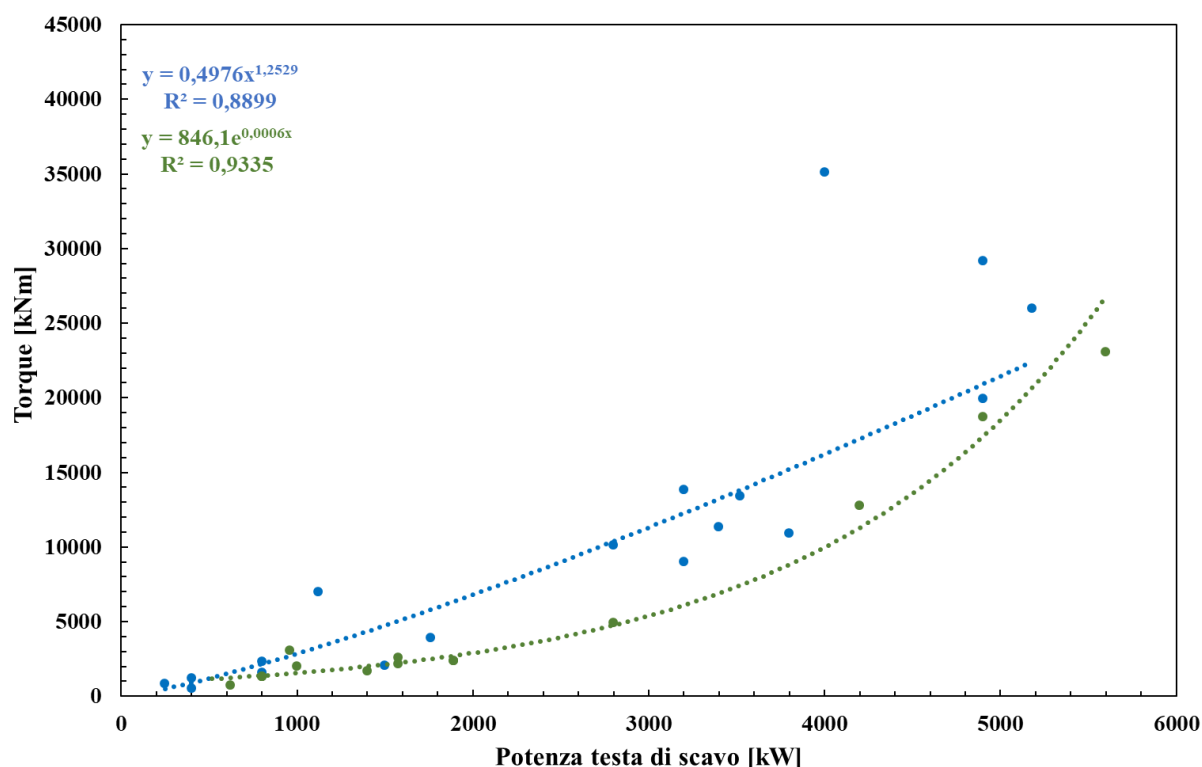


Figura 3.71: Correlazione tra la potenza fornita alla testa di scavo e la coppia in formazioni rocciose con presenza di arenaria nel caso di TBM a singolo scudo (blu) e TBM a doppio scudo (verde)

✓ *Calcare*

Si confrontano di seguito le correlazioni tra il diametro e la potenza fornita alla testa di scavo (Figura 3.72), tra il diametro e la spinta (Figura 3.73), tra il diametro e la coppia (Figura 3.74) e tra la potenza fornita alla testa di scavo e la coppia (Figura 3.75) per le TBM a singolo e a doppio scudo che operano in formazioni rocciose calcaree. Come si osserva in figura 3.72, le TBM a doppio scudo sono caratterizzate da valori di potenza alla testa maggiori rispetto alle TBM a singolo scudo ed i risultati sono in linea con quanto riportato in figura 3.68. Inoltre, la differenza tra i valori di potenza tra le due macchine, a parità di diametro, cresce all'aumentare di quest'ultimo sino a divenire costante. In figura 3.73 si osserva, invece, un risultato analogo a quanto riscontrato in figura 3.69, ossia che in tutto il dominio dei diametri è maggiore la spinta esercitata dalle TBM a singolo scudo rispetto a quella delle TBM a doppio scudo.

Esaminando il grafico di figura 3.74, si evince che gli andamenti delle funzioni trovate sono perfettamente in linea con quelli descritti in figura 3.70 nel caso di TBM a singolo e a doppio scudo, operanti in formazioni rocciose arenacee. Si evidenzia infatti che la curva blu e la curva verde si sovrappongono fino a diametri di 7 m; oltre questa soglia, la curva verde presenta valori superiori a quelli della curva blu e, al crescere del diametro, aumenta la differenza tra i valori del momento torcente tra le due tipologie di fresa. Infine, anche le correlazioni tra la potenza fornita alla testa di scavo e la coppia (Figura 3.75) sono in linea con i risultati riportati in figura 3.71.

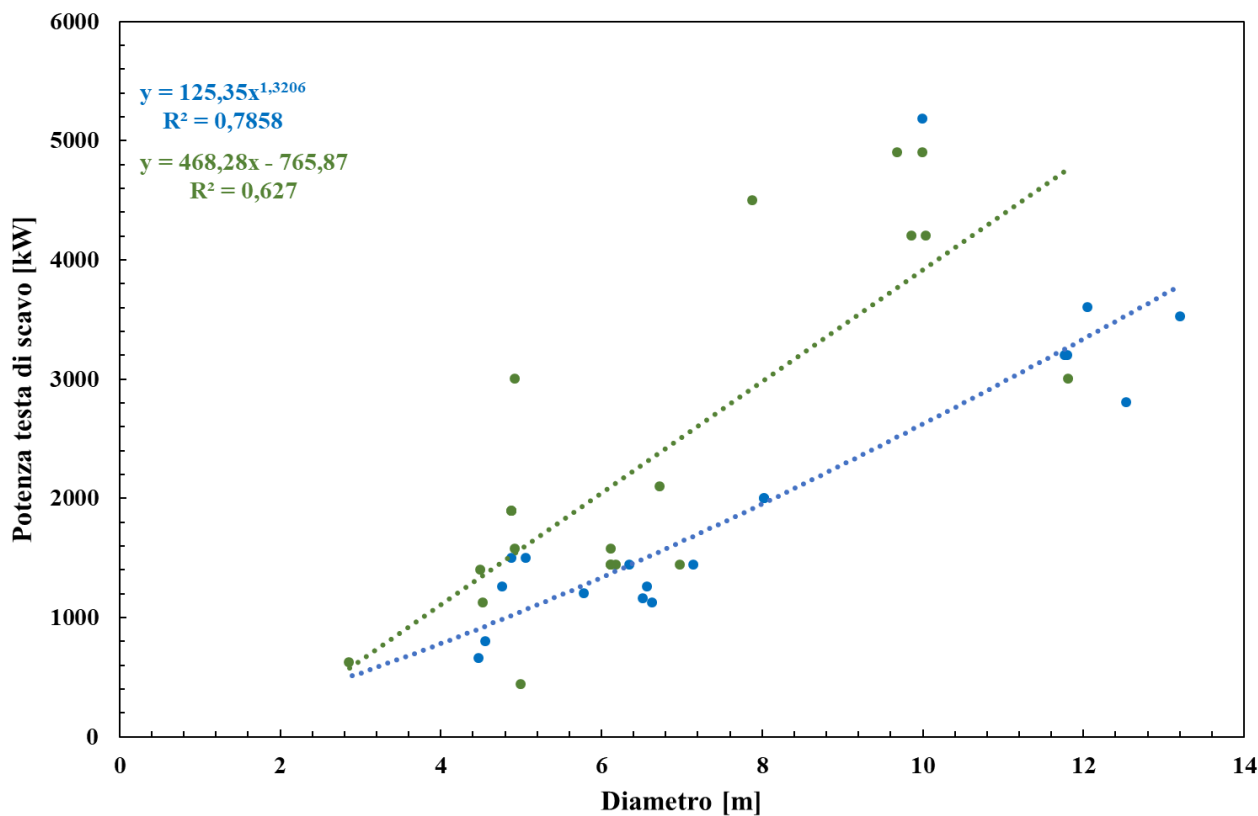


Figura 3.72: Correlazione tra il diametro e la potenza fornita alla testa di scavo in formazioni rocciose con presenza di calcare nel caso di TBM a singolo scudo (blu) e TBM a doppio scudo (verde)

