POLITECNICO DI TORINO

Facoltà di Ingegneria

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Civile

STUDIO DELL'INFLUENZA DEL CONDIZIONAMENTO E DELLA DEGRADAZIONE DEGLI AGENTI CONDIZIONANTI SUI PARAMETRI MECCANICI DEL TERRENO

Tesi di Laurea Magistrale

Candidato:

Roberto Orsini

Relatore:

Ing. Daniele Martinelli

Correlatori:

Prof. Ing. Daniele Peila

Ing. Andrea Carigi

A.A 2018/2019

Indice

Premessa **9**

Introduzione **11**

1 Scavo meccanizzato con l'uso di Tunnel Boring Machine **12**

1.1 Rock TBM 14

1.1.1 TBM aperte 15

1.1.2 TBM con singolo scudo 18

1.1.3 TBM con doppio scudo 20

1.2 Scelta della tipologia di TBM in roccia 23

2 Scavo con TBM nei terreni **26**

2.1 Mechanical Supported TBM 27

2.2 Compressed Air TBM 28

2.3 Slurry / Hydro-shield TBM 30

3 Earth Pressure Balance shield TBM **36**

3.1 Struttura e funzionamento di una TBM di tipo EPBs 37

3.2 Modalità di scavo di una TBM di tipo EPBs 45

4 Condizionamento del terreno **48**

4.1 Agenti condizionanti 50

4.2 Condizionamento con schiume 54

4.2.1 Parametri caratteristici del condizionamento con schiume 54

4.2.2 Prove di laboratorio sulle schiume 57

4.3 Prove di laboratorio per la determinazione del condizionamento ottimale ... 58

4.3.1 Slump test 59

4.3.2 Prova di estrazione 61

4.3.3 Prova di permeabilità 64

5 Caso Studio **66**

5.1 Prove di laboratorio per la valutazione delle caratteristiche geomeccaniche del terreno condizionato 68

5.1.1 Prova di Slump 69

5.1.1.1 Applicazione della prova di slump al caso studio 69
5.1.2 Miscelatore torsionale 70
5.1.2.1 Applicazione della prova con miscelatore torsionale al caso studio 73
5.1.3 Prova scissometrica 74
5.1.3.1 Applicazione della prova scissometrica al caso studio 78
5.1.4 Prova di taglio diretto 80
5.1.4.1 Applicazione della prova di taglio diretto al caso studio 84
5.1.5 Prova Proctor 85
5.1.5.1 Applicazione della prova Proctor al caso studio 94
5.2 Caratterizzazione del terreno studiato 95
5.2.1 Parametri di condizionamento ottimali 95
5.2.2 Caratterizzazione della granulometria 96
5.2.3 Valutazione dei contenuti d'acqua naturale 97
5.2.4 Procedura delle operazioni di condizionamento 99
5.2.5 Metodologia di conservazione del terreno condizionato 101
5.3 Risultati prove di Slump 102
5.3.1 Commenti sui risultati delle prove di slump 109
5.4 Risultati prove con il miscelatore torsionale 110
5.4.1 Commenti sui risultati delle prove con miscelatore torsionale 120
5.5 Risultati prove scissometrica 121
5.5.1 Commenti sui risultati delle prove scissometriche 130
5.6 Risultati prove di taglio diretto 130
5.6.1 Commenti sui risultati delle prove di taglio diretto 144
5.7 Risultati prove Proctor 145
5.7.1 Commenti sui risultati delle prove Proctor 149
6 Conclusioni 151
Bibliografia 153

Indice delle figure

Figura 1.1 - Macchina da scavo scudata di Brunel del 1835 (Guglielmetti et al. 2008) 12
Figura 1.2 - Testa da scavo della macchina ideata da Price nel 1896 (Maidl et al. 2012)..... 13
Figura 1.3 - Elementi principali costituenti una TBM aperta 16
Figura 1.4 - Elementi principali costituenti una TBM aperta 17
Figura 1.5 - Ciclo di scavo di una TBM aperta da roccia (Kawasaki, 2009) 18
Figura 1.6 - Elementi principali costituenti una TBM con singolo scudo (Peila, 2018) 19
Figura 1.7 - Ciclo di scavo di una TBM da roccia con singolo scudo (Wittke et al., 2006) 20
Figura 1.8 - Elementi principali costituenti una TBM con doppio scudo (Peila, 2018) 21
Figura 1.9 - Ciclo di scavo di una TBM da roccia con doppio scudo (Wittke et al., 2006) 22
Figura 1.10 - Velocità di avanzamento delle diverse tipologie di TBM da roccia in funzione . 23
Figura 2.1 - Elementi principali costituenti una Mechanical supported TBM (A.F.T.E.S., 2011) 28
Figura 2.2 - Distribuzione delle pressioni al fronte di scavo (Maidl, 2012)..... 28
Figura 2.3 - Elementi principali costituenti una Compressed air TBM a scudo aperto..... 30
Figura 2.4 - Schema di una TBM di tipo Slurry-shield (Guglielmetti et al., 2008) 31
Figura 2.5 - Elementi principali costituenti una TBM tipologia Hydroshield (Herrenknecht).. 33
Figura 2.6 - Schema del funzionamento dell'impianto di separazione 34
Figura 2.7 - Campo di applicazione delle TBM scudate con supporto 35
Figura 3.1 - Schema concettuale di funzionamento di una TBM-EPBs (Peila, 2018) 36
Figura 3.2 - Elementi principali costituenti una TBM tipologia EPBs (Herrenknecht et al., 2011); (1) Cutterhead, (2) Camera di scavo, (3) Bulkhead, (4) Martinetti di spinta, (5) Estrattore a coclea, (6) Erettore dei conci, (7) Rivestimento finale installato, (8) Scudo 37
Figura 3.3 - Testa da scavo in una TBM tipologia EPBs (Peila, 2018) 38
Figura 3.4 - Cuscinetto reggispinta in una TBM tipologia EPBs (Peila, 2018) 39
Figura 3.5 - Estrattore a coclea in una TBM tipologia EPBs (Peila, 2018) 40
Figura 3.6 - Martinetti di spinta in una TBM tipologia EPBs (Peila, 2018) 41
Figura 3.7 - Erettore dei conci in una TBM tipologia EPBs (Peila, 2018)..... 42
Figura 3.8 - Camera iperbarica in una TBM tipologia EPBs (Peila, 2018)..... 42
Figura 3.9 - Sistema di Backfilling (Peila et al. 2010)..... 44
Figura 3.10 - Scavo in modalità aperta con TBM-EPBs (Hoek et al., 2005)..... 46
Figura 3.11 - Scavo in modalità di transizione con TBM-EPBs (Hoek et al., 2005)..... 46

Figura 3.12 - Scavo in modalità chiusa con TBM-EPBs (Hoek et al., 2005) 47
Figura 4.1 - Comportamento del tensioattivo nella formazione 51
Figura 4.2 - Effetti della schiuma sul terreno (Langmaack, 2000)..... 52
Figura 4.3 - Immagine e schema di funzionamento del generatore di schiuma usato presso il Laboratorio "Gallerie ed Opere in sotterraneo" del Politecnico di Torino (Martinelli, 2016) . 57
Figura 4.4 - Schema della prova di Slump 59
Figura 4.5 - Diagramma di valutazione della qualità della di slump in funzione 61
Figura 4.6 - Fotografia dell'attrezzatura per la prova di estrazione utilizzata al laboratorio .. 62
Figura 4.7 - Schema del test di permeabilità (Martinelli, 2016) 65
Figura 5.1 - Disegno tecnico del miscelatore torsionale-vista laterale (a);..... 72
Figura 5.2 - Esempio di strumento Vane Shear Test manuale (Martinelli et al., 2015) 77
Figura 5.3 - Immagine della paletta modificata utilizzata in questa campagna di prove: 79
Figura 5.4 - Schema della sezione di una scatola di taglio diretta (Fratta et al., 2007) 80
Figura 5.5 - Schema della disposizione degli elementi di una scatola di taglio diretto 82
Figura 5.6 - Schema generale di un dispositivo per la prova 83
Figura 5.7 - Curve di costipamento della prova Proctor (Baglieri, 2016) 87
Figura 5.8 - Schema prova Proctor standard - Metodo A (Salahudeen et al., 2018) 89
Figura 5.9 - Schema prova Proctor modificata - Metodo B (Orabi, 2014) 90
Figura 5.10 - Sequenza colpi pestello - fustella piccola (ASTM, 2007)..... 90
Figura 5.11 - Sequenza colpi pestello - fustella grande (ASTM, 2007)..... 91
Figura 5.12 - Curve prova Proctor per diversi terreni ottenute con uguale energia di costipamento (Baglieri, 2016) 92
Figura 5.13 - Esempio delle due tipologie di terreno: "Terreno tagliato ai 20 mm" (a); 96
Figura 5.14 - Curve granulometriche dei materiali studiati 97
Figura 5.15 – Modalità di conservazione dei campioni di terreno 101
Figura 5.16 - Attrezzatura utilizzata per la prova di slump 102
Figura 5.17 - Immagine del miscelatore torsionale a disposizione presso il "Laboratorio di 110
Figura 5.18 - Esempio del miscelatore torsionale prima dell'esecuzione della prova (a), durante l'esecuzione della prova con terreno "Grossolano" naturale (b), durante l'esecuzione della prova..... 111
Figura 5.19 - Risultati miscelatore torsionale: Terreno naturale " Tagliato ai 20 mm" 113
Figura 5.20 - Risultati prove miscelatore torsionale: Prodotto A 114
Figura 5.21 - Confronto tra i risultati del miscelatore torsionale ai vari giorni: Prodotto A .. 114

Figura 5.22 - Risultati prove miscelatore torsionale: Prodotto B..... 115
Figura 5.23 - Confronto tra i risultati del miscelatore torsionale ai vari giorni: Prodotto B .. 115
Figura 5.24 - Risultati prove miscelatore torsionale: Prodotto C..... 116
Figura 5.25 - Confronto tra i risultati del miscelatore torsionale ai vari giorni: Prodotto C .. 116
Figura 5.26 - Risultati miscelatore torsionale: Terreno naturale "Grossolano"..... 117
Figura 5.27 - Risultati prove miscelatore torsionale: Prodotti C+D 118
Figura 5.28 - Confronto tra i risultati del miscelatore torsionale ai vari giorni: Prodotti C+D118
Figura 5.29 - Risultati prove miscelatore torsionale: Prodotti C+E..... 119
Figura 5.30 - Confronto tra i risultati del miscelatore torsionale ai vari giorni: Prodotti C+E 119
Figura 5.31 - Risultati prova scissometrica sul terreno naturale 123
Figura 5.32 - Confronto ai vari giorni tra i risultati della prova scissometrica sul terreno 124
Figura 5.33 - Confronto ai vari giorni tra i risultati della prova scissometrica sul terreno 125
Figura 5.34 - Confronto ai vari giorni tra i risultati della prova scissometrica sul terreno 126
Figura 5.35 - Confronto ai vari giorni tra i risultati della prova scissometrica sul terreno 127
Figura 5.36 - Confronto ai vari giorni tra i risultati della prova scissometrica sul terreno 128
Figura 5.37 - Sintesi dei risultati delle prove scissometriche..... 129
Figura 5.38 - Macchina di taglio utilizzata per la campagna di prove:..... 131
Figura 5.39 - Scatola di taglio impiegata nella campagna di prove..... 131
Figura 5.40 - Coesione del terreno naturale in funzione del contenuto d'acqua 134
Figura 5.41 - Angolo d'attrito del terreno naturale in funzione del contenuto d'acqua 134
Figura 5.42 – Confronto ai vari giorni tra la coesione del terreno naturale e la coesione del terreno condizionato con il Prodotto A 135
Figura 5.43 - Confronto ai vari giorni tra l'angolo d'attrito del terreno naturale e l'angolo d'attrito del terreno condizionato con il Prodotto A 136
Figura 5.44 - Confronto ai vari giorni del rapporto tra i parametri di resistenza a taglio del terreno naturale e del terreno condizionato con il Prodotto A..... 136
Figura 5.45 - Confronto ai vari giorni tra la coesione del terreno naturale e la coesione del terreno condizionato con il Prodotto B 137
Figura 5.46 - Confronto ai vari giorni tra l'angolo di attrito del terreno naturale e l'angolo d'attrito del terreno condizionato con il Prodotto B 138
Figura 5.47 - Confronto ai vari giorni tra il rapporto dei parametri di resistenza a taglio del terreno e del terreno condizionato con il Prodotto B 138

Figura 5.48 - Confronto ai vari giorni tra la coesione del terreno naturale e la coesione del terreno condizionato con il Prodotto C 139
Figura 5.49 - Confronto ai vari giorni tra l'angolo d'attrito del terreno naturale e l'angolo d'attrito del terreno condizionato con il Prodotto C 140
Figura 5.50 - Confronto ai vari giorni tra il rapporto dei parametri di resistenza a taglio del terreno naturale e del terreno condizionato con il Prodotto C 140
Figura 5.51 - Sintesi dei risultati delle prove di taglio diretto ai vari giorni 143
Figura 5.52 - Sintesi dei risultati delle prove di taglio diretto ai vari giorni 143
Figura 5.53 - Attrezzatura utilizzata per lo svolgimento delle prove Proctor 145
Figura 5.54 - Sintesi dei risultati delle prove Proctor 148
Figura 5.55 - Esempio di una prova Proctor a rifiuto dopo tre giorni 149
Figura 5.56 - Esempio di una prova Proctor a rifiuto dopo 28 giorni 150

Indice delle Tabelle

Tabella 5.1 - Parametri ottimali del condizionamento 96
Tabella 5.2 - Contenuti di acqua naturale dei terreni oggetti di studio 98
Tabella 5.3 - Risultati prove di slump Prodotto: A 103
Tabella 5.4 - Risultati prove di slump Prodotto: B 104
Tabella 5.5 - Risultati prove di slump: Prodotto: C 105
Tabella 5.6 - Risultati prove di slump: Prodotto: C+D 106
Tabella 5.7 - Risultati prove di slump Prodotto: C+E 107
Tabella 5.8 - Comparazione tra i risultati delle prove di slump 108
Tabella 5.9 - Risultati miscelatore torsionale: Prodotto A 114
Tabella 5.10 - Risultati miscelatore torsionale: Prodotto B 115
Tabella 5.11 - Risultati miscelatore torsionale: Prodotto C 116
Tabella 5.12 - Risultati miscelatore torsionale: Prodotti C+D 118
Tabella 5.13 - Risultati miscelatore torsionale: Prodotti C+E 119
Tabella 5.14 - Risultati prova scissometrica sul terreno naturale 123
Tabella 5.15 - Risultati prova scissometrica sul terreno condizionato: Prodotto A 124
Tabella 5.16 - Risultati prove scissometriche sul terreno condizionato: Prodotto B 125
Tabella 5.17 - Risultati prova scissometrica: Prodotto C 126

Tabella 5.18 - Risultati prova scissometrica: Prodotto C+D 127
Tabella 5.19 - Risultati prova scissometrica: Prodotto C+E 128
Tabella 5.20 - Risultati prove di taglio diretto sul terreno naturale 133
Tabella 5.21 - Parametri di resistenza a taglio del terreno naturale 134
Tabella 5.22 - Risultati prove di taglio diretto sul terreno condizionato: Prodotto A 135
Tabella 5.23 - Parametri di resistenza a taglio del terreno condizionato: Prodotto A 135
Tabella 5.24 - Risultati prove di taglio diretto sul terreno condizionato: Prodotto B 137
Tabella 5.25 - Parametri di resistenza a taglio del terreno condizionato: Prodotto B 137
Tabella 5.26 - Risultati prove di taglio diretto sul terreno condizionato: Prodotto C..... 139
Tabella 5.27 - Parametri di resistenza a taglio del terreno condizionato: Prodotto C 139
Tabella 5.28 - Risultati prova di taglio diretto sul terreno condizionato con i Prodotti C+D. 141
Tabella 5.29 - Risultati prova di taglio diretto sul terreno condizionato con i Prodotti C+E . 142
Tabella 5.30 - Risultati prova Proctor sul terreno naturale 146
Tabella 5.31 - Risultati prova Proctor con il Prodotto A 146
Tabella 5.32 - Risultati prova Proctor con il Prodotto B..... 147
Tabella 5.33 - Risultati prova Proctor con il Prodotto C..... 147
Tabella 5.34 - Risultati prova Proctor con il Prodotto C+D 147
Tabella 5.35 - Risultati prova Proctor con il Prodotto C+E..... 147

Premessa

Lo scavo di gallerie attraverso l'utilizzo delle macchine TBM con tecnologia EPBs (Tunnel Boring Machine-Earth Pressure Balance shield) è ampiamente diffuso grazie alla grande varietà di tipologie di terreno in cui queste macchine possono essere impiegate. Tale versatilità viene fornita mediante l'uso di agenti condizionanti che modificano le proprietà del suolo con l'obiettivo di creare condizioni che lo rendano idoneo al processo di scavo con queste macchine.

Il terreno condizionato, in virtù della sua pastosità e bassa permeabilità consente di controllare le pressioni in camera di scavo da applicare al fronte, evitare la creazione di possibili moti di filtrazione, ridurre l'usura degli utensili e il momento torcente necessario durante lo scavo e, infine, permette un'estrazione dalla camera di scavo con un flusso omogeneo attraverso l'estrattore a coclea.
Il condizionamento del terreno, quindi, è necessario perché rende possibile l'utilizzo di macchine TBM di tipo EPBs e, lo studio accurato del condizionamento da applicare permette un notevole miglioramento delle prestazioni di scavo. Lo sviluppo di prodotti innovativi, inoltre, consente di estendere l'utilizzo di queste macchine su un range molto ampio di terreni.

L'utilizzo di questa tecnologia, d'altra parte, causa l'insorgere di specifiche problematiche logistiche legate alle operazioni di cantiere, allo stoccaggio del materiale e al suo possibile riutilizzo in altri settori.

Lo scavo di una galleria comporta l'estrazione di una grande quantità di materiale e il relativo stoccaggio costituisce un tema molto importante. Infatti, se le aree disponibili limitrofe al cantiere non sono sufficientemente estese da poter accogliere tutto il materiale scavato, si avranno limitazioni sui volumi scavabili e quindi ripercussioni sulla velocità di avanzamento della macchina.

Un problema correlato al terreno condizionato deriva dal fatto deve restare all'interno del cantiere fino a quando le concentrazioni degli agenti condizionanti utilizzati

scendano al di sotto dei valori limiti imposti per legge. Altrimenti, il terreno dovrebbe essere smaltito come rifiuto, con i relativi costi che ne deriverebbero.

Inoltre, dal punto di vista geotecnico, il terreno presenta subito dopo il condizionamento una consistenza tale da impedirne sia un utilizzo come materiale da costruzione di rilevati o strutture in terra, sia un suo agevole abbancamento nei depostiti finali.

Nel presente lavoro si sono indagate in funzione del tempo le caratteristiche meccaniche del terreno sottoposto a condizionamento. Infatti, il processo di biodegradazione degli agenti condizionanti che si sviluppa progressivamente al passare del tempo produce effetti sulle proprietà del terreno condizionato.

Si è indagato circa la possibilità e le tempistiche necessarie al materiale a sviluppare caratteristiche meccaniche tali da rendere possibile un suo abbancamento.
Tale ricerca mira ad una preliminare valutazione della procedura per la determinazione dei tempi di recupero e quindi di stoccaggio del materiale in cantiere.

Introduzione

La presente tesi si colloca all'interno di uno studio per la realizzazione di una galleria, prevista lungo lo sviluppo di una nuova linea ferroviaria in progettazione, che verrà scavata mediante l'uso di TBM-EPBs. Il lavoro si è focalizzato in particolare sull'aspetto riguardante il progressivo degrado degli agenti condizionanti utilizzati a cui corrisponde l'evoluzione nel tempo delle caratteristiche geomeccaniche del terreno condizionato che verrà estratto.
Si è voluto analizzare se, e nell'eventualità questo accada, dopo quanto tempo il terreno riacquistasse proprietà meccaniche tali da renderlo abbancabile e utilizzabile come materiale da costruzione per opere in terra come, ad esempio, per i rilevati previsti lungo la stessa linea ferroviaria di cui fa parte la galleria.

Per fornire una risposta a tale questione, sono state condotte delle prove a diversi giorni, presso il "Laboratorio di Gallerie ed Opere in sotterraneo" del Politecnico di Torino, sul materiale proveniente dall'area di scavo. Nello specifico, sul terreno analizzato sono state eseguite: prove di slump, prove con miscelatore torsionale, prove scissometriche, prove di taglio diretto ed infine prove Proctor.
Lo studio è stato compiuto su un terreno condizionato utilizzando cinque diversi prodotti. In questo modo, sono stati valutati gli effetti che ciascun prodotto induce sul terreno e come il comportamento di questo si evolve differentemente nel tempo al degradarsi dei prodotti utilizzati.
Le medesime prove eseguite sui campioni di terreno condizionato hanno riguardato anche il terreno naturale, quindi, queste permettono non solo un confronto, a vari giorni, tra i diversi prodotti condizionanti ma anche un confronto diretto con le proprietà del terreno originale.

Nel lavoro di tesi ha assunto una particolare rilevanza proprio questo paragone, effettuato nel tempo tramite le prove sopra citate, tra le caratteristiche indagate dei vari terreni condizionati e del terreno originale. In questo modo si forniscono chiare informazioni sullo stato di recupero delle proprietà meccaniche del terreno.

1 Scavo meccanizzato con l'uso di Tunnel Boring Machine

Il primo brevetto registrato relativo all'invenzione di una macchina da scavo scudata risale al 1818 per mano dell'ingegnere francese Brunel. Ideò questa macchina per lo scavo del tunnel al di sotto del Tamigi a Londra la cui costruzione iniziò nel 1825 e si concluse solo nel 1843 a causa di problematiche che insorsero e provocarono prolungati stop all'avanzamento dei lavori e che, nel 1835, resero necessarie modifiche e miglioramenti alla macchina inizialmente concepita. Quest'ultima prevedeva uno scudo in ghisa rettangolare sotto diviso in più celle, al cui interno lavoravano gli operai, le quali potevano avanzare separatamente grazie a martinetti a vite che appoggiavano sul rivestimento in mattoni già installato nelle sezioni precedenti (Figura 1.1).

Figura 1.1 - Macchina da scavo scudata di Brunel del 1835 (Guglielmetti et al. 2008)

Negli anni successivi si susseguirono diversi brevetti che, prendendo spunto dalla macchina di Brunel, apportarono modifiche significative come l'introduzione dello scudo cilindrico, la possibilità di iniettare malte cementizie nel gap tra scudo e terreno, l'avanzamento in blocco intero dello scudo e l'utilizzo di pistoni idraulici per la spinta in avanzamento. Lo scudo funzionava bene come sostegno provvisorio alla cavità in terreni sciolti ma non era progettato per stabilizzare il fronte di scavo e soprattutto per evitare flussi di acqua all'interno dello scavo che causarono molti problemi sia di tipo strutturale sia di tipo funzionale in quanto le operazioni di scavo erano rese impossibili dalla presenza di ingenti quantitativi di acqua all'interno della galleria.

Per ovviare a questo problema si applicò l'uso della tecnologia ad aria compressa, inizialmente come nella costruzione dell'Hudson River Tunnel del 1880 senza l'utilizzo di macchine scudate, poi nel 1886 l'ingegnere inglese Greathead nella costruzione della London Underground riuscì ad applicare tale tecnologia in combinazione con l'utilizzo di macchine con scudo per applicare una pressione al fronte che si opponga a quella generata dalla presenza di acqua. Lo scavo nonostante avvenisse sotto la protezione dello scudo e con l'ausilio di aria compressa per evitare le venute d'acqua continuava ad essere condotto manualmente il che significava innanzitutto esporre ancora gli operai a rischi e poi la velocità di avanzamento risultava limitata.

Lo scavo manuale fu sostituito dallo scavo meccanizzato nel 1896 quando Price brevettò una macchina dotata di scudo secondo il modello di Greathead equipaggiata con una testa di scavo rotante attraverso un albero mosso da energia elettrica. La testa da scavo era costituita da bracci disposti a raggera su cui erano montati gli utensili scavanti ed era inoltre dotata di raccoglitori in grado di prendere il materiale scavato da terra e depositarlo all'interno di carrelli per essere poi trasportato al di fuori della galleria (*Figura 1.2*).

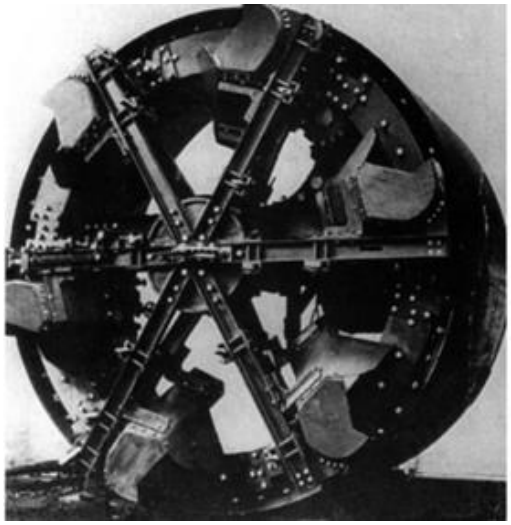


Figura 1.2 - Testa da scavo della macchina ideata da Price nel 1896 (Maidl et al. 2012)

Questo fu il primo esempio di macchina dotata sia di scudo protettivo che di modalità meccanizzata per lo scavo e il trasporto del materiale rimosso. Da questo prototipo e da quello di Greathead che usava scudo e l'aria compressa per fornire una pressione

stabilizzante al fronte si svilupparono successivamente le diverse tecnologie che hanno condotto alle moderne macchine utilizzate odiernamente.