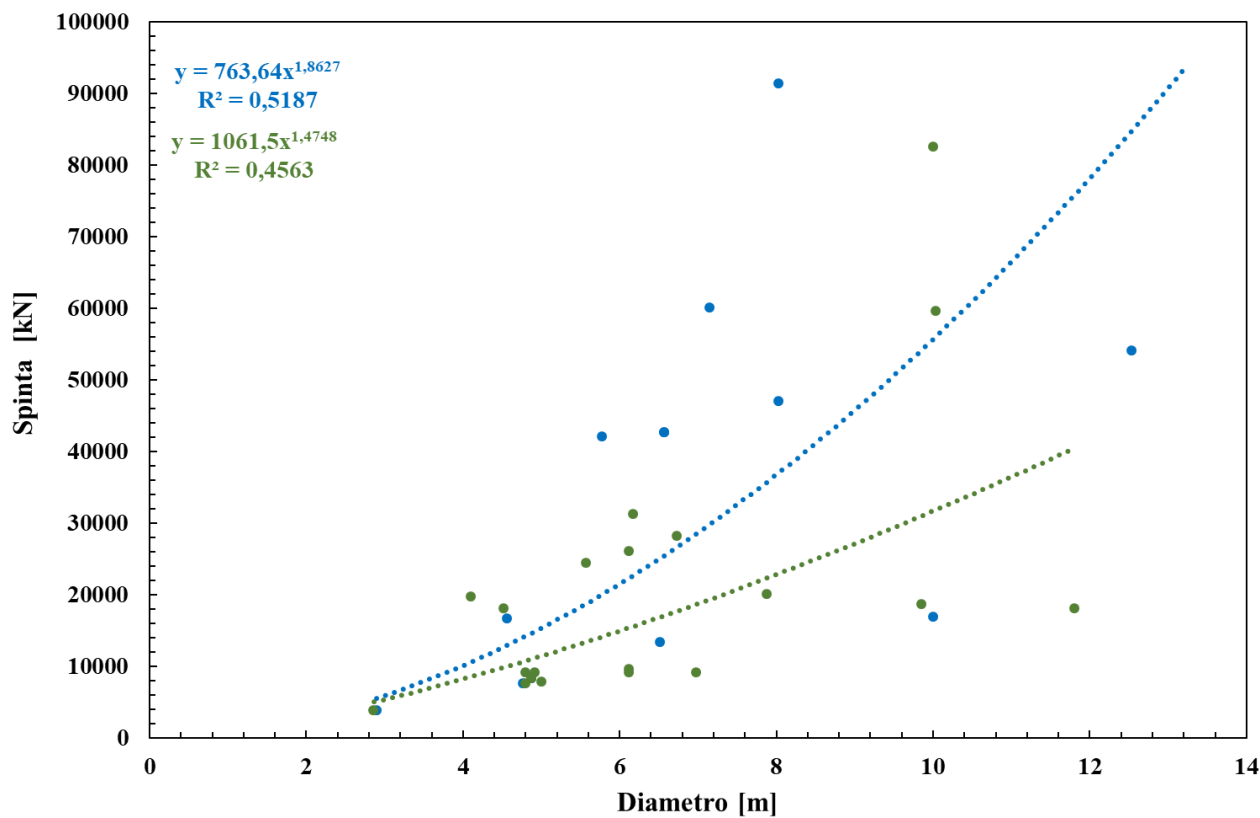


Figura 3.73: Correlazione tra il diametro e la spinta in formazioni rocciose con presenza di calcare nel caso di TBM a singolo scudo (blu) e TBM a doppio scudo (verde)

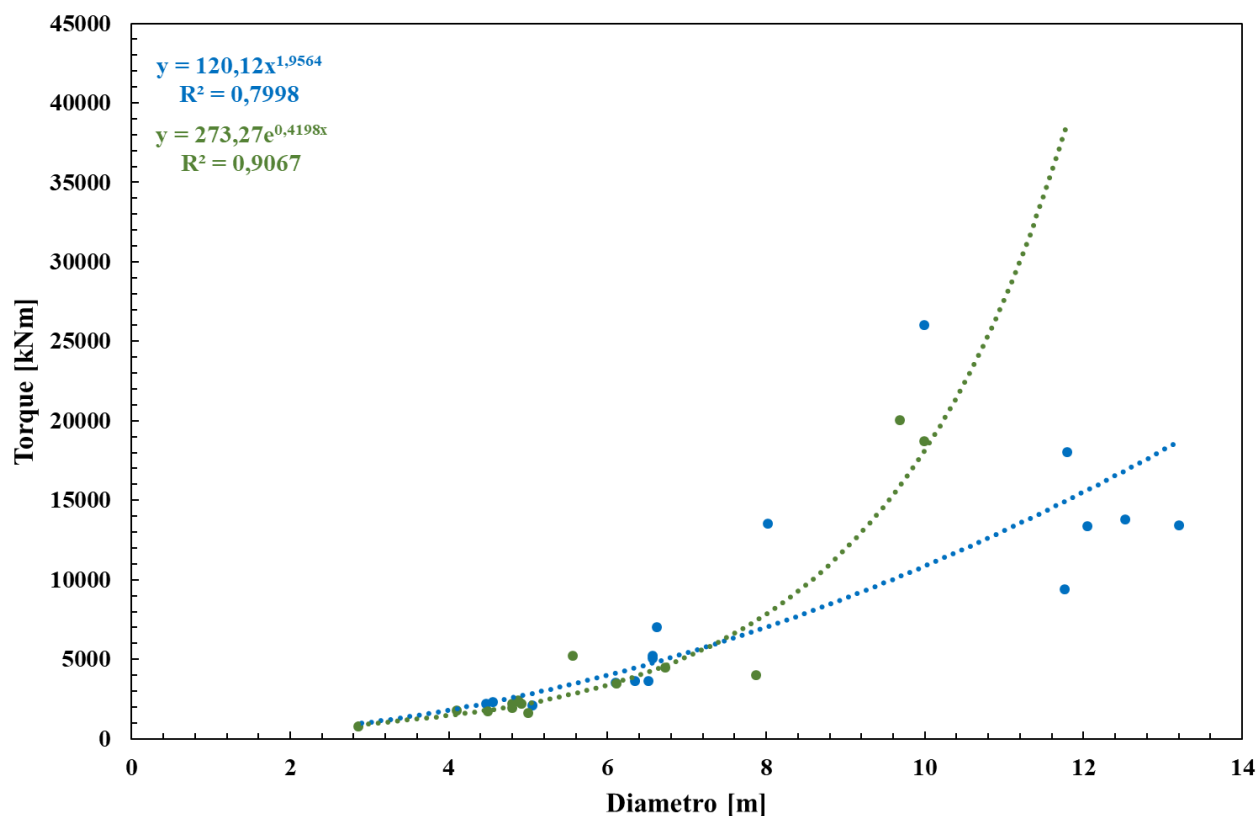


Figura 3.74: Correlazione tra il diametro e la coppia in formazioni rocciose con presenza di calcare nel caso di TBM a singolo scudo (blu) e TBM a doppio scudo (verde)

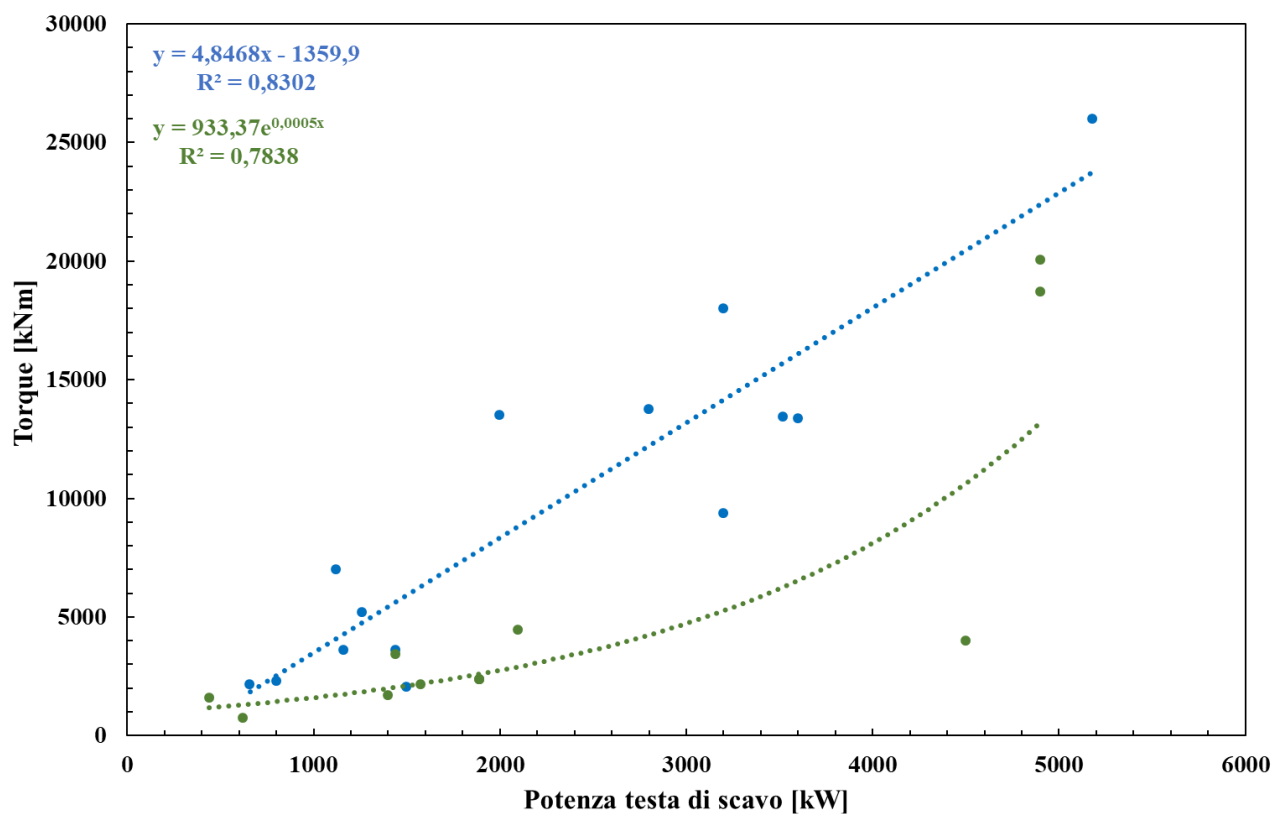


Figura 3.75: Correlazione tra la potenza fornita alla testa di scavo e la coppia in formazioni rocciose con presenza di calcare nel caso di TBM a singolo scudo (blu) e TBM a doppio scudo (verde)

CAPITOLO 4

Caso studio: il tunnel di base del Moncenisio

Nel presente capitolo sono stati convalidati graficamente i modelli di correlazione tra i parametri meccanici delle TBM per tipologia di fresa, ricavati e descritti al capitolo precedente, tramite confronto con le equazioni estrapolate da studi precedenti che sono stati effettuati da Ates et Al. nel 2014 e da Park et Al. nel 2018. I modelli previsionali sono stati, quindi, applicati ad un caso reale rappresentato dal tunnel di base del Moncenisio, opera rientrante nell'insieme delle infrastrutture che costituiranno la nuova linea Torino – Lione.