Nessuna grande innovazione tecnica di nota si sviluppò fino circa gli anni ’60 del XX secolo quando si riscontrò un rapido perfezionamento tecnologico in queste macchine. In particolare, si differenziarono con gli anni due grandi tipologie di TBM: una usata per gli scavi in roccia e l’altra impiegata per gli scavi in terreni.

1.1 Rock TBM

Nel 1956 grazie all’intuizione di James Robbins di equipaggiare la testa fresante con utensili a disco rotanti (disc cutter tools) si riuscì a raggiungere produzioni invidiabili anche su rocce dure, e da quel momento si diffuse sistematicamente l’utilizzo di frese meccanizzate a piena sezione per lo scavo di gallerie in roccia.

In generale il funzionamento di una TBM per roccia utilizza un cuscinetto reggispinta per fornire contemporaneamente sia la rotazione alla testa fresante (cutterhead) sia l’applicazione della spinta longitudinale contro al fronte.
La testa fresante, nella maggior parte dei casi è costituta da una singola placca di acciaio piatta o leggermente convessa, equipaggiata con utensili a forma di disco liberi di ruotare attorno al perno che li collega alla fresa. Tali utensili si trovano disposti sulla fresa secondo una spaziatura prestabilita sulla base di test svolti sul materiale da scavare lungo il tragitto.
Grazie alla simultanea applicazione della spinta normale al fronte e della coppia torcente si induce tramite i dischi la creazione e propagazione di fratture che producono il distacco della roccia. Il materiale da rimuovere viene raccolto da opportune tasche (buckets), collocate nella parte più esterna della testa, che convogliano tramite una tramoggia posta dietro la cutterhead il marino al nastro trasportatore con il quale viene trasferito prima attraverso la parte posteriore della macchina (back-up) e poi sarà portato nel cantiere esterno fuori la galleria.
Il back-up costituisce la parte retrostante la testa e comprende la cabina di comando con tutte le componenti elettriche e idrauliche necessarie per il funzionamento della

macchina, oltre che alle varie parti meccaniche strutturali (trave principale), e per la trasmissione del moto (motori e ingranaggi). È dotato di ruote per avanzare insieme alla parte anteriore della macchina a cui è collegato.

Elementi principali che caratterizzano le TBM sono la presenza dello scudo dietro alla testa di scavo e la tipologia di spinta con la quale si fa avanzare il macchinario. In base a questi parametri si distinguono tre diverse categorie di frese in roccia:

- TBM aperta
- TBM con singolo scudo
- TBM con doppio scudo

1.1.1 TBM aperte

Le TBM aperte sono impiegate per lo scavo in ammassi rocciosi aventi ottime caratteristiche geomeccaniche con un elevato tempo di auto-portanza e buone condizioni di stabilità. Per questo motivo lo scudo come elemento di sostegno in questi casi non risulta essere necessario, solo a volte sono presenti scudi di limitata lunghezza a ridosso della testa, per proteggere gli operai e le parti delicate della macchina da eventuali singoli distaccamenti di materiale roccioso.

Vista la stabilità dell'ammasso roccioso, il sistema di installazione dei conci di rivestimento non necessita del sostegno protettivo dello scudo, perciò è collocato nella parte posteriore ai gripper, lasciando a questi lo spazio di aggrapparsi alla roccia. Alcune di queste macchine non sono dotate di un sistema di installazione dei conci e la messa in opera del rivestimento finale avviene nella porzione di galleria dietro alla macchina con le modalità usate nello scavo convenzionale.

Tuttavia, nel caso ci si trovasse in condizioni di instabilità, è comunque possibile installare nei pressi del fronte, attraverso la macchina, supporti di prima fase in calotta come bulloni, centine e calcestruzzo proiettato. È altresì possibile, qualora ci si trovasse ad attraversare zone di faglia o con venute d'acqua importanti, effettuare rispettivamente installazioni di presupporti o iniezioni di grouting a monte della testa

di scavo. Queste operazioni richiederanno un aumento dei tempi con conseguenti rallentamenti all'avanzamento.

Per quanto concerne il funzionamento di avanzamento di una TBM aperta, la cutterhead, sostenuta da un supporto che la mantiene in posizione durante lo scavo, viene spinta contro la roccia per mezzo di pistoni longitudinali (jacks) che si appoggiano ad un sistema di ancoraggio. Questo è costituito da una o due coppie, a seconda se sono rispettivamente TBM tipo Robbins o TBM tipo Kelly, di piastre d'acciaio (grippers) collocate ai lati della macchina.

La differenza sostanziale tra queste due tipologie risiede nella posizione in cui si genera il contrasto. Nelle TBM "Kelly style" (*Figura 1.3*) le due coppie di gripper sono connesse al corpo principale, il quale sorregge anche il supporto della testa fresante, e sono posizionati subito dietro di esso nella parte centrale della macchina.

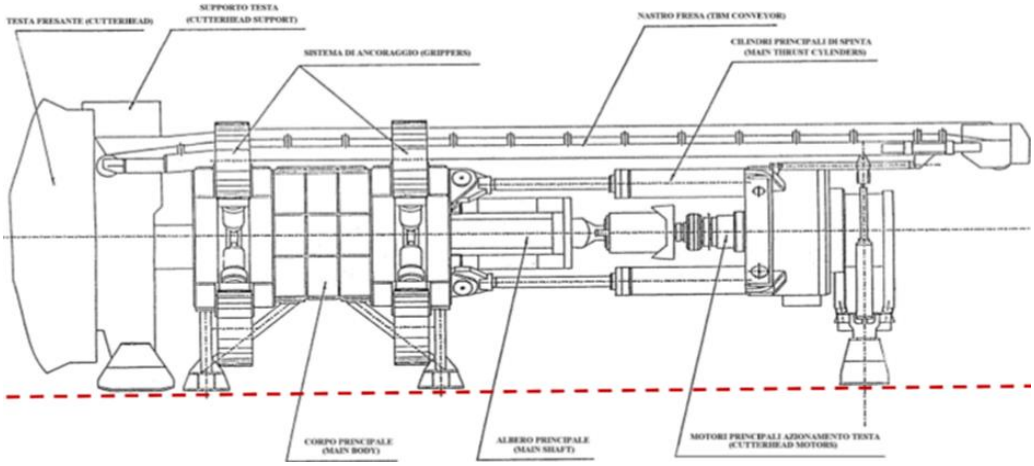


Figura 1.3 - Elementi principali costituenti una TBM aperta con doppia coppia di gripper (Peila, 2018)

Mentre nelle TBM Robbins (*Figura 1.4*) il sistema di ancoraggio è costituito di una singola coppia di grippers allocati nella parte retrostante la macchina e connessi alla trave principale che funge da elemento strutturale portante.

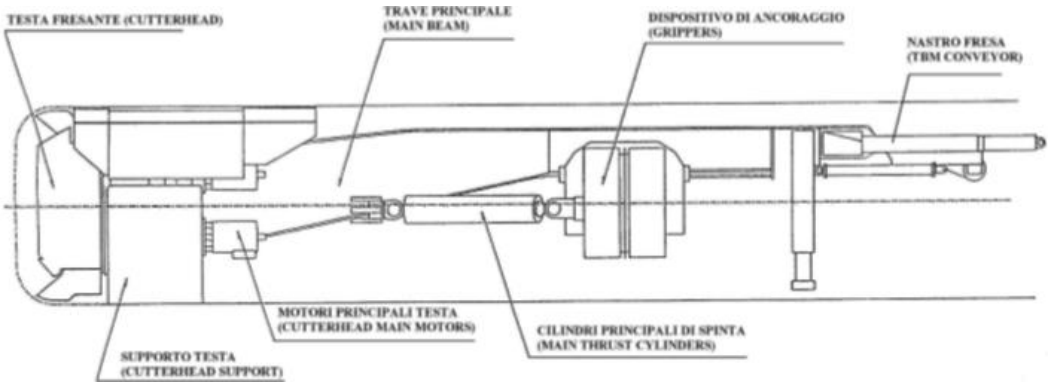


Figura 1.4 - Elementi principali costituenti una TBM aperta con singola coppia di gripper (Peila, 2018)

Questa diversa disposizione di ancoraggi porta ad una differente manovrabilità nelle due tipologie di macchine. Il piano d'appoggio del supporto della cutterhead e i punti d'appoggio per la spinta forniti dalla doppia coppia di gripper impediscono di cambiare l'asse di avanzamento durante lo scavo consentendo questa operazione solo a fine corsa dei pistoni o comunque quando la macchina è ferma.

Mentre nelle TBM tipo Robbins l'asse non è rigidamente fissato e può essere regolato durante lo scavo avendo solo due punti fissi dati dalla singola coppia di gripper e dal supporto della testa di scavo.

I gripper, per fornire il punto d'appoggio fisso necessario, vengono quindi pressati tramite martinetti idraulici alle pareti rocciose dello scavo che, per sopportare la forza che viene trasmessa, devono appunto possedere elevata resistenza. Per questo è necessario capire, dalle indagini preliminari, se le caratteristiche della roccia sono sufficienti per creare un ancoraggio adeguato all'uso di questa tipologia di macchina. Una volta terminata la corsa dei martinetti longitudinali si procede ritirando i gripper laterali e calando a terra i cilindri verticali.

Nelle "Kelly style" TBM sono presenti due appoggi verticali posti uno dietro al corpo principale e l'altro anteriormente in corrispondenza dei gripper laterali, mentre nelle macchine di tipo Robbins l'appoggio anteriore è fornito dallo stesso supporto della testa fresante e il singolo cilindro di supporto presente è nella parte posteriore della macchina dietro alla coppia di gripper. Il loro compito è quello di sorreggere la

macchina e mantenerla allineata in posizione durante la fase di ritiro dei pistoni di spinta longitudinali che trascinano con loro l'intero back-up.

Terminato l'avanzamento della parte posteriore della macchina vengono alzati i cilindri a terra, ricollocati alle pareti i gripper di ancoraggio e ha inizio la nuova fase di scavo con la spinta fornita dai martinetti longitudinali. L'intero processo ciclico di scavo per una macchina aperta con singola coppia di ancoraggio è mostrato in *Figura 1.5*:

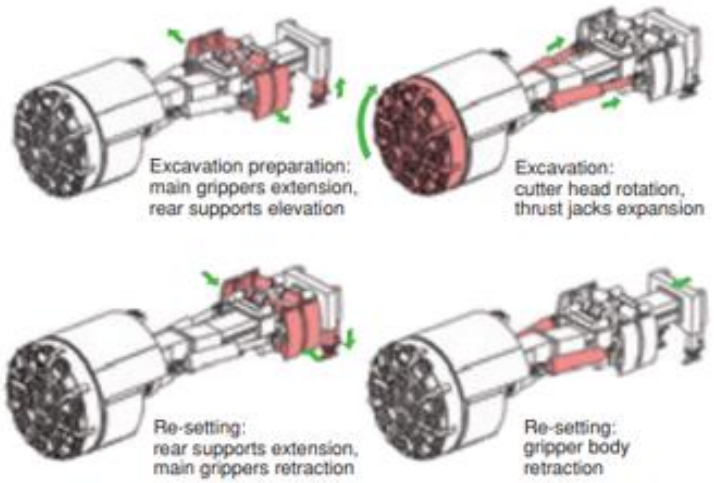


Figura 1.5 - Ciclo di scavo di una TBM aperta da roccia (Kawasaki, 2009)

1.1.2 TBM con singolo scudo

Le TBM a singolo scudo (*Figura 1.6*) sono impiegate in ammassi rocciosi di peggiore qualità rispetto a quelli in cui son impiegate le TBM prive di scudo.

Solitamente si ricorre a tale tipologia quando le caratteristiche geologiche e geotecniche della formazione rocciosa non garantiscono stabilità prolungata senza sostenimenti o non sono in grado di fornire ai gripper la forza di contrasto richiesta per l'avanzamento della macchina. In conseguenza a ciò, in questa tipologia di TBM, la spinta per effettuare lo scavo in avanzamento avviene mediante un certo numero di pistoni idraulici che trovano contrasto sull'anello di rivestimento della galleria posizionato durante il ciclo di avanzamento eseguito in precedenza.

Il rivestimento installato non è provvisorio ma è già quello finale e viene realizzato con conci prefabbricati in calcestruzzo armato, appositamente prodotti in base alle

specifiche caratteristiche ed esigenze del tunnel. Vengono posizionati tramite l'erettore nella parte terminale dello scudo sfruttando la sua protezione.