L'obiettivo principale è quello di valutare a livello previsionale le prestazioni della fresa aperta “GEA” e della fresa a singolo scudo “Federica”. L'utilizzo dei modelli presentati in questo elaborato costituisce, a tal scopo, un approccio preliminare ad un tema molto attuale, importante e su cui si trovano pochi riferimenti completi ed esaurienti. Infatti, dalla sola conoscenza del diametro della fresa, è possibile effettuare una prima stima di parametri meccanici quali la potenza, la coppia e la spinta, dai quali dipendono le prestazioni di scavo.

4.1 Validazione studio sperimentale

I modelli di previsione dei parametri macchina, ricavati per tipologia di fresa, sono stati validati graficamente tramite confronto diretto con le equazioni ricavate in due studi analoghi, descritti nei paragrafi 2.2.1 e 2.2.2.

Nei grafici di confronto, proposti di seguito, si riportano in **rosso** i modelli di previsione ricavati in fase sperimentale nel presente elaborato, in **blu** le equazioni ottenute da Ates et Al. nel 2014 e in **verde** le equazioni estrapolate da Park et Al. nel 2018.

4.1.1 Validazione modelli TBM aperta

Dall'analisi dei grafici in figura 4.1 e figura 4.2, si evidenzia che gli andamenti della potenza fornita alla testa di scavo in funzione del diametro e gli andamenti della coppia in funzione del diametro sono lineari in tutti i casi studio attenzionati. Si riscontra, invece, una differenza tra la forma della funzione che esprime l'andamento della spinta in funzione del diametro (logaritmica), ricavata nel presente elaborato, e l'equazione sperimentale ricavata da Ates et Al. nel 2014 (lineare) (Figura 4.3). Tuttavia, a parità di diametro i valori di spinta sono molto simili e la discordanza è probabilmente legata alla differente mole di dati analizzata.

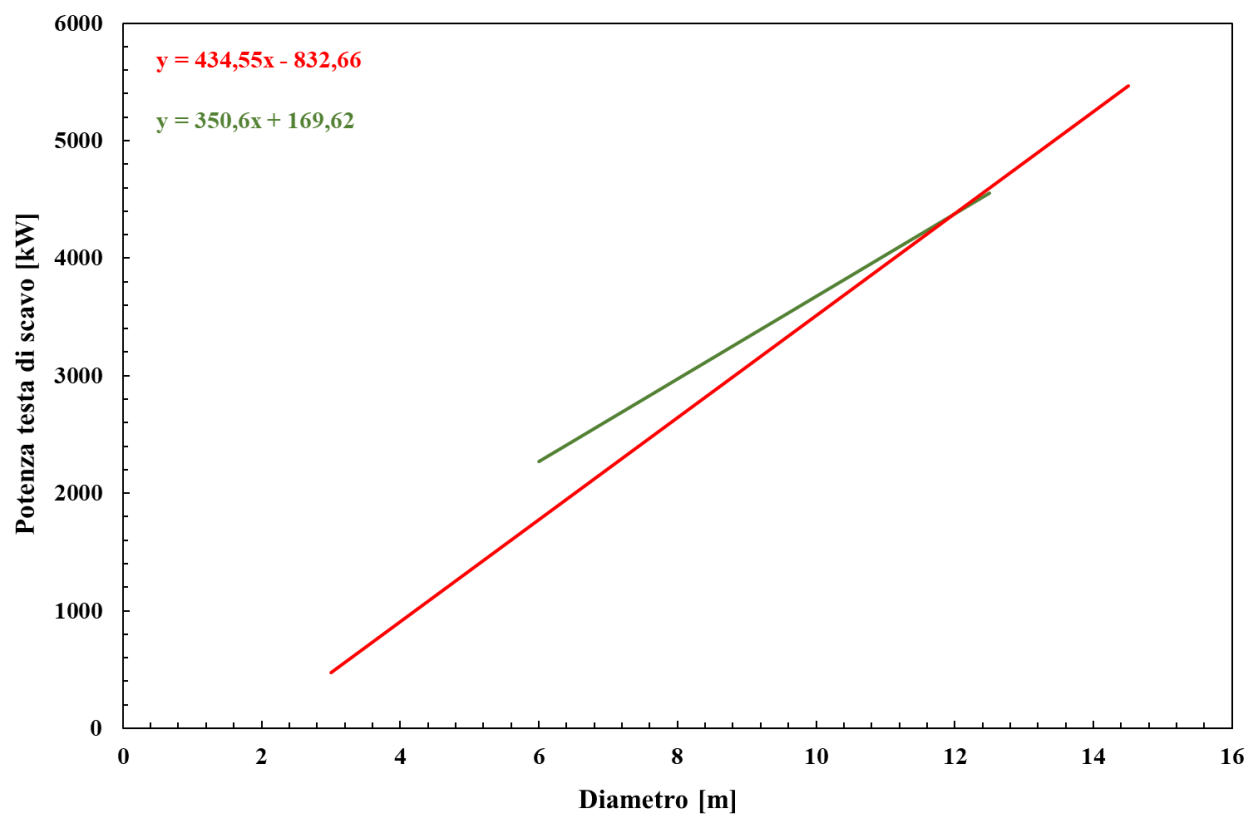


Figura 4.1: Andamento della potenza in funzione del diametro: modello sperimentale tesi (**rosso**) e modello sperimentale Park et Al. 2018 (**verde**)

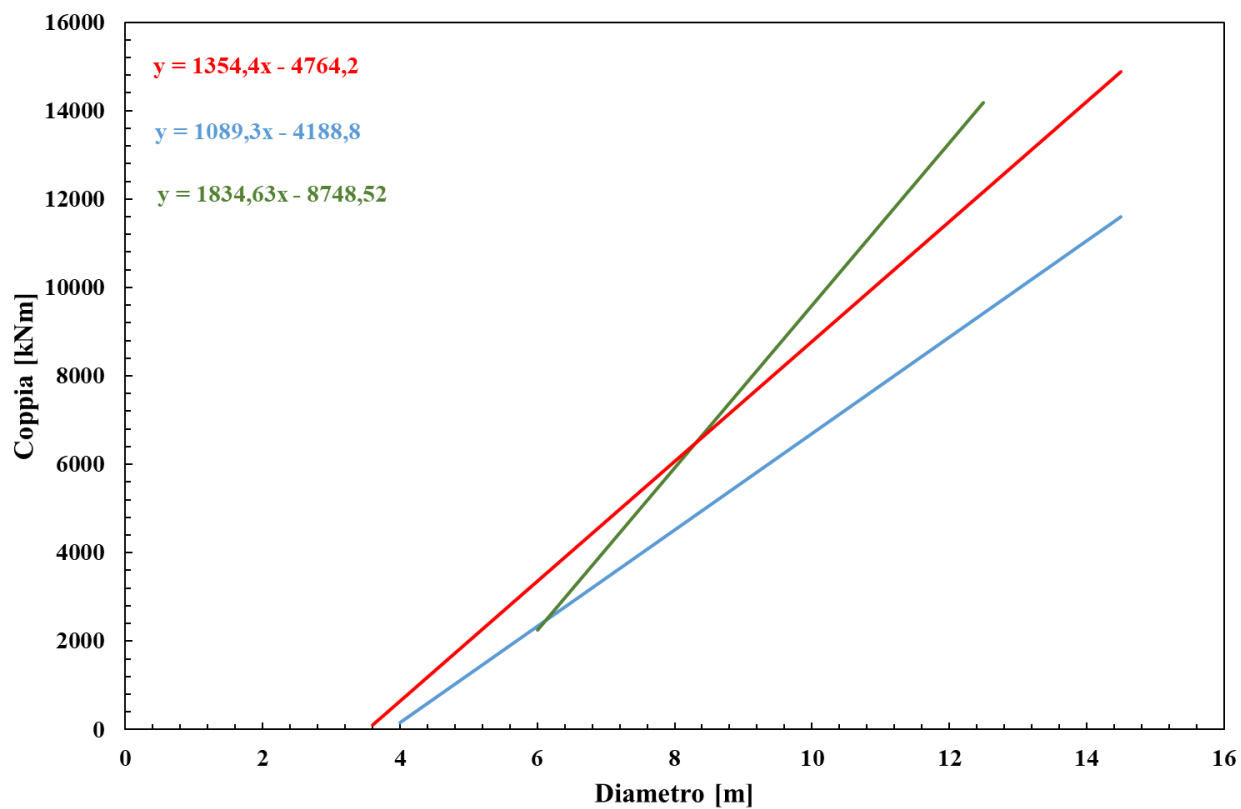


Figura 4.2: Andamento della coppia in funzione del diametro: modello sperimentale tesi (**rosso**), modello sperimentale Ates et Al. 2014 (**blu**) e modello sperimentale Park et Al. 2018 (**verde**)