Lo scudo è un cilindro metallico posizionato subito dietro alla cutterhead con la funzione di svolgere da sostegno temporaneo allo scavo e garantire la sicurezza degli operatori, ricoprendo la macchina fino all'erettore dei conci, i quali una volta installati fungeranno poi loro da supporto necessario.

La testa fresante della macchina presenta un diametro maggiore di quello dello scudo in modo da permettere lo svilupparsi delle deformazioni radiali al contorno dello scavo ed evitare la nascita di attriti eccessivi che ostacolerebbero l'avanzamento della macchina. Viene però a formarsi un gap che deve essere riempito con l'iniezione di miscele a base cementizia e ciò avviene nella parte terminale dello scudo in seguito all'installazione del rivestimento finale.

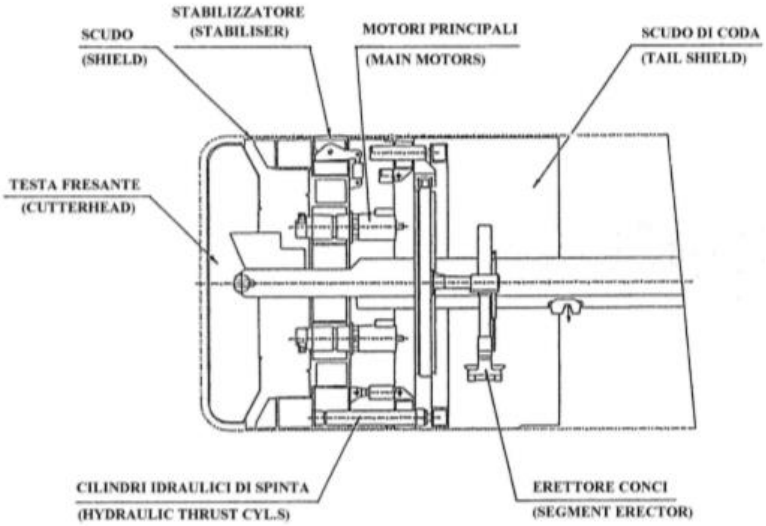


Figura 1.6 - Elementi principali costituenti una TBM con singolo scudo (Peila, 2018)

Essendo la spinta sviluppata dai martinetti che agiscono sull'ultimo anello di rivestimento installato, non è possibile eseguire contemporaneamente la fase di avanzamento dello scavo e la fase di collocazione dei conci. Si tratta perciò di operazioni che vanno svolte separatamente alternando in sequenza le due fasi come mostrato in *Figura 1.7*:

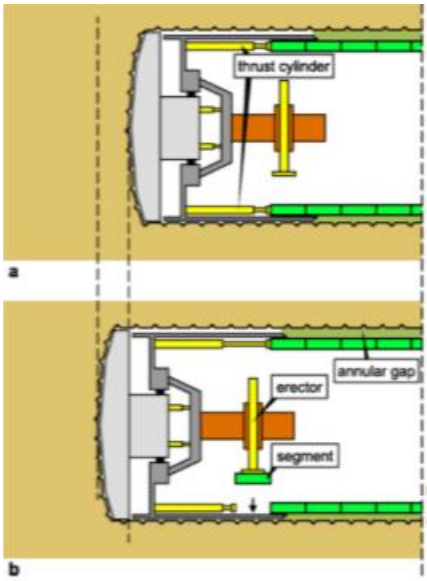


Figura 1.7 - Ciclo di scavo di una TBM da roccia con singolo scudo (Wittke et al., 2006)

Durante la fase di avanzamento i pistoni idraulici, appoggiandosi all'anello di conci, spingono in avanti contro il fronte roccioso lo scudo e la testa fresante in movimento rotatorio fino a che questi non giungono a fine corsa. La loro lunghezza corrisponde pertanto all'ampiezza dei conci da installare. Dopodiché, non è possibile ritirare tutti i martinetti contemporaneamente altrimenti la macchina non rimarrebbe posizionata correttamente. Si procede perciò ritirando solo alcuni martinetti tali da permettere all'erettore il posizionamento di un concio mentre tutti gli altri rimangono pressati contro l'anello posizionato nel ciclo precedente.

Continuando progressivamente in questa maniera si posiziona completamente il nuovo anello di rivestimento al quale i pistoni vengono nuovamente appoggiati per iniziare la successiva fase di spinta avanzante.

1.1.3 TBM con doppio scudo

Le TBM con doppio scudo (*Figura 1.8)* possono essere descritte come l'unione delle caratteristiche di una TBM aperta con una TBM con singolo scudo. Sono composte da uno scudo anteriore, collegato alla testa fresante, al di sotto del quale sono collocati il cuscinetto principale reggispinta, il supporto della cutterhead ed i martinetti idraulici longitudinali.

È collegato tramite un giunto telescopico allo scudo posteriore, generalmente più lungo dell'anteriore, dal quale si distaccano i gripper e, nella sua parte di coda, sono collocati l'erettore per l'installazione in opera dei conci prefabbricati, che appunto avviene al di sotto della protezione di tale scudo, e i martinetti di spinta ausiliari che si appoggiano al rivestimento già posto in opera. Lo scudo di coda deve avere il diametro più piccolo rispetto allo scudo che lo precede per agevolare la fase di re-gripping.

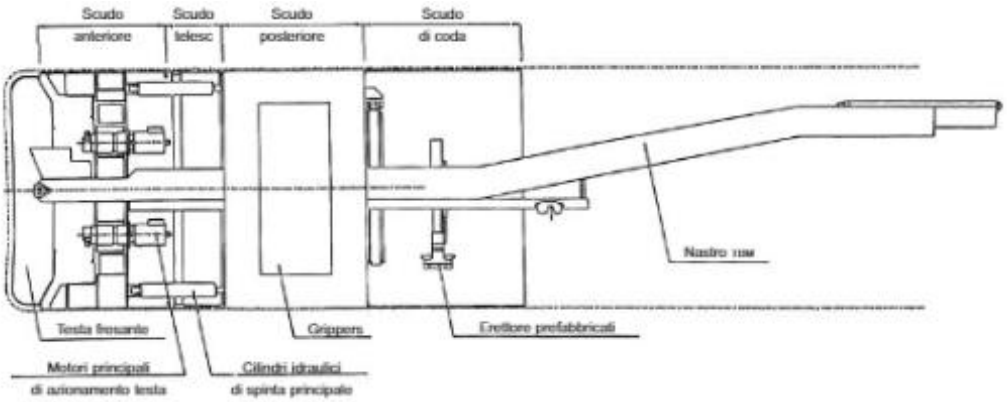


Figura 1.8 - Elementi principali costituenti una TBM con doppio scudo (Peila, 2018)

La differenza sostanziale del processo di scavo delle TBM con doppio scudo dal processo di una macchina con singolo scudo è che la fase di scavo e avanzamento e quella di collocamento in opera del sostegno possono essere svolte contemporaneamente.

Durante la fase di scavo i grippers vengono allargati e pressati contro la parete in modo da fungere da contrasto mentre lo scudo anteriore con la testa fresante in rotazione vengono fatti avanzare contro il fronte usando i pistoni principali.
Allo stesso tempo, grazie al connettore telescopico, lo scudo posteriore resta fermo e vengono montati i conci del rivestimento finale con la stessa modalità progressiva usata nella TBM con singolo scudo. Questi, una volta che è terminata la corsa dei martinetti anteriori e che i gripper vengono ritirati, fungono da contrasto per la spinta dei martinetti ausiliari attraverso i quali si fa avanzare lo scudo posteriore.

Il ciclo appena descritto è rappresentato nella *Figura 1.9*:

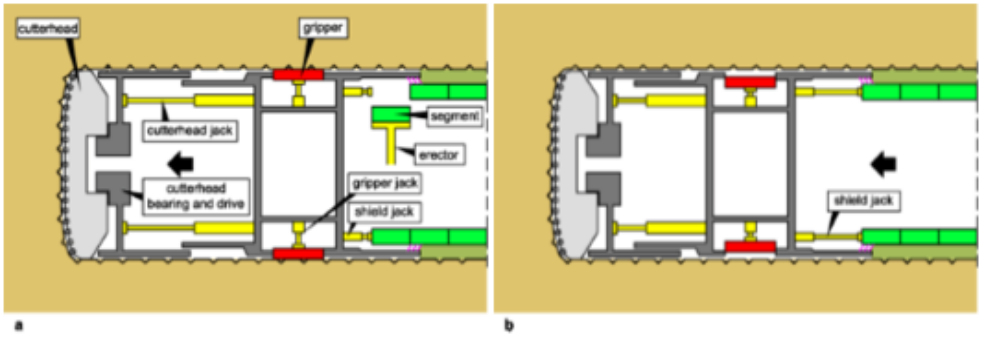


Figura 1.9 - Ciclo di scavo di una TBM da roccia con doppio scudo (Wittke et al., 2006)

La possibilità di usare questa macchina sia con il principio di una macchina aperta sia con quello di una dotata di scudo singolo le conferisce versatilità e adattabilità ad essere impiegata in una vasta varietà di ammassi rocciosi con differenti condizioni geologiche e geomeccaniche.

Questo rende particolarmente favorevole il suo impiego in gallerie lungo il cui tracciato si incontrano e si susseguono litotipi anche molto diversi tra loro.

In particolare, in presenza di litotipi di buone qualità, stabili a lungo termine senza sostentamento e con elevata resistenza meccanica, questa TBM opera come una macchina aperta con la quale è possibile effettuare contemporaneamente sia lo scavo in avanzamento sia l'installazione del rivestimento finale con il risultato di avere un rendimento in termini di produzione molto maggiore rispetto alla macchina con singolo scudo avendo eliminato i tempi di attesa per la posa in opera dei conci.

Al contrario in presenza di formazioni rocciose alterate e di bassa qualità i gripper non possono essere utilizzati perciò la macchina lavorerà come le TBM con singolo scudo usando per l'avanzamento i pistoni ausiliari posteriori che agiscono sull'anello di conci già installato.

Questo comporta una diminuzione in produzione nei confronti delle macchine a singolo scudo, nonostante si usi il medesimo funzionamento, perché il maggior peso dei dispositivi e lo scudo di maggiore lunghezza delle macchine doppio scudate genererà maggiori forze di attrito durante il suo movimento che richiederà tempi più elevati e maggior dispendio di energia per portare a termine le varie fasi di avanzamento.

1.2 Scelta della tipologia di TBM in roccia

La scelta dell'impiego di una tipologia di TBM piuttosto che un'altra è dipendente dalle caratteristiche e condizioni in cui si trovano le formazioni rocciose attraversate.

Ovvero dalle proprietà meccaniche (resistenza a compressione monoassiale), condizioni geologiche e idrogeologiche (presenza di fratture, venute d'acqua), comportamento generale dell'ammasso roccioso (stabilità del fronte, stabilità globale della cavità, comportamento spingente o rigonfiante, rockburst) ma anche dalle proprietà delle singole componenti mineralogiche (durezza ed abrasività) che intervengono nella scelta della tipologia e dimensione dei dischi da impiegare e nella progettazione della loro disposizione sulla testa di scavo eseguita seguendo l'obiettivo di minimizzare l'usura e raggiungere il miglior risultato in termini di velocità di avanzamento. In questo, inoltre, giocano un ruolo fondamentale la spinta e il momento torcente con cui far lavorare la fresa.

Ad esempio, si può considerare come illustrato in *Figura 1.10* come la resistenza a compressione monoassiale della roccia influisca in termini di velocità media di avanzamento per le diverse tipologie di TBM indirizzando in questo modo alla scelta della tecnologia più conveniente.

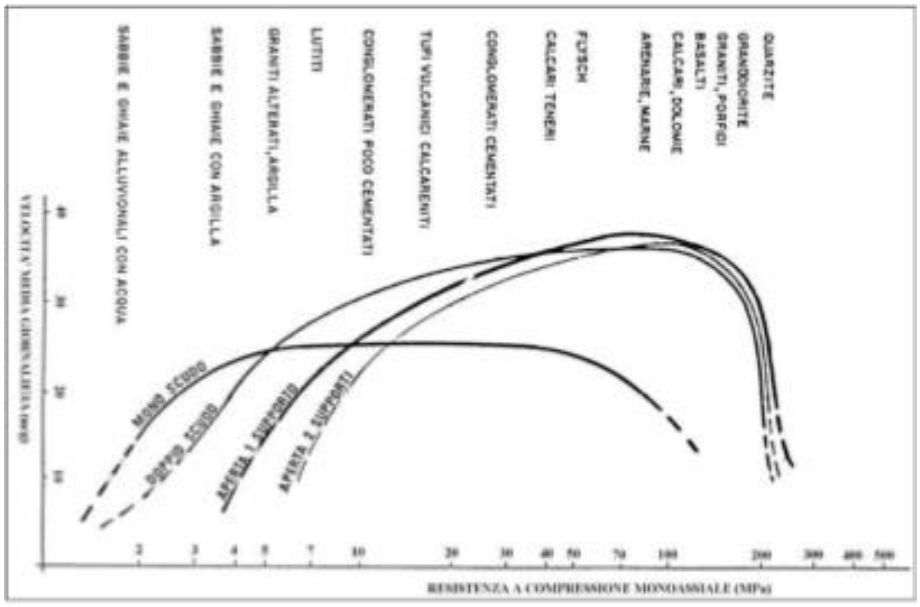


Figura 1.10 - Velocità di avanzamento delle diverse tipologie di TBM da roccia in funzione della resistenza a compressione monoassiale (Wittke et al., 2006)

Osservando questo grafico si nota come le TBM doppio scudate presentino una produzione maggiore delle altre per un ampio intervallo di resistenze monoassiali essendo applicabili con successo in una vasta gamma di litotipi.
Il limite di questo tipo di frese è legato principalmente alla impossibilità di utilizzare i gripper in rocce scadenti costringendo a lavorare come se fossero dotate di un singolo scudo che inoltre con la sua lunghezza contribuisce a peggiorare il problema. Infatti, in corrispondenza di ammassi rocciosi che mostrano convergenze elevate e che si sviluppano con rapidità, c'è il rischio che sullo scudo vada a gravare il carico trasmesso dalla roccia con possibilità di intrappolamento della macchina.

In effetti, nel grafico, per bassi valori di UCS, l'impiego delle TBM a doppio scudo risulta essere sfavorevole nei confronti di quella mono-scudo che si evidenzia essere l'alternativa ottimale. Queste però presentano un esteso intervallo con una produzione limitata dalla ciclicità delle fasi con lunghi tempi di attesa durante l'installazione del rivestimento inoltre ad una impossibilità completa di applicazione per valori di UCS superiori a circa 100 Mpa.
Ciò è imputabile alla elevata spinta da trasmettere al fronte roccioso necessaria per scavare nella resistente roccia. Spinta che viene fornita attraverso i martinetti che appoggiano contro i conci di rivestimento ai quali non possono essere trasferiti sforzi che superino la loro resistenza a rottura.

Con le frese aperte invece, non essendo previsto il montaggio dei conci prefabbricati tramite l'utilizzo della macchina, si riescono ad ottenere produzioni più elevate rispetto alle altre tipologie di TBM quando si deve scavare in ammassi rocciosi con caratteristiche geomeccaniche e situazioni di stabilità molto buone. È possibile notare dal grafico come per valori bassi di resistenza a compressione monoassiale queste frese presentino produzioni inferiori a quelle doppio-scudate poiché in determinate situazioni i gripper non riescono ad esercitare sulla roccia attrito sufficiente per creare una forza di contrasto che risulti ottimale alla macchina nella fase di scavo. In più c'è da considerare che a monte del fronte di scavo si possono verificare fenomeni di instabilità che richiederebbero la presenza di uno scudo per essere attraversati.

Quindi questo fa sì che si debba ricorrere ad interventi di rinforzo prima che la zona instabile sia raggiunta dalla macchina e queste operazioni richiedono tempo e non possono essere realizzate con la macchina in movimento.

Invece per ammassi rocciosi ulteriormente scadenti gli effetti delle instabilità sono più gravosi e non possono essere risolti con soluzioni realizzate attraverso la macchina, perciò si stabilisce in questa maniera il limite inferiore di resistenza della roccia in cui risulta applicabile una TBM di tipo aperto.

Il grafico illustra anche un limite superiore di UCS per la roccia oltre al quale né le macchine aperte né quelle doppio-scudate sono impiegabili e questo è riconducibile alla capacità degli utensili di frammentare la roccia con efficacia.

2 Scavo con TBM nei terreni

Lo scavo in terreni, soprattutto se privi di coesione, difficilmente è realizzabile in assenza di una protezione nel tratto di galleria a ridosso del fronte appena scavato e ancora privo di rivestimento. Proprio per risolvere questa problematica nei terreni furono ideate nel corso del XIX secolo le prime macchine scudate, che a partire dalla seconda metà del '900 diffusero molto rapidamente il loro impiego. I miglioramenti tecnici apportati infatti rendono attualmente lo scavo con TBM la metodologia che permette di raggiungere le prestazioni migliori nella costruzione di gallerie in terreni.
Nella realizzazione di gallerie in materiale sciolto gli aspetti che creano le criticità maggiori sono: il tempo di autoportanza dello scavo praticamente nullo, il collasso del fronte di scavo, le venute d'acqua e la spinta che essa genera in caso di scavo sottofalda e i cedimenti indotti in superficie che provocano gravi problemi qualora ci si trovasse a scavare al di sotto di un centro urbano come spesso accade.
Per cui le macchine che lavorano nei terreni, oltre che avere uno scudo che funge da sostegno temporaneo, devono essere in grado di poter applicare attraverso la testa fresante una contro-pressione stabilizzante al fronte per evitare che insorgano i problemi precedentemente elencati.

Come detto queste macchine si caratterizzano perché subito dietro alla cutterhead presentano una camera, isolata dalla parte posteriore della TBM mediante un diaframma (bulkhead), all'interno del quale si mantiene la pressione di confinamento necessaria da trasferire al fronte per progredire con lo scavo.
Per quanto riguarda il sistema di avanzamento è uguale a quello usato dalle TBM da roccia con singolo scudo che utilizzano i martinetti idraulici appoggiati contro all'anello di rivestimento per far avanzare la fresa in rotazione.
Sempre alla stessa maniera delle macchine mono-scudo da roccia, quando i pistoni sono a fine corsa, lo scavo viene arrestato per permettere all'erettore dei conci di poterli collocare in opera e, terminata questa fase, far ripartire lo scavo utilizzando l'anello appena installato come contrasto per la spinta dei martinetti.

Le macchine da scavo utilizzate in terreni sciolti possono essere suddivise in quattro categorie principali a seconda della tecnologia adoperata per fornire la pressione di confinamento al fronte di scavo:

- Mechanical Supported TBM;
- Compressed Air TBM;
- Slurry / Hydro-shield TBM;
- Earth Pressure Balance Shield TBM.

2.1 Mechanical Supported TBM

Le TBM meccanicamente supportate sono macchine scudate che non possiedono una camera di scavo pressurizzata come le altre TBM impiegate nei terreni, bensì presentano un funzionamento simile a quelle mono-scudate impiegate in roccia. Hanno la sola differenza che, incontrandosi queste a lavorare in terreni non stabili, la cutterhead svolge il duplice compito: quello di fungere da mezzo di scavo come una normale fresa rotante e quello di operare come una piastra mobile che viene costantemente spinta da martinetti idraulici contro il fronte per fungere a questo da supporto continuo sia durante la fase avanzante di scavo sia durante la fase di stop per l'installazione del rivestimento.

Il materiale scavato rimane confinato e pressato tra la fresa e il fronte e contribuisce a creare l'azione di contrasto stabilizzante. Viene rimosso grazie a dei varchi presenti sulla cutterhead che possono essere controllati e aperti, mentre questa sta lavorando, lasciando il materiale entrare all'interno della macchina per essere convogliato verso i nastri trasportatori che lo conducono sul retro.

Uno schema semplificato delle varie parti da cui è composta è mostrato in *Figura 2.1*:

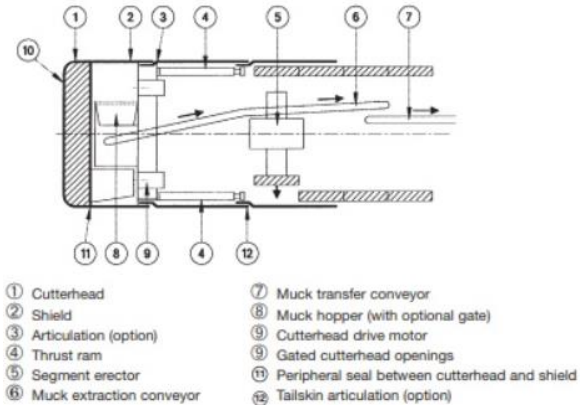


Figura 2.1 - Elementi principali costituenti una Mechanical supported TBM (A.F.T.E.S., 2011)

Il loro campo di utilizzo è limitato a rocce deboli e alterate, terreni coesivi o parzialmente coesivi e comunque a materiali che possiedono un certo grado di autosostegno e che non si trovino sotto al di sotto del livello di falda freatica.

2.2 Compressed Air TBM

Sono macchine usate in terreni sciolti sotto il livello della falda che presentano una permeabilità medio-bassa ($k \leq 10^{-4}\, m/s$), nel caso di permeabilità più elevata può essere localmente ridotta facendo uso di iniezioni di grouting e di fango bentonitico.
Il supporto al fronte di scavo è assicurato con l'uso di aria pressurizzata nella camera di scavo dove agisce come una pressione distribuita costante in ogni punto che controbilancia la pressione idrostatica del terreno saturo d'acqua come mostrato in *Figura 2.2*:

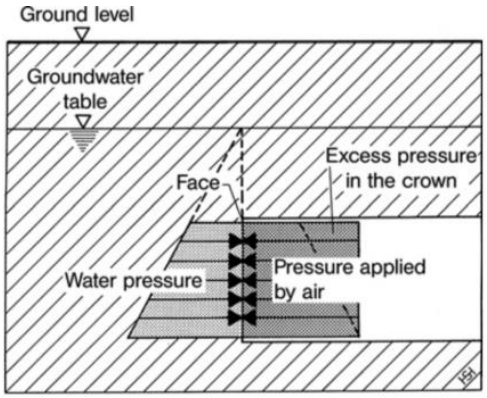


Figura 2.2 - Distribuzione delle pressioni al fronte di scavo (Maidl, 2012)

La pressione all'interno della camera è costantemente monitorata è può essere regolata per adattarla alle esigenze dello scavo.
Sono soggette a limiti di applicabilità dati dalla massima pressione applicabile tramite uso di aria compressa.

Ne esistono di due tipi:

i. Scudo chiuso: Come sistema di scavo utilizzano una cutterhead rotante spinta in avanti dai martinetti idraulici che sfruttano gli anelli di rivestimento come appoggio. Lo scudo protegge tutte le parti principali della macchina, erettore dei conci compreso, ed è collegato ad un diaframma a tenuta stagna che separa la parte della macchina non pressurizzata dalla camera di scavo. Questa è situata dietro alla testa fresante, che trovandosi a contatto con l'aria mantenuta pressurizzata, è in grado di trasferire la controspinta stabilizzante allo scavo.
I detriti prodotti vengono estratti dalla camera in maniera continua o intermittente mediante una coclea a vite continua la quale lavora anche come sistema di rilascio graduale di pressione. Il materiale viene prelevato alla pressione di confinamento nella camera e viene scaricato alla pressione atmosferica sui nastri trasportatori nella parte di back-up.

ii. Scudo aperto (Boom Type Unite): Hanno la peculiarità di non avere una testa fresante come mezzo di scavo ma bensì uno o due braccia meccaniche su cui sono montati utensili del tipo di quelli utilizzato nelle Roadheader o negli escavatori. Lo scudo pertanto è aperto nella parte anteriore per permettere ai sistemi scavanti di operare al fronte.
Il supporto al fronte è sempre fornito tramite aria compressa, perciò lo scudo presenta posteriormente una parete che isola la camera sotto pressione dove avviene lo scavo. Per le restanti componenti (sistema di avanzamento, erettore dei conci, smarino) il funzionamento è lo stesso delle macchine a scudo chiuso.

Un suo schema semplificato è illustrato in *Figura 2.3*:

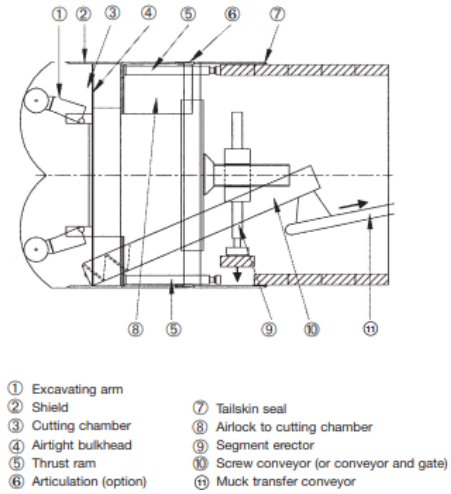


Figura 2.3 - Elementi principali costituenti una Compressed air TBM a scudo aperto (A.F.T.E.S., 2000)

2.3 Slurry / Hydro-shield TBM

Questa tipologia di macchine è nata nel corso degli anni '60 del '900 sviluppandosi a partire dai modelli degli ingegneri Greathead e Hagg, ideati alla fine del precedente secolo, che prevedevano macchine scudate in cui un fluido era usato per supportare il fronte. Nel modello di Greathead era previsto l'uso del fluido per rimuovere e trasportare il terreno, mentre il prototipo di Hagg prevedeva una camera di scavo piena di fluido sigillata ermeticamente in maniera da creare un ambiente pressurizzato che fornisse una controspinta al fronte.