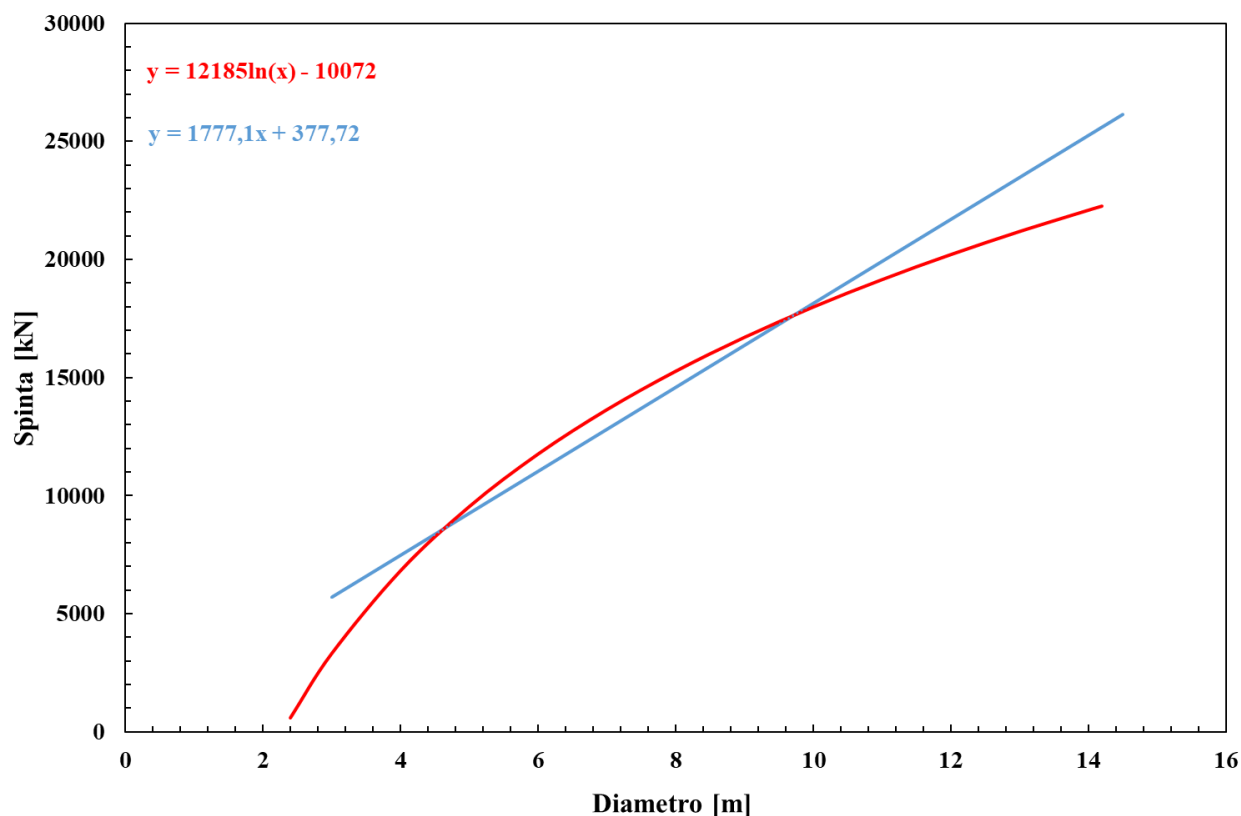


Figura 4.3: Andamento della spinta in funzione del diametro: modello sperimentale tesi (**rosso**) e modello sperimentale Ates et Al. 2014 (**blu**)

4.1.2 Validazione modelli TBM a singolo scudo

Per quanto riguarda le TBM a singolo scudo, non è stato possibile effettuare alcuna validazione del modello di previsione esprime la correlazione tra il diametro e la potenza fornita alla testa di scavo. Le correlazioni tra la coppia e il diametro (Figura 4.4) e tra la spinta e il diametro (Figura 4.5) sono invece rappresentate da funzioni di potenza.

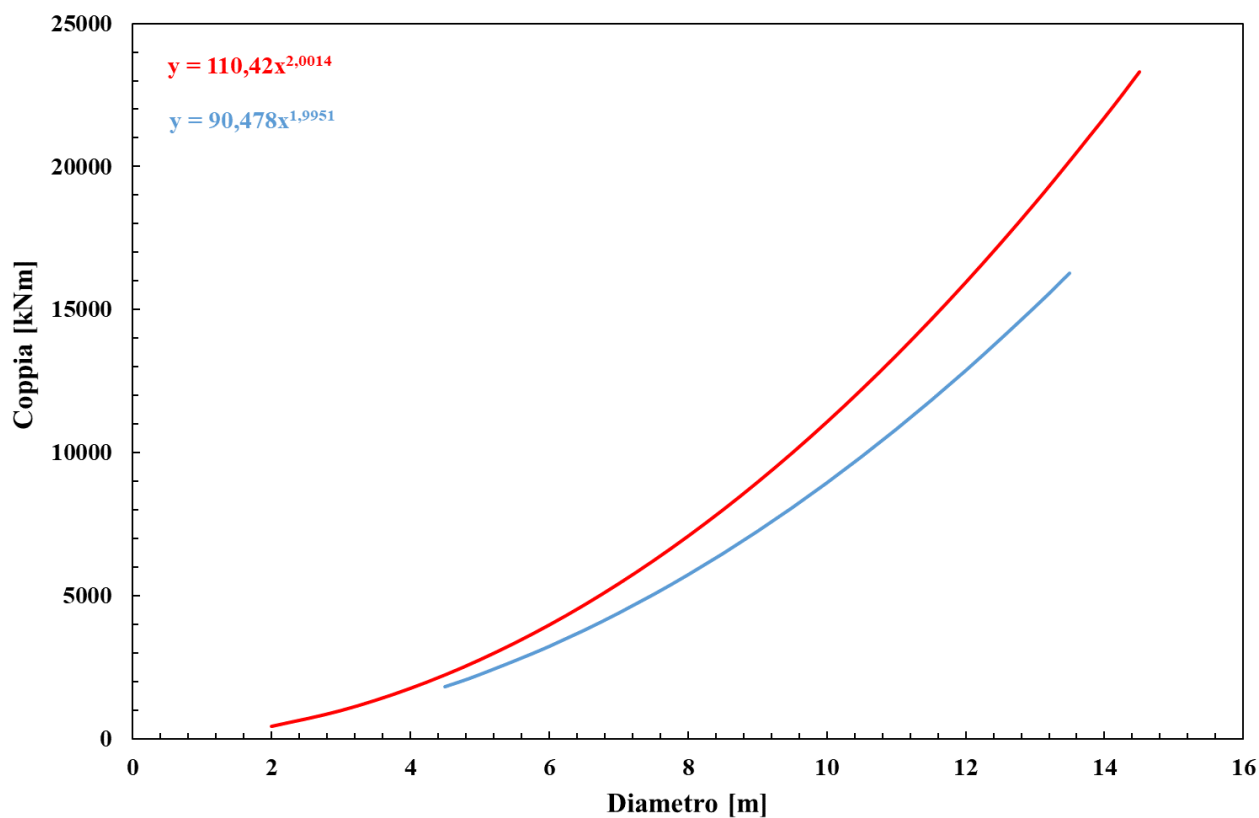


Figura 4.4: Andamento della coppia in funzione del diametro: modello sperimentale tesi (**rosso**) e modello sperimentale Ates et Al. 2014 (**blu**)

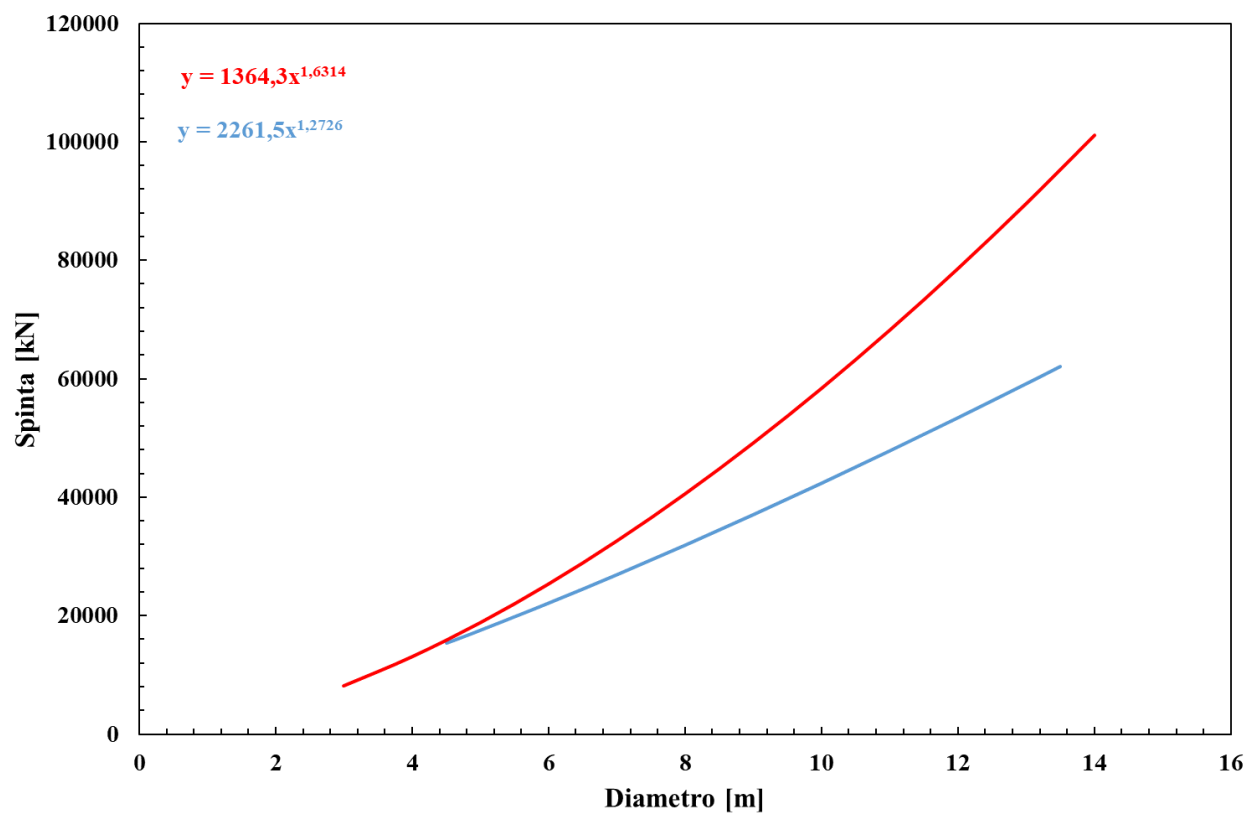


Figura 4.5: Andamento della spinta in funzione del diametro: modello sperimentale tesi (**rosso**) e modello sperimentale Ates et Al. 2014 (**blu**)

4.1.3 Validazione modelli TBM a doppio scudo

Si osservano in figura 4.6 gli andamenti della potenza fornita alla testa di scavo in funzione del diametro, rappresentati da funzioni lineari. Per ciò che concerne l'andamento della coppia in funzione del diametro, la funzione che descrive la correlazione, ricavata durante l'analisi sperimentale, è una potenza (Figura 4.7), in linea con quanto ricavato da Ates et Al. nel 2014. Il modello sperimentale proposto da Park et Al. nel 2018 è invece lineare. Tuttavia, in questo caso, gli autori hanno analizzato un numero esiguo di dati sperimentali.