Unendo i concetti tecnici provenienti da questi due prototipi si idearono macchine adatte per lo scavo in terreni sciolti e sotto il livello di falda, dove è fondamentale il supporto al fronte per evitarne il franamento e limitarne i possibili fenomeni di subsidenza ad esso correlati.

Gli elementi principali che la compongono sono gli stessi comuni a tutte le macchine da scavo in terra così come lo è il sistema di scavo e di installazione del rivestimento. Ma la grande particolarità che la contraddistingue sta nelle modalità in cui è generato il supporto al fronte. La pressione di sostegno viene fornita tramite una miscela di bentonite e acqua con l'aggiunta di opportuni additivi, il cui risultato è un materiale di consistenza fangosa ad elevata densità.

La definizione della miscela deve essere eseguita diversamente a seconda del caso, infatti, al variare della granulometria e quindi della porosità dei terreni attraversati sarà necessaria una concentrazione di bentonite differente per assicurare una applicazione uniforme della pressione e una efficace impermeabilizzazione del fronte.

In *Figura 2.4* sono rappresentate le componenti principali di una TBM Slurry-shield.

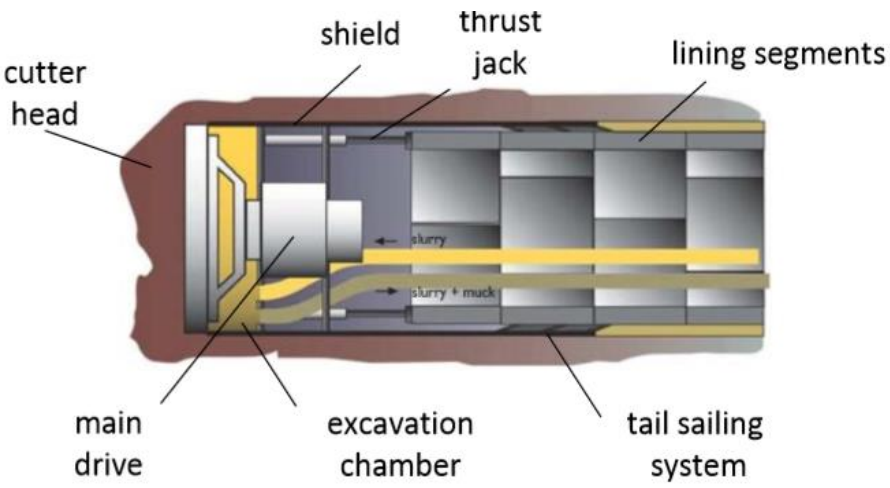


Figura 2.4 - Schema di una TBM di tipo Slurry-shield (Guglielmetti et al., 2008)

Tale sospensione è preparata in cantiere e viene pompata mediante un sistema di condotte all'interno della camera di scavo e da qui, grazie alle aperture presenti sulla cutterhead, mentre la macchina avanza scavando, penetra sotto pressione nel terreno andando a sigillare i vuoti tra le particelle creando sul fronte di scavo un sottile ma impermeabile strato (filter cake) che permette di mantenere il controllo della pressione nella camera ed evita, in presenza di falda, la filtrazione di acqua verso l'interno della macchina.

Il fango, oltre a garantire il supporto del fronte, viene sfruttato anche come mezzo di trasporto del materiale scavato. Durante lo scavo la fresa rimuove continuamente il terreno al fronte assieme al fango bentonitico che vi si è infiltrato e questo composto di materiale rimosso entra all'interno della camera di scavo dove alla base è posto un frantoio (jaw crusher) che ne riduce le dimensioni degli elementi troppo grossolani in maniera che, mediante un sistema di condotte, possa essere convogliato al di fuori

della camera di scavo e trasportato fino al cantiere esterno dove è situato l'impianto di separazione della bentonite dal terreno naturale.

Attraverso il sistema di condotte viene inoltre mantenuta la pressione desiderata all'interno della camera di scavo controllando i volumi di fango apportati e i volumi di materiale estratto.

Il processo di separazione che coinvolge il materiale estratto prevede una successione di vagli, centrifughe e separazioni chimiche e non si riesce affatto semplicemente a recuperare la bentonite soprattutto se il terreno naturale contiene materiale fine le cui particelle non si distinguono da quelle di bentonite.

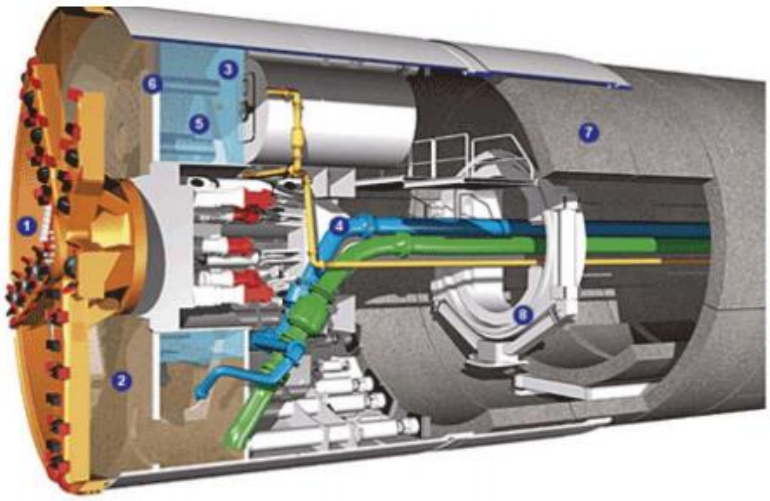
L'impianto tra l'altro è molto costoso, richiede molto spazio in cantiere ed inoltre risulta essere molto rumoroso, fattori entrambi quest'ultimi che sfavoriscono l'uso di questa tecnologia in ambito urbanizzato.

Un problema della miscela di fango bentonitico è che, a causa del suo elevato peso specifico, non si adatta bene ad effettuare regolazioni in pressione in maniera rapida. Questo è necessario per adattare la controspinta alle specifiche condizioni di sito incontrate lungo il percorso dove risulta essere molto complicato, quando le condizioni di spinta variano frequentemente, in quanto non si riuscirebbe ad adeguare sufficientemente in tempo la pressione provocando possibili collassi.
Oppure, per permettere che avvenga la corretta regolazione di pressione, si dovrebbe ricorrere a stop temporanei nell'avanzamento della macchina che però di conseguenza ne limitano la produzione.

Queste problematiche sono state superate attraverso l'introduzione di una nuova tecnologia nelle macchine così denominate TBM Hydroshield.

In questa variante di TBM Slurry-shield, la camera di scavo è composta di due parti divise da un diaframma, comunemente detto summerged wall, il quale presenta una apertura nella sua parte inferiore appositamente predisposta con lo scopo di consentire il collegamento tra questi due spazi costituenti la camera.

In *Figura 2.5* è mostrato uno schema di TBM Hydroshield nel quale se ne risaltano le principali parti da cui è formata.



(1) Cutterhead; (2) excavation chamber; (3) bulkhead; (4) slurry feed & return lines; (5) air cushion; (6) wall; (7) Segmental Lining; and (8) segment erector

Figura 2.5 - Elementi principali costituenti una TBM tipologia Hydroshield (Herrenknecht)

La parte anteriore della camera è completamente riempita della miscela tra fango bentonitico e terreno naturale scavato mentre, dietro alla parete divisoria, nella camera posteriore di pressione (working chamber) la sospensione non occupa tutto lo spazio a disposizione ma solo fino ad un certo livello posto in basso dove sono presenti le tubazioni di adduzione che immettono fango bentonitico e quelle di ritorno che ne prelevano il materiale.
La restante porzione superiore della camera è occupata da una bolla d'aria compressa di cui è possibile regolarne con facilità e rapidità la pressione.

Perciò la pressione della camera di scavo può essere controllata cambiando la pressione del serbatoio d'aria contenuto nella camera di pressione e, qualora il volume della sospensione bentonitica al suo interno subisse fluttuazioni, queste vengono rapidamente compensate in modo che la pressione di supporto fornita al fronte non risenta modifiche.

I principali parametri da monitorare costantemente per il controllo del processo di scavo sono le pressioni di aria e slurry all'interno della camera di scavo che determinano la controspinta applicata al fronte dello scavo.

Altro parametro da controllare è la quantità di materiale scavato ed estratto, determinata in base ai flussi di materiale uscente ed entrante tramite le condotte, la sua densità e il livello che raggiunge nella camera di scavo. Effettuando la misura dei volumi di materiale e confrontandoli con quelli teorici attesi è possibile evidenziare il verificarsi di sovra escavazioni, le quali potrebbero essere collegate ad eventi pericolosi di instabilità o collasso.

Le sovra escavazioni possono essere individuate monitorando anche i volumi e le pressioni di iniezione delle malte di backfilling nel gap che si viene a creare tra scudo della macchina e rivestimento appena installato.

In *Figura 2.6* viene mostrato il funzionamento complessivo che coinvolge pure l'impianto di separazione posto in superficie di una macchina Hydroshield:

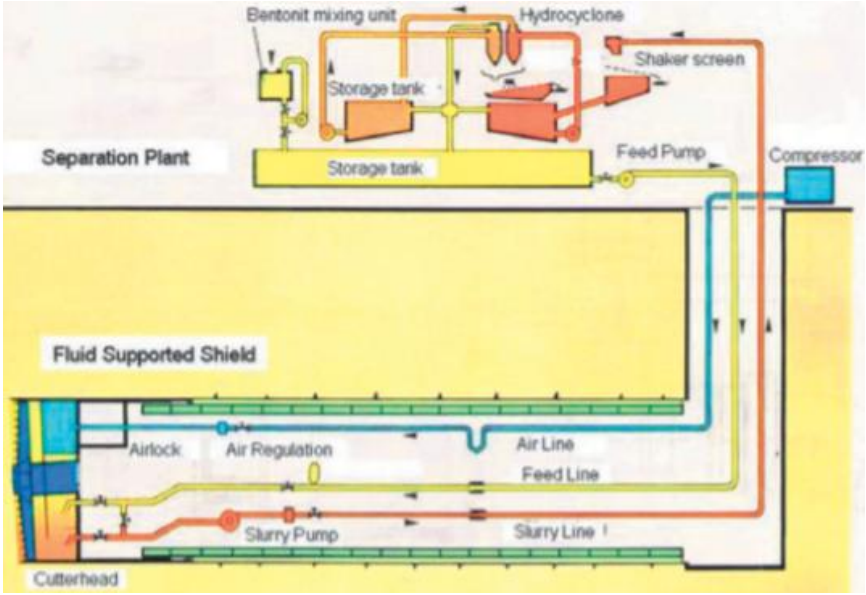


Figura 2.6 - Schema del funzionamento dell'impianto di separazione della bentonite (Thewes, 2009)

Invece per quanto riguarda la tipologia di terreno tipica per l'applicazione delle Slurry-Shield o Hydroshield si può far riferimento alla granulometria nella *Figura 2.7:*

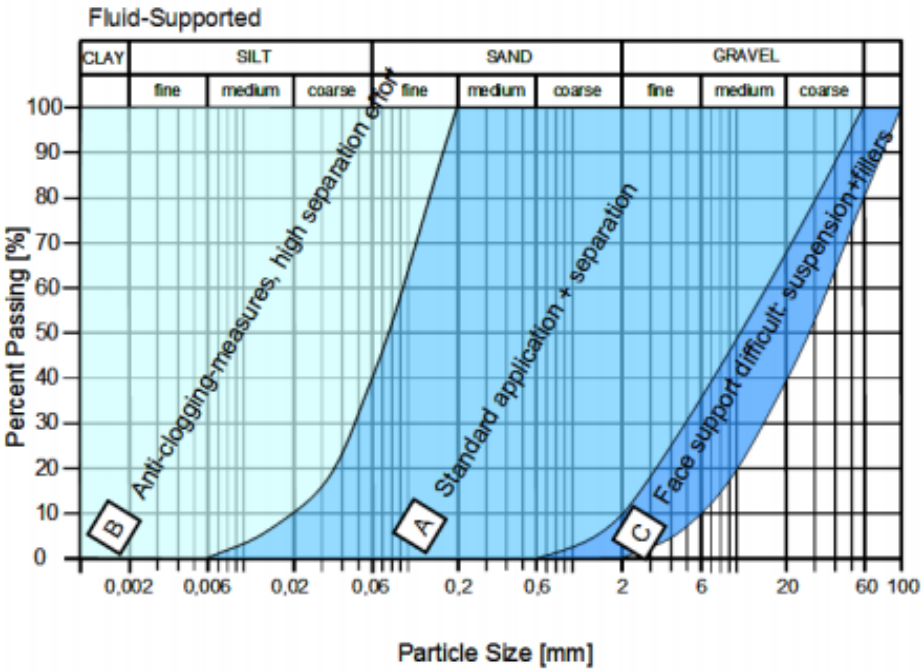


Figura 2.7 - Campo di applicazione delle TBM scudate con supporto di tipo slurry (Thewes, 2009)

Nell'area A i grani che rientrano in questo intervallo presentano le dimensioni adeguate sia per consentire la formazione di una efficiente filter cake al fronte, sia per permettere un agevole separazione e recupero della bentonite attraverso l'impianto.