Si riportano in figura 4.8, i modelli sperimentali che descrivono la spinta in funzione del diametro, ottenuti nei 3 casi studio. Si evidenzia che Ates et Al., nel modello proposto, hanno effettuato una distinzione tra spinta principale (utilizzo come TBM doppio scudo) e spinta ausiliaria (utilizzo come fresa singolo scudo). Si riscontrano parecchie differenze tra le forme delle funzioni sperimentali, ad indicazione del fatto che le proprietà geomeccaniche giocano un ruolo fondamentale nella determinazione della spinta. Infine, si sottolinea che l'andamento lineare proposto da Park et Al. è il risultato dell'elaborazione sperimentale di pochi dati.

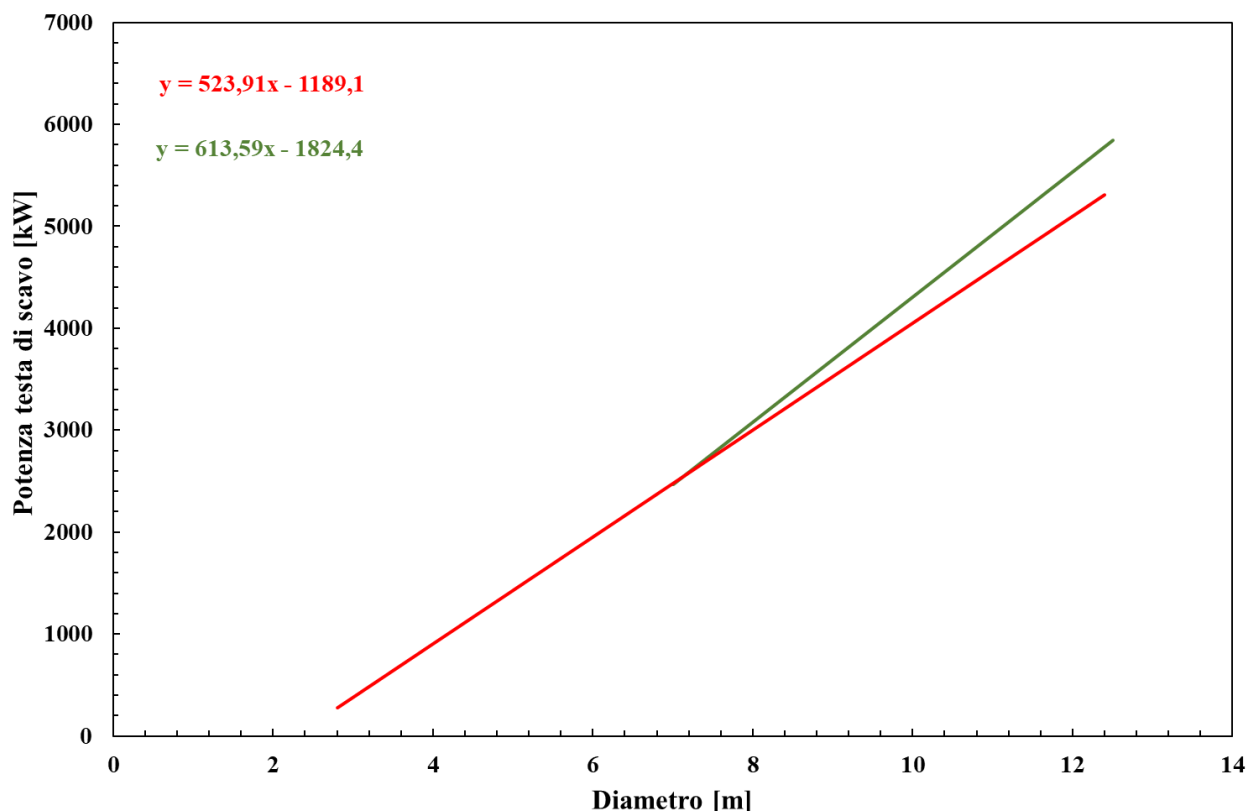


Figura 4.6: Andamento della potenza in funzione del diametro: modello sperimentale tesi (**rosso**) e modello sperimentale Park et Al. 2018 (**verde**)

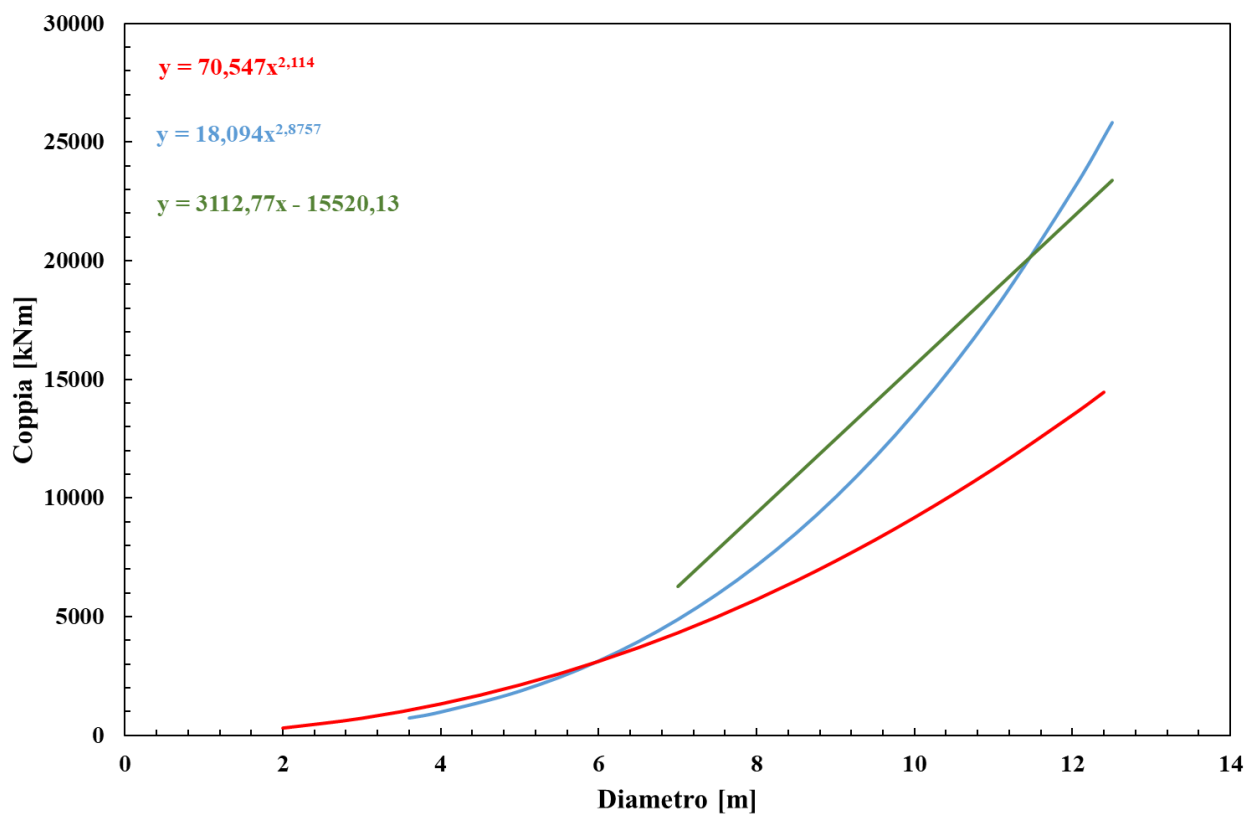


Figura 4.7: Andamento della coppia in funzione del diametro: modello sperimentale tesi (rosso), modello sperimentale Ates et Al. 2014 (blu) e modello sperimentale Park et Al. 2018 (verde)

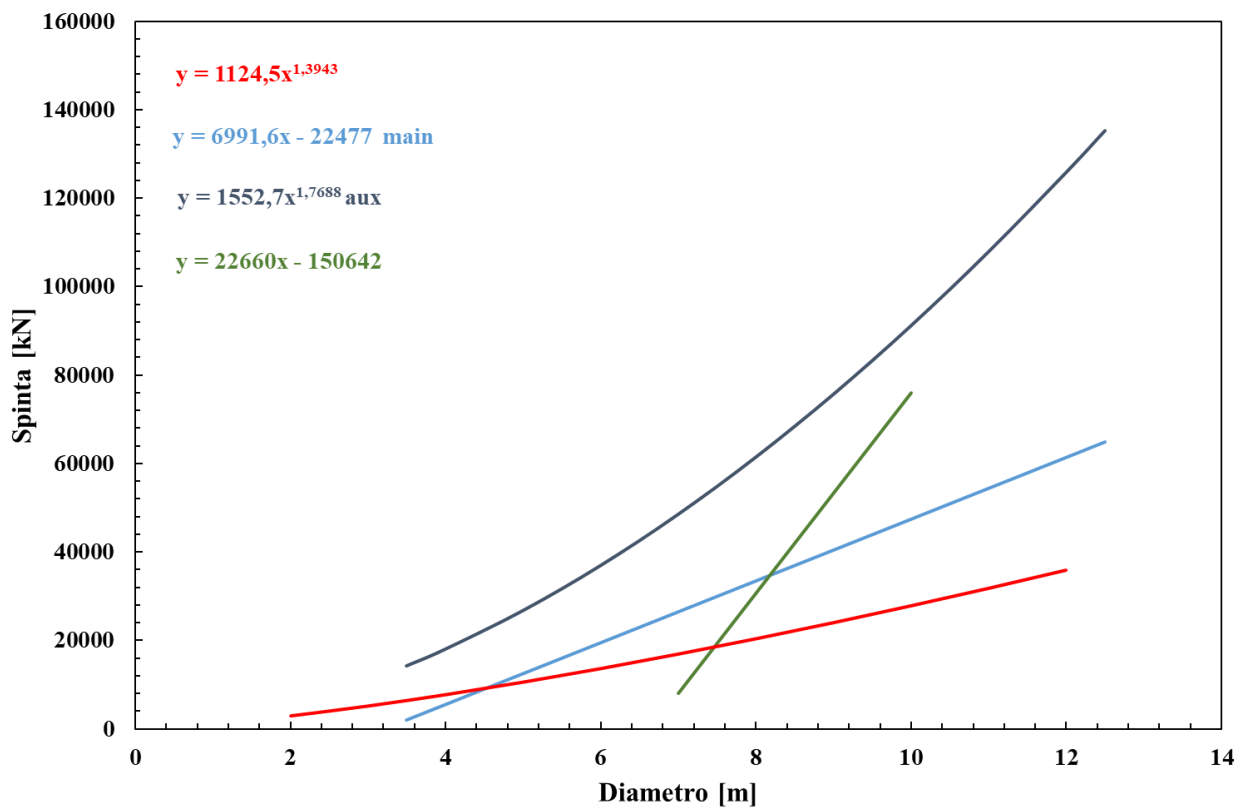


Figura 4.8: Andamento della spinta in funzione del diametro: modello sperimentale tesi (rosso), modello sperimentale Ates et Al. 2014 (blu (main) e blu (aux)) e modello sperimentale Park et Al. 2018 (verde)

4.2 Aspetti generali tunnel di base del Moncenisio

Il tunnel di base del Moncenisio, lungo 57,5 km, di cui 45 in territorio francese e 12,5 in territorio italiano, è costituito da due canne a singolo binario; esso collega le stazioni internazionali di Saint – Jean de Maurienne (Francia) e di Susa (Italia), attraversando la catena montuosa delle Alpi. L’opera rappresenta la parte fondamentale del nuovo collegamento ferroviario Torino – Lione, che si trova nell’intersezione dei due grandi assi di comunicazione tra il Nord e il Sud e tra l’Est e l’Ovest europeo: si tratta di una linea per merci e passeggeri che si estende per circa 270 km, di cui il 70 % in Francia e il 30 % in Italia (Figura 4.9). TELT (Tunnel Euralpin Lyon Turin) è il Promotore Pubblico responsabile della realizzazione e della gestione della sezione transfrontaliera della futura linea merci e passeggeri.

Il progetto prevede anche la realizzazione di quattro gallerie esplorative e di accesso (perlopiù già realizzate), con lo scopo di investigare le proprietà delle formazioni geologiche (Figura 4.10). Tre di queste gallerie si trovano sul lato francese e sono: Saint – Martin – La – Porte, La Praz e Modane, mentre la quarta si trova a La Maddalena, in Val di Susa (TELT).

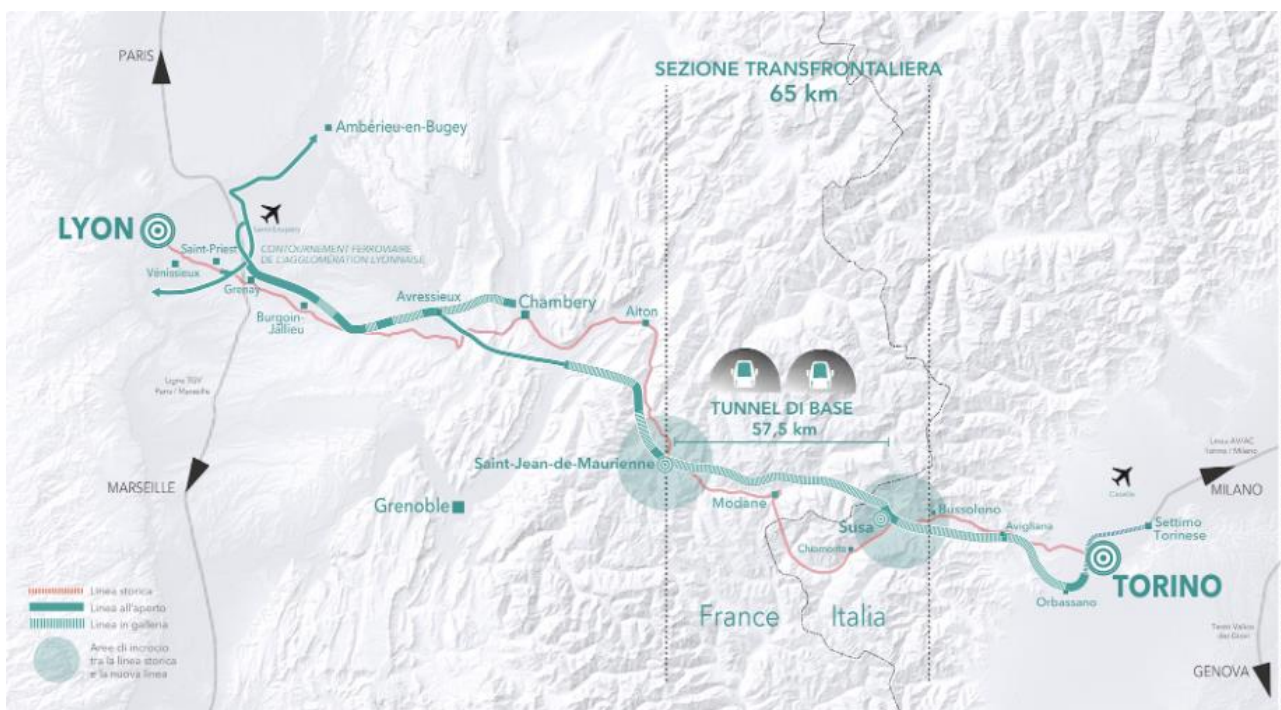


Figura 4.9: Nuovo collegamento ferroviario Torino – Lione (TELT)

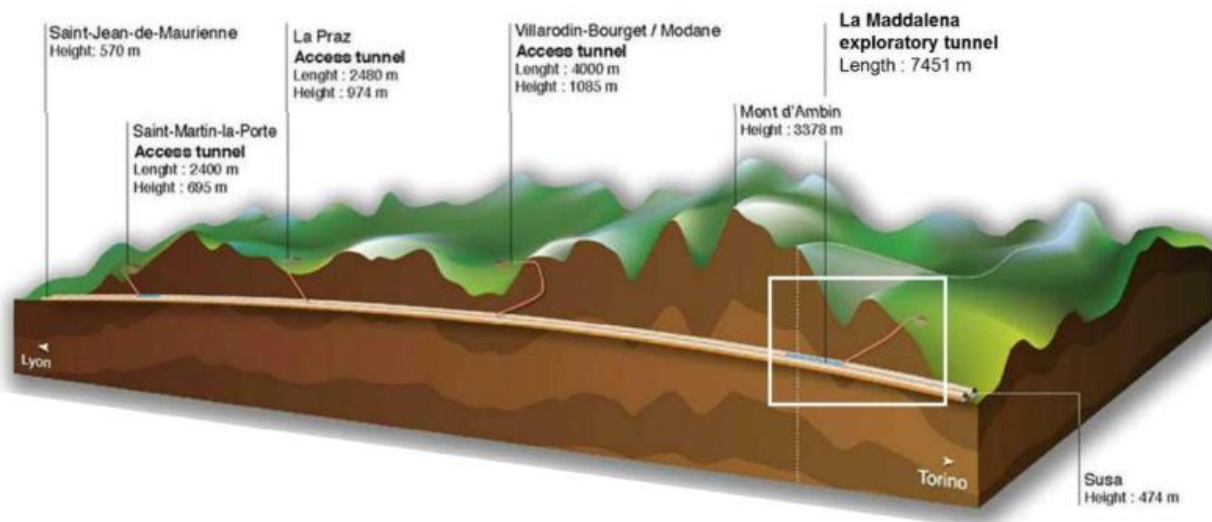


Figura 4.10: Tunnel di base del Moncenisio con le quattro gallerie di accesso (TEL T)

Lo scavo con fresa meccanica a piena sezione è previsto lungo 4 tratti principali:

- **tratto 1:** da Saint Martin La Porte (pk 11+725) a La Praz (pk 20+133);
- **tratto 2:** da La Praz (pk 21+048) a Modane (pk 29+920);
- **tratto 3:** da Modane (pk 33+341) a La Maddalena (pk 51+640);
- **tratto 4:** da La Maddalena (pk 53+650) a Susa (pk 61+076).

4.2.1 Contesto geologico

Il contesto geologico lungo il profilo longitudinale del tunnel di base del Moncenisio è analizzato nel seguito, prendendo in considerazione ogni tratto singolarmente.

Tratto 1

Lungo il primo tratto, le formazioni geologiche presenti sono:

- hBO: arenarie, scisti e carbone;
- hLP: arenarie e conglomerati, rari scisti.