Nella zona B riguardante limi e argille, costituiti da grani dello stesso ordine di dimensione della bentonite, la separazione richiederebbe sforzi eccessivi e il risultato comunque non sarebbe garantito.

La zona C è inerente alle ghiaie uniformi e materiale grossolano che presentano una permeabilità molto elevata, la quale potrebbe portare alla filtrazione del fango bentonico senza che avvenga la formazione dello strato di terreno impermeabilizzato, di conseguenza si ha un pericoloso abbassamento delle pressioni in camera di scavo e la dispersione di ingenti quantità di bentonite che provocherebbe danni di tipo ambientale.

In questo caso alla miscela bentonitica dovrebbe essere aggiunto del filler che vada ad aumentare la consistenza e viscosità del fango per cercare di formare il filler cake.

3 Earth Pressure Balance shield TBM

Le prime EPB furono ideate a partire dagli anni ’70 del ‘900 in Giappone e nacquero con l’intenzione di porre rimedio al problema dello scavo con slurry in terreni ricchi di materiale fine come limi e argille.

L’idea innovativa fu quella di utilizzare lo stesso terreno che veniva scavato e accumulato nella camera di scavo per fornire la pressione di supporto necessaria al fonte, senza richiedere l’immissione di ulteriore materiale dall’esterno (*Figura 3.1).*

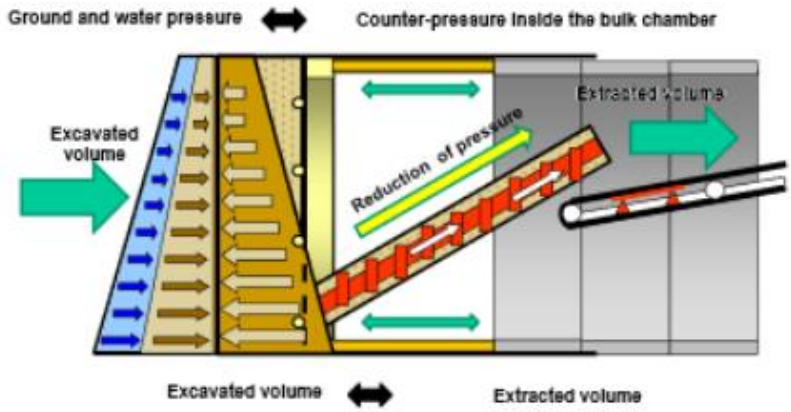


Figura 3.1 - Schema concettuale di funzionamento di una TBM-EPBs (Peila, 2018)

Questo accorgimento permise perciò di evitare pure l’utilizzo di un impianto di separazione dei materiali estratti con un notevole guadagno in costi e in spazio nel cantiere.

Il materiale scavato deve essere reso idoneo all’applicazione delle pressioni modificando le sue caratteristiche tramite l’aggiunta di agenti condizionanti che si mescolano con il terreno stesso conferendogli nuove proprietà.

Gli agenti condizionanti necessari variano in base alla componente granulometrica del materiale e quelli comunemente usati sono: schiume, acqua ed eventualmente polimeri, bentonite o filler. Lo studio e la scelta della tipologia di condizionante per conferire un comportamento ottimale al materiale è un processo noto come condizionamento del terreno.

Ultimamente le innovazioni apportate nel campo del condizionamento e in quello meccanico hanno ampliato notevolmente il campo di applicazione di queste macchine tanto che attualmente la tecnologia EPB ricopre circa il 90% del mercato delle TBM.

Siccome si incontrano difficoltà nell'ottenere un materiale con sufficiente fluidità per essere pompato attraverso condotte, in queste TBM il terreno viene prelevato dalla camera di scavo tramite un estrattore a coclea.

Le parti fondamentali che compongono le macchine di tipo EPBs sono complessivamente simili a quelle presenti negli altri tipi di macchine scudate usate nei terreni e qui in *Figura 3.2* ne vengono indicate quelle più rappresentative.

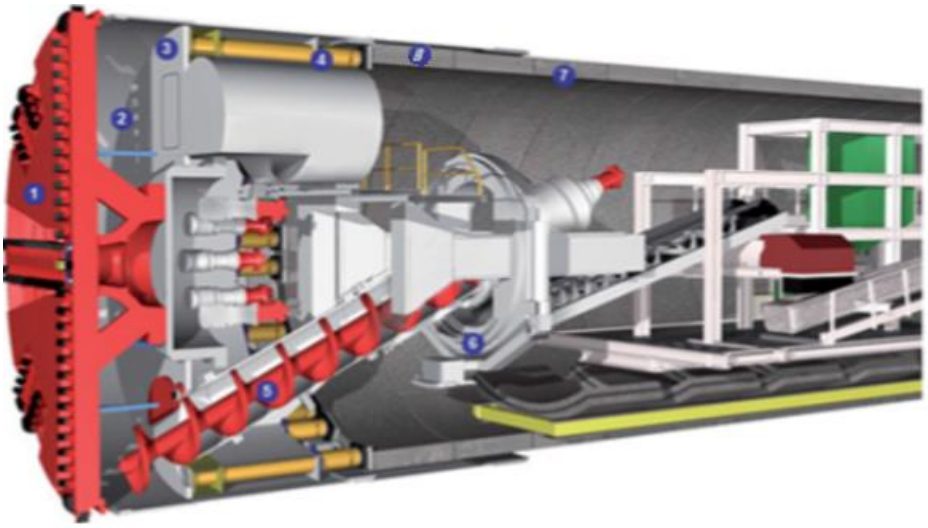


Figura 3.2 - Elementi principali costituenti una TBM tipologia EPBs (Herrenknecht et al., 2011); (1) Cutterhead, (2) Camera di scavo, (3) Bulkhead, (4) Martinetti di spinta, (5) Estrattore a coclea, (6) Erettore dei conci, (7) Rivestimento finale installato, (8) Scudo

3.1 Struttura e funzionamento di una TBM di tipo EPBs

Si procede a descrivere le componenti fondamentali e il loro ruolo specifico che ricoprono nel funzionamento di una macchina della tipologia EPBs.

- **Cutterhead:** Nel progettare la testa di scavo (evidenziata in *Figura 3.3*) si devono tenere in considerazione le proprietà geotecniche dei terreni da affrontare lungo il percorso della galleria.

Gli utensili con i quali sarà equipaggiata sono scelti in maniera che sia massimizzata la loro efficacia nei confronti del terreno presente in sito e vengono inoltre installati dischi da roccia per ridurre le dimensioni di eventuali blocchi rocciosi presenti come avviene nei depositi di tipo morenico. La loro disposizione sarà progettata in maniera che le traiettorie seguite con la rotazione della testa coprano uniformemente la superficie di scavo anche se in questo risulta vincolante pure la presenza delle aperture.

La testa infatti è dotata di diverse aperture (in una proporzione minore rispetto a quella usata nelle cutterhead delle TBM di tipo Slurry/Hydroshield) attraverso le quali il materiale entra nella camera di scavo.

L'impiego di una fresa più chiusa permette di collocare un maggior numero di utensili, in più vengono ridotte le dimensioni del materiale in ingresso nella camera e ne risulta aumentata la sua robustezza nei confronti delle sollecitazioni.

Il condizionamento interessa anche il terreno al fronte da scavare perciò pure sulla testa sono montati gli ugelli per l'iniezione degli agenti condizionanti.

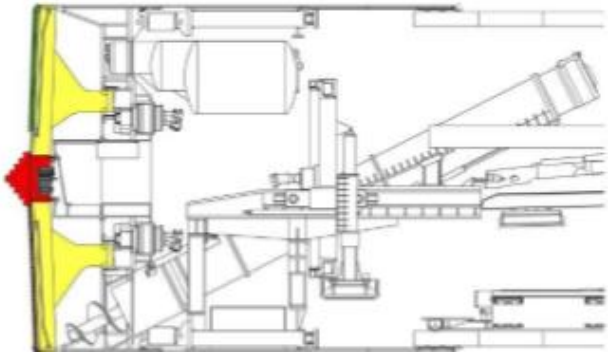


Figura 3.3 - Testa da scavo in una TBM tipologia EPBs (Peila, 2018)

- **Cuscinetto reggispinta:** Il moto rotatorio viene fornito alla testa fresante dal cuscinetto reggispinta (*Figura 3.4)* mediante motori che trasferiscono il moto all'organo di scavo attraverso ingranaggi dentati. Questi sistemi devono essere correttamente dimensionati per fornire il momento torcente e la velocità di rotazione occorrente per lo scavo. Proprio operando sul controllo della velocità

di scavo in avanzamento viene gestito il flusso di terreno entrante nella camera di scavo.

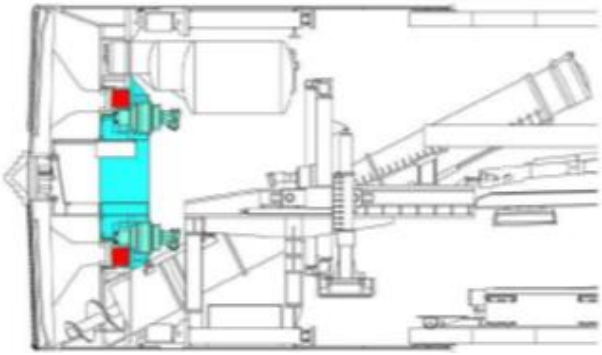


Figura 3.4 - Cuscinetto reggispinta in una TBM tipologia EPBs (Peila, 2018)

- **Estrattore a coclea:** Il terreno quando entra nella camera di scavo viene pressurizzato e per estrarlo da qui è necessaria una vita a coclea (screw conveyor, *Figura 3.5*). La differenza di pressione che si verifica tra la base della camera dove attinge la coclea e la parte terminale di questa determina una spinta del materiale lungo la vite

  Per l'intera lunghezza la coclea deve sempre essere completamente riempita per poter mantenere la pressione in camera di scavo e d'altra parte deve essere in grado, quando il materiale la percorre, di dissipare gradualmente la differenza di pressione esistente tra la camera e la pressione atmosferica che si trova al di fuori di essa. Pertanto, la sua lunghezza è decisa in fase di progetto della macchina in conseguenza delle pressioni in cui si troverà ad operare che devono completamente esaurirsi mentre il terreno scavato la attraversa.

  Raggiunta l'estremità della coclea il materiale è scaricato sopra un nastro trasportatore (belt conveyor) che lo conduce verso il cantiere esterno.

  Affinché le pressioni all'interno camera di scavo si mantengano costanti è necessario che la quantità di materiale estratto eguagli quella di materiale scavato che viene immesso al suo interno.

  Mentre volendo effettuare regolazioni e variazioni della pressione agente in camera si può intervenire sia sulla velocità di avanzamento, che determina i

volumi scavati in ingresso alla camera, sia sulla velocità di rotazione della coclea che invece agisce sui volumi estratti in uscita dalla camera.

Perciò se le pressioni devono essere aumentate si deve agire aumentando la velocità di avanzamento e/o riducendo la velocità di rotazione della coclea, al contrario se si vuole abbassare l'entità delle pressioni si deve agire aumentando la velocità con cui viene estratto il terreno con la coclea e/o diminuendo la velocità di scavo.

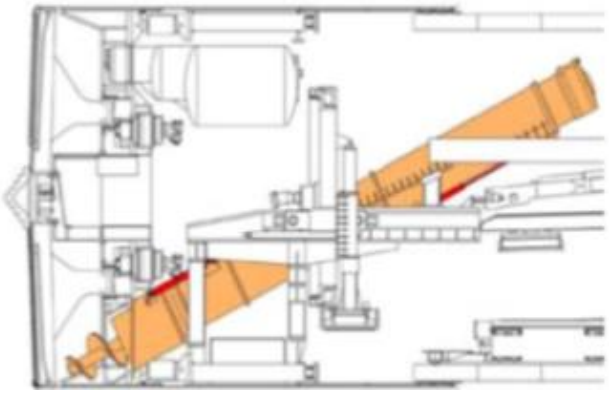


Figura 3.5 - Estrattore a coclea in una TBM tipologia EPBs (Peila, 2018)

- **Martinetti di spinta**: La spinta necessaria per far avanzare la testa di scavo mentre è in azione viene fornita con pistoni idraulici (thrust jacks, *Figura 3.6*), disposti lungo lo sviluppo interno della circonferenza dello scudo, che trovano contrasto pressando contro l'ultimo anello di rivestimento in conci prefabbricati già installato.