Tratto 2

Il secondo tratto, che si sviluppa da La Praz a Modane, è caratterizzato dalla presenza delle seguenti formazioni geologiche:

- hF: scisti, arenarie e livelli di carbone;
- GS: gneiss e micascisti indifferenziati;
- r – tCG: conglomerati quarzitici +/- scistosi;
- r-t: quarziti +/- micacee, conglomerati quarzitici con quarzo rosa e scisti;
- tQ: quarziti;

- K: cataclasiti carbonatiche;
- tG: gessi e anidriti con livelli di scisti;
- tCD: calcari, dolomie;
- SV, S: micascisti.

Tratto 3

Il tratto 3 è il più ricco dal punto di vista geologico, in quanto caratterizzato dalla presenza di molte formazioni, elencate di seguito:

- r-t: quarziti +/- micacee, conglomerati quarzitici con quarzo;
- tCd: calcari, dolomie;
- tDB: dolomie bianche e grigie;
- tCng: gessi e anidriti con intercalazioni di scisti e dolomie;
- tng: gessi e anidriti;
- tb: dolomie chiare con livelli di scisti argillosi;
- Cng: barra di calcari fini e grigi, talvolta calcescisti;
- Jm: bande tabulari di calcari scuri con livelli brecciati;
- tG: gessi e anidriti con livelli di scisti;
- Cs-eB: marmi a clorite;
- Cb: copertura carbonatica;
- QSE: quarzite;
- AMF: micascisti quarzitici;
- AMA: micascisti conglomerati a clasti di quarzo;
- AMD: gneiss albitici passanti a micascisti quarzosi;
- CL: micascisti e gneiss minuti a glaucofane.

Tratto 4

L'ultimo tratto, che si svilupperà su territorio italiano, da Maddalena a Susa, è contraddistinto dalle seguenti formazioni geologiche:

- CL: micascisti e gneiss minuti a glaucofane;
- AMD: gneiss albitici passanti a micascisti quarzosi;
- AMC: gneiss aplitici;
- QSE: quarzite;
- GCC: scisti carbonatici filladici;
- BCC: cataclasiti carbonatiche;

- GCK: gneiss albitici;
- OMB: prasiniti e scisti prasinitici.

4.3 Applicazione dei modelli al caso studio

Nel seguito si presenta l'applicazione dei modelli di correlazione tra i parametri meccanici delle TBM per tipologia di fresa, validati nel paragrafo 4.1, al caso studio rappresentato dal tunnel di base del Moncenisio. Lo scopo principale è quello di stimare la potenza della testa di scavo, la coppia e la spinta della TBM aperta "GEA" (diametro 6,3 m), utilizzata nella realizzazione del tunnel di accesso della Maddalena, e della TBM a singolo scudo "Federica" (diametro 11,26 m), impiegata nello scavo del primo tratto del futuro tunnel di base del Moncenisio.

4.3.1 Fresa GEA

Si riportano nella tabella di seguito le equazioni che legano il diametro D con i tre parametri meccanici (potenza (P), coppia (C), spinta (S)), nel caso di TBM aperte.

Tabella 4.1: Equazioni che legano il diametro D alla potenza fornita alla testa di scavo (P), alla coppia (C) e alla spinta (S) (TBM aperte)

Modello sperimentale tesi	Ates et Al. 2014	Park et Al. 2018
$P = 434,55D - 832,66$	-	$P = 350,6D + 169,62$
$C = 1354,4D - 4764,2$	$C = 1089,3D - 4188,8$	$C = 1834,63D - 8748,52$
$S = 12185\ln(D) - 10072$	$S = 1777,1D + 377,72$	-

Utilizzando le formule in Tabella 4.1, inserendo un diametro di 6,3 m, si ricavano i valori minimi dei tre parametri macchina. I risultati sono quindi confrontati con i valori reali della fresa (Tabella 4.2).

Tabella 4.2: Valori di P, C, S stimati con i modelli sperimentali e valori reali

	Valori sperimentali tesi	Ates et Al. 2014	Park et Al. 2018	Valori reali
Potenza testa [kW]	1905	-	2378	2203
Coppia [kNm]	3769	2674	2810	2083
Spinta [kN]	12355	11573	-	12800

Dall'analisi dei risultati in Tabella 4.2, si evince che la potenza fornita alla testa di scavo e la spinta sono perfettamente stimati dai modelli di previsione sperimentali, ricavati nel presente elaborato, in linea con i risultati ottenuti dalle equazioni proposte da Ates et Al. nel 2014 e Park et Al. nel 2018.

Infine, si osserva una sovrastima della coppia rispetto al valore reale, la quale indica, probabilmente, l'esistenza di tipicità nella formazione geologica attraversata.

4.3.2 Fresa Federica

Si riportano nella tabella di seguito le equazioni che legano il diametro D con i tre parametri meccanici (potenza (P), coppia (C), spinta (S)), nel caso di TBM a singolo scudo.

Tabella 4.3: Equazioni che legano il diametro D alla potenza fornita alla testa di scavo (P), alla coppia (C) e alla spinta (S) (TBM a singolo scudo)

Modello sperimentale tesi	Ates et Al. 2014	Park et Al. 2018
$P = 94,279 D^{1,4792}$	-	-
$C = 110,42 D^{2,0014}$	$C = 90,478 D^{1,9951}$	-
$S = 1364,3 D^{1,6314}$	$S = 2261,5 D^{1,2726}$	-

Utilizzando le equazioni in Tabella 4.3, inserendo un diametro di 11,26 m, si stimano i valori di potenza, coppia e spinta con cui deve operare la TBM a singolo scudo. I risultati sono confrontati con i valori reali della fresa (Tabella 4.4).

Tabella 4.4: Valori di P, C, S stimati con i modelli sperimentali e valori reali

	Valori sperimentali tesi	Ates et Al. 2014	Park et Al. 2018	Valori reali
Potenza testa[kW]	3387	-	-	4900
Coppia [kNm]	14047	11336	-	8888
Spinta [kN]	70858	49270	-	123800

Analizzando i risultati in Tabella 4.4, si evidenziano delle differenze tra valori stimati e valori reali. Tali divergenze sono dovute alla particolarità della formazione geologica entro la quale è realizzata la galleria (carbonifero). Durante lo scavo della discenderia con metodo tradizionale sono state riscontrate forti convergenze, fino a 1 m in 12 ore, che hanno richiesto uno studio particolare della TBM da impiegare. Nello specifico non è stata riscontrata una richiesta di coppia elevata per le modeste resistenze del materiale. Per contro, al fine di evitare il bloccaggio dello scudo per le forti convergenze, si è preferito dotare la macchina di una capacità di spinta tale da ridurre il rischio. Pertanto, i valori reali atipici, rispetto al modello teorico sperimentale, sono legati alla tipicità della formazione geologica.

4.3.3 Applicazione dei modelli che tengono conto dell'aspetto geologico

Il contesto geologico lungo il profilo longitudinale del tunnel di base del Moncenisio è caratterizzato, come già osservato, prevalentemente da roccia scistosa e gneiss, soprattutto lungo il tratto 3 e il tratto 4.

Si applicano di seguito i modelli di correlazione ricavati precedentemente, tra i parametri meccanici delle TBM, che tengono in considerazione l'aspetto geologico. Lo scopo è sempre quello di valutare la potenza, il momento torcente e la spinta, a seconda delle equazioni disponibili, per le diverse tipologie di fresa operanti in scisto e gneiss. Per i calcoli si considera un diametro di 11 m.

✓ *Scisto*

I modelli che correlano il diametro della TBM (D) alla potenza fornita alla testa di scavo (P) e alla coppia (C) nel caso di TBM a singolo e TBM a doppio scudo, in formazioni scistose, sono nel seguito riportati:

- TBM a singolo scudo: $C = 26,161D^{2,8067} \quad (15)$

- TBM a doppio scudo: $P = 620,07D - 1720,5 \quad (16)$

$$C = 273,24e^{0,4356D} \quad (17)$$

Tramite le formule (15), (16) e (17), considerando un diametro D di 11 m, si calcolano i valori minimi di potenza alla testa e coppia con cui devono operare le due tipologie di fresa (Tabella 4.5).

Tabella 4.5: valori minimi di P e C con cui devono lavorare le due tipologie di TBM in formazioni rocciose con presenza di roccia scistosa, scelto un diametro di 11 m

TBM	SS	DS
Potenza testa [kW]	-	5100
Coppia [kNm]	21904	32924

✓ *Gneiss*

I modelli che legano il diametro D della TBM alla potenza della testa di scavo (P), alla coppia (C) e alla spinta (S) nel caso di TBM aperte operanti in formazioni rocciose con prevalenza di gneiss sono riportati di seguito:

- TBM aperta: $P = 483,01D - 1173,6 \quad (18)$

$$C = 1427,3D - 5223,9 \quad (19)$$

$$S = 3124,6e^{0,1979D} \quad (20)$$

Inserendo nelle equazioni (18), (19) e (20) un diametro pari a 11 m, si ottengono i valori minimi di P, C e S con cui devono operare le TBM aperte (Tabella 4.6).

Tabella 4.6: valori minimi di P, C e S con cui devono lavorare le TBM aperte in formazioni rocciose con presenza di gneiss, scelto un diametro di 11 m

TBM	Open
Potenza testa [kW]	4140
Coppia [kNm]	10476
Spinta [kN]	27556

Conclusioni

La previsione delle prestazioni di scavo è un elemento fondamentale al fine della progettazione di gallerie. L'ottimizzazione dello scavo meccanizzato mediante frese a piena sezione richiede inoltre continui approfondimenti circa i meccanismi di interazione fra roccia e utensili; si rende quindi indispensabile un'analisi mirata del contesto geologico e geomeccanico in cui l'opera deve essere collocata.

In letteratura esistono molti modelli di previsione dei parametri macchina che influiscono sulle prestazioni dello scavo, i quali però presentano una serie di limitazioni, legate sia alla conoscenza dei parametri richiesti in input sia alla validità delle ipotesi su cui si basano.

Nel presente elaborato sono stati ricercati i modelli di correlazione tra i parametri meccanici delle TBM e tra questi ultimi e la velocità di avanzamento dello scavo (m/mese), con lo scopo di ottenere delle equazioni utilizzabili per effettuare una prima valutazione delle tempistiche di realizzazione dell'opera e per stimare in prima approssimazione i parametri meccanici (essenzialmente potenza, coppia, spinta) con cui devono operare le TBM.

Per ciò che concerne la prima fase dello studio, ossia l'analisi delle correlazioni tra i parametri macchina delle TBM, i modelli sono stati analizzati distinguendo, in un primo momento, per tipologia di frese a piena sezione, utilizzate nella realizzazione delle gallerie (aperta, a singolo scudo e a doppio scudo). I risultati emersi sono in linea con quanto riportato in due studi analoghi, discussi al capitolo 2 del presente elaborato.

Successivamente sono stati ricercati e confrontati i modelli tra i parametri macchina, per le tre tipologie di TBM esaminate, tenendo in considerazione l'aspetto geologico. In questo caso, lo studio è stato in parte limitato dalla scarsa conoscenza dei parametri geomeccanici delle formazioni rocciose (UCS, RMR, GSI); tuttavia l'analisi dei dati ha restituito delle funzioni con indice di correlazione medio – alto nella maggior parte dei casi analizzati. Questo risultato indica che la distinzione fra diverse tipologie di formazioni rocciose (gneiss, calcare, arenaria, ecc..) in cui operano le TBM ha permesso di ottenere, nella maggior parte dei casi, dei raggruppamenti con caratteristiche geomeccaniche molto simili.

Per quanto riguarda l'analisi delle correlazioni tra i parametri macchina e la velocità di avanzamento dello scavo mediante fresa a piena sezione, sono state riscontrate parecchie difficoltà. Innanzitutto, dalla ricerca bibliografica, si è constatato che l'informazione legata alla velocità di avanzamento media non è accessibile. Inoltre, la carenza di informazioni sulla natura geomeccanica delle formazioni rocciose ha pesantemente condizionato ogni tentativo di valutazione dei modelli, in quanto lo stato di fratturazione influisce molto sulla velocità di avanzamento.

Nella fase finale dello studio, in seguito alla validazione dello studio sperimentale, sono stati utilizzati i modelli previsionali per tipologia di fresa, con lo scopo di stimare i parametri meccanici della TBM a singolo scudo “Federica” e della TBM aperta “GEA”, impiegate nella realizzazione del nuovo collegamento ferroviario Torino - Lione. A tal proposito sono stati valutati, in funzione del diametro, i valori minimi di potenza, coppia e spinta per le due tipologie di fresa.

I valori stimati sono stati confrontati con i valori reali delle due TBM per valutare la precisione dei modelli previsionali; si è constatato, a tal proposito, che i valori stimati per la TBM “GEA” sono perfettamente in linea con i parametri reali. Si evidenziano, invece, discordanze tra i valori stimati e quelli reali per quanto riguarda la TBM “Federica”, giustificate dalle tipicità riscontrate durante lo scavo.

Infine, è stato esaminato il profilo geologico dell’opera, individuando le formazioni rocciose principali, e sono state utilizzate le equazioni ottenute in fase sperimentale, in funzione delle diverse tipologie di roccia, con l’obiettivo di ottenere dei risultati quanto più possibile attendibili e rappresentativi della realtà.

I risultati ottenuti sono stati espressi in forma di modelli per l’analisi previsionale dei parametri meccanici delle TBM da roccia; per ulteriori sviluppi sarà necessario ampliare la banca dati, contenente le caratteristiche tecniche di 2200 km di gallerie scavate in roccia mediante TBM, con altri case histories e completare il database con informazioni di carattere geomeccanico; infatti, l’accesso ai parametri caratterizzanti gli ammassi rocciosi, da un punto di vista strutturale, consentirebbe di ottenere dei modelli previsionali molto precisi e specifici.

Bibliografia

- Acaroglu, O. (2011). Prediction of thrust and torque requirements of TBMs with fuzzy logic models. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 26(2), 267–275.
- AFTES Working Group no. 4. (2005). New Recommendations on Choosing Mechanized Tunnelling Techniques. *Tunnels et Ouvrages Souterrains, Hors-Serie No. 1*.
- Anagnostou, G., & Ehrbar, H. (2013). *Tunneling Switzerland*.
- Ates, U., Bilgin, N., & Copur, H. (2014). 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*, 40, 46–63.
- Balci, C. (2009). Correlation of rock cutting tests with field performance of a TBM in a highly fractured rock formation: A case study in Kozyatagi-Kadikoy metro tunnel, Turkey. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 24(4), 423–435.
- Balci, C., & Tumac, D. (2012). Investigation into the effects of different rocks on rock cuttability by a V-type disc cutter. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 30, 183–193.
- Benato, A., & Oreste, P. (2015). Prediction of penetration per revolution in TBM tunneling as a function of intact rock and rock mass characteristics. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 74, 119–127.
- Bilgin, N. (2015). An appraisal of TBM performances in Turkey in difficult ground conditions and some recommendations. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 57, 265–276.
- Bilgin, N., Copur, H., & Balci, C. (2012). Effect of replacing disc cutters with chisel tools on performance of a TBM in difficult ground conditions. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 27(1), 41–51.
- Bilgin, N., Copur, H., & Balci, C. (2014). *Mechanical excavation in mining and civil industries* (Vol. 28).
- Bilgin, N., Balci, C., Acaroglu, O., Tuncdemir, H., Eskikaya, S., Akgul, M., & Algan, M. (1999). The performance prediction of a TBM in tuzla-dragos sewerage tunnel. *World Tunnel Congress*, 817–822.
- Bruland, A. (2000). *Prediction model for performance and costs*. Norwegian University of Science and Technology of Trondheim (NTNU).
- Ergun, O. A., Erdoğan, C., & Ekinci, E. (2016). Analysis of the EPB-TBM Excavation Parameters Used in a Tunnel Construction in Istanbul. *Proceedings of the 2nd World Congress on Mechanical, Chemical, and Material Engineering*, 1–8.
- Farrokh, E., Rostami, J., & Loughton, C. (2012). Study of various models for estimation of penetration rate of hard rock TBMs. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 30, 110–123.

- Hansen, A. M. (1998). The History of TBM Tunneling in Norway. In *Norwegian TBM Tunneling publication no.11* (pp. 11–19).
- Hansen, J. N. (2018). *Comparison of existing performance prediction models for hard rock tunnel boring based on data collected at the Follo Line Project* (Master's thesis, Norwegian University of Science and Technology).
- Hassanpour, J., Rostami, J., Zhao, J., & Azali, S. T. (2015). TBM performance and disc cutter wear prediction based on ten years experience of TBM tunnelling in Iran. *Geomechanik Und Tunnelbau*, 8(3), 239–247.
- Innaurato, N. (1990). Proceedings I Italo – Brazilian Congress, Cagliari, Italy.
- Macias, F. J., Wilfing, L., & Andersson, T. (2015). *Performance and cutter life assessments in hard rock tunnelling*. 267–272.
- Maidl, B., Schmid, L., Ritz, W., & Herrenknecht, M. (2008). *Hardrock Tunnel Boring Machines*. Germany: Ernst and Son.
- Mohammadi, S. D., Torabi-Kaveh, M., & Bayati, M. (2015). Prediction of TBM penetration rate using intact and mass rock properties (case study: Zagros long tunnel, Iran). *Arabian Journal of Geosciences*, 8(6), 3893–3904.
- Park, B., Lee, C., Choi, S., Kang, T., & Chang, S. (2018). *Statistical Analysis of TBM Database to Estimate Technical Specifications of TBMs*.
- Peila, D. (2018). Appunti dal corso di “Tunneling”, Politecnico di Torino.
- Rispoli, A. (2013). *Analisi teorico-sperimentale per l'ottimizzazione dello scavo meccanizzato con utensili a disco* (Tesi di laurea magistrale, Politecnico di Torino).
- Rispoli, A. (2018). *HARD ROCK TBM EXCAVATION: PERFORMANCE ANALYSIS AND PREDICTION* (Doctoral thesis, Politecnico di Torino).
- Rostami, J., & Ozdemir, L. (1993). A new model for performance prediction of hard rock TBMs. *Proceedings of Rapid Excavation and Tunneling Conference, USA*, 794 – 809.
- Rostami, J., Ozdemir, L., & Nilson, B. (1996). *Comparison between CSM and NTH hard rock TBM performance prediction models*, ISDT1996, Las Vegas.
- Sapigni, M., Berti, M., Bethaz, E., Busillo, A., & Cardone, G. (2002). TBM performance estimation using rock mass classifications. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 39(6), 771–788.
- Stack, B. (1995). *Encyclopaedia of Tunneling, Mining and Drilling Equipment* (Vol. III). Hobart, Tasmania: Mudén Publishing Company.
- Vagnon, F. (2013). *Scavo meccanico in roccia: analisi sperimentale, analitica e numerica dei parametri che influenzano l'azione dei dischi delle TBM* (Tesi di laurea magistrale, Politecnico di Torino).

Wilfing, F. (2016). *The Influence of Geotechnical Parameters on Penetration Prediction in TBM Tunneling in Hard Rock*.

Wittke, W. (2006). *Stability analysis and design for mechanized tunneling*. WBI-PRINT 6, VGE-Verlag Glückauf GmbH, Essen 2006, ISBN 978-3-7739-1306-7

Yagiz, S. (2010). TBM performance prediction based on rock properties. *Eurock 2006: Multiphysics Coupling and Long Term Behaviour in Rock Mechanics*, 663–670.

www.creg-germany.com

www.herrenknecht.com

www.selitunnel.com

www.telt-sas.com

www.therobbinscompany.com