  Operando sulle spinte dei pistoni si può guidare la macchina indirizzandola secondo il tracciato che deve essere definito.

  Per agevolare questa operazione presentano nella loro parte anteriore delle articolazioni attive che conferiscono una certa mobilità alla testa di scavo e allo scudo anteriore ad essa collegato permettendo di eseguire raggi di curvatura ridotti senza variare di troppo la spinta esercitata da ogni martinetto.

  In questa maniera non si creano concentrazioni di sollecitazioni ma la spinta rimane distribuita in modo piuttosto uniforme sull'anello di conci evitando l'insorgere di grandi deformazioni.

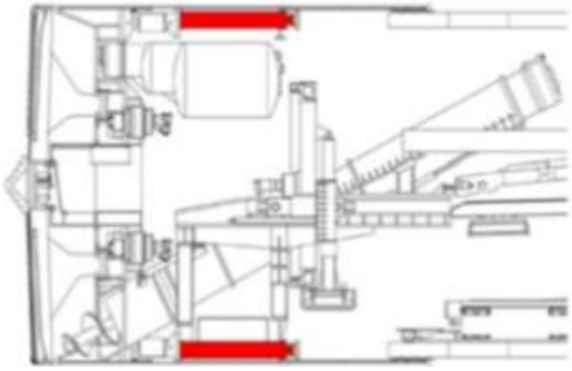


Figura 3.6 - Martinetti di spinta in una TBM tipologia EPBs (Peila, 2018)

- **Erettore dei conci:** L'erettore dei conci (*Figura 3.7*), fissato tramite un apposito telaio di supporto all'interno della macchina, consiste in un braccio telescopico dotato all'estremità di un sistema di ventose o di un gancio meccanico che può essere allungato e retratto in direzione radiale per sollevare i conci e posizionarli con accuratezza ognuno secondo la sequenza prestabilita.

  I suoi movimenti all'interno della macchina avvengono su apposite guide e sono consentiti grazie ad un sistema idraulico che ne permette sia la rotazione attorno all'asse della galleria sia la traslazione longitudinale lungo il back-up.

  La procedura di posizionamento, che avviene ancora sotto alla protezione dello scudo, inizia quando termina la fase di scavo che è coincidente con i pistoni di spinta che giungono a fine corsa.

  Vengono ritirati in primo momento solo i pistoni che servono a lasciare spazio al primo concio da mettere in opera mentre i restanti continuano ad agire contrastando contro il rivestimento collocato all'avanzamento precedente garantendo la stabilità della macchina. Una volta in posizione il concio, i pistoni retratti per concedergli spazio vengono rimessi a contrasto contro di questo.

  Successivamente vengono ritirati, come fatto per il primo, i martinetti che si trovano in corrispondenza del seguente concio da installare mentre gli altri sono lasciati momentaneamente in posizione. Si procede progressivamente in questa maniera finché tutti i conci sono collocati a formare il nuovo anello che fungerà come supporto alla spinta dei martinetti per iniziare il nuovo ciclo di scavo.

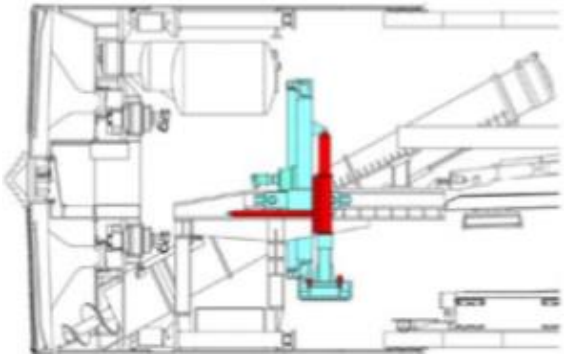


Figura 3.7 - Erettore dei conci in una TBM tipologia EPBs (Peila, 2018)

- **Camera iperbarica**: La parete divisoria della camera di scavo (bulkhead) è dotata di un sistema per poter accedervi tramite una camera iperbarica (*Figura 3.8)* e viene periodicamente utilizzata durante le operazioni di manutenzione e per la sostituzione degli utensili da scavo usurati.

  Al suo interno viene applicato un gradiente di pressione positivo o negativo, a seconda che si debba entrare o uscire dalla camera di scavo, che ha lo scopo di far acclimatare gli operai rispettivamente alla pressione agente in camera e a quella atmosferica.

  In caso di sostituzione degli utensili è necessario ovviamente fermare lo scavo e poi svuotare parzialmente dal terreno la camera di scavo nella sua parte superiore in modo da consentire l'accesso alla testa di scavo. Il sistema iperbarico, nonostante la camera di scavo sia parzialmente svuotata dal materiale, permette di mantenere una pressione di supporto al fronte ed evitare infiltrazioni di acqua grazie all'uso dell'aria compressa.

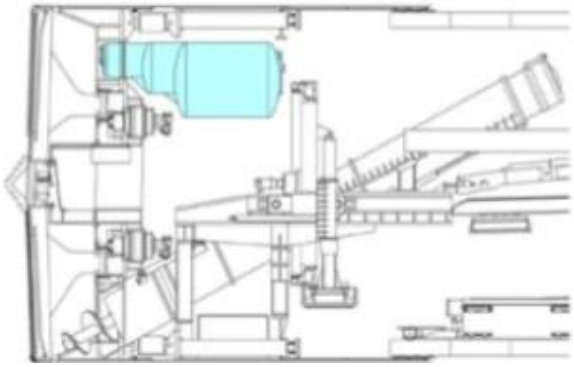


Figura 3.8 - Camera iperbarica in una TBM tipologia EPBs (Peila, 2018)

- **Scudo e Tailskin structure**: Lo scudo in una TBM di tipo EPB è diviso in tre parti: la porzione anteriore collegata alla cutterhead e al di sotto del quale si trova la camera di scavo che contiene il materiale mantenuto in pressione, lo scudo stazionario in corrispondenza delle articolazioni attive e dei jacks di spinta e lo scudo di coda che è la parte posteriore posto a protezione dell'installazione del rivestimento. La tailskin structure (*Figura 3.9)* è la parte terminale dello scudo posteriore e consiste nel sistema attraverso il quale avviene la procedura nota con il termine di backfilling.

  La sezione di scavo profilata dalla cutterhead è leggermente più grande rispetto allo scudo, per cui si forma un vuoto tra il terreno al contorno dello scavo e il rivestimento che viene riempito iniettando in pressione una specifica malta. Viene pompata mediante un sistema di tubazioni che terminano sulla tailskin di norma in almeno sei punti di iniezione disposti sulla porzione superiore della circonferenza dello scudo simmetricamente rispetto l'asse della galleria.

  A volte invece è possibile iniettare il riempimento direttamente tramite ugelli inseriti in aperture presenti sui conci di rivestimento a cui si può ricorrere qualora le iniezioni dalla tailskin non avessero colmato adeguatamente il gap.

  Attraverso questo gap tra anello e scudo si potrebbe infiltrare ed entrare all'interno della macchina dell'acqua oppure la stessa malta che vi viene iniettata potrebbe essere rigettata indietro a causa della pressione dell'acqua qualora lo scavo avvenisse sottofalda.
  Per scongiurare questo viene usato un sistema di due o più file di spazzole (wire brush), il cui numero dipende dalla pressione dell'acqua in sito che si deve fronteggiare.
  Le spazzole sono collocate nella coda dello scudo aderendo ad esso lungo tutta la sua circonferenza interna e sono intervallate tra di esse da piccoli spazi che vengono sigillati iniettandovi grasso lubrificante con lo scopo di minimizzare l'attrito prodotto durante l'avanzamento dello scudo.

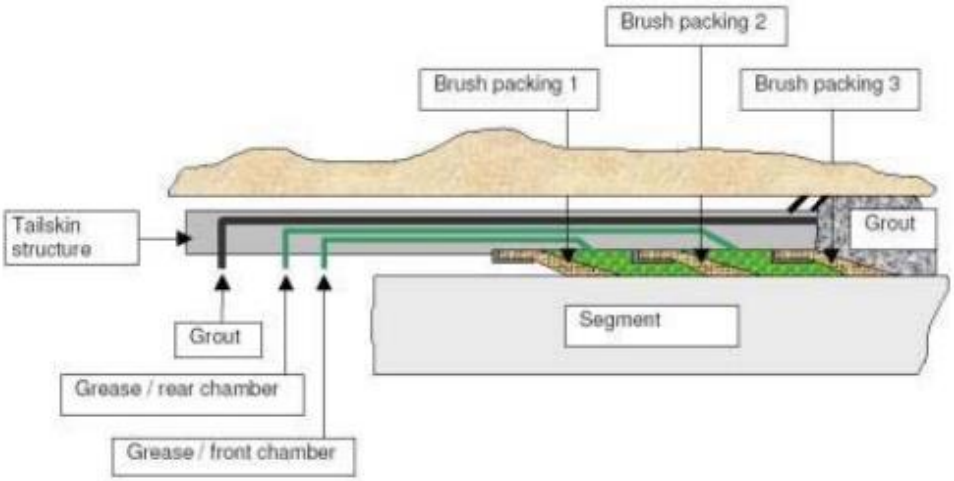


Figura 3.9 - Sistema di Backfilling (Peila et al. 2010)

Le funzioni del backfilling sono quelle di creare subito un contatto diretto tra il terreno e i conci installati in maniera da bloccare questi nella loro posizione ed inoltre crea un supporto che si oppone agli spostamenti che potrebbe subire il terreno e che potrebbero manifestarsi anche come cedimenti in superficie.
Inoltre, crea uno strato impermeabile che impedisce all'acqua di fluire all'interno della galleria in condizioni di scavo sottofalda.

I materiali usati per questa operazione devono avere sufficiente fluidità per essere pompati e principalmente sono miscele cementizie normali o con l'aggiunta di sabbia o bentonite per creare uno slurry, anche se ultimamente la tecnologia più impiegata è quella che fa uso di miscele bi-componenti basate su un mix di acqua, cemento, bentonite e l'aggiunta di agenti ritardanti che ne modificano la lavorabilità.

È importante che queste miscele sviluppino rigidezza in breve tempo in modo da indurire velocemente una volta applicate per limitare immediatamente i movimenti di terreno o dei conci.

3.2 Modalità di scavo di una TBM di tipo EPBs

Prima di iniziare lo scavo di una galleria con una TBM-EPBs bisogna definire dettagliatamente le pressioni di lavoro lungo tutto il tracciato.

Questa consiste nel fissare il limite minimo di stabilità del fronte a cui corrisponde il massimo di pressione di lavoro. Una pressione inferiore a quella prevista dal limite di equilibrio può causare il collasso del fronte e provocare cedimenti in superficie.
Al contrario, però, una pressione troppo alta incrementa le sollecitazioni sulla macchina, fa diminuire la velocità di avanzamento e può in alcuni casi portare ad instabilità in quanto si viene a generare il sollevamento del terreno.

Lo macchina EPBs può essere utilizzata, accanto alla classica modalità chiusa con camera di scavo mantenuta in pressione, in due modalità aggiuntive a seconda della stabilità prevista per il fronte del tunnel (*Maidl, 2012*).

Le tre modalità sono presentate di seguito:

- **Modalità aperta:** La camera di scavo in questa modalità di uso della macchina (*Figura 3.10*) non viene mai completamente riempita e rimane in parte vuota durante lo scavo.
  Il terreno che entra all'interno della camera di scavo si depositerà sulla parte di fondo ed in questo caso l'estrattore a coclea viene usato semplicemente come strumento per prelevare terreno dalla camera e trasferirlo al nastro trasportatore senza operare nessun controllo di pressione. Pertanto, non producendo nessuna pressione all'interno della camera di scavo, al fronte della galleria non viene applicata nessuna controspinta di supporto.

  Lo scavo può essere eseguito in questa modalità se le condizioni del terreno da scavare assicurino una galleria completamente stabile, le pressioni idrostatiche agenti al fronte siano nulle o pressoché nulle e che un possibile flusso di acqua verso lo scavo non causi né problemi idrogeologici nell'intorno del sito né interferisca al normale funzionamento della macchina.

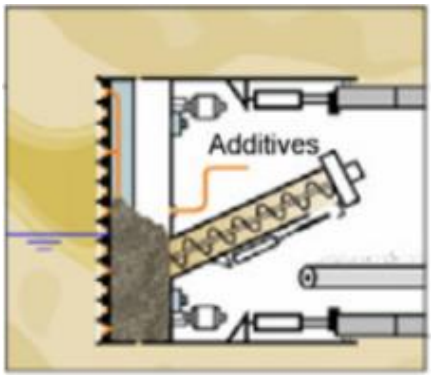


Figura 3.10 - Scavo in modalità aperta con TBM-EPBs (Hoek et al., 2005)

- **Modalità di transizione:** La caratteristica di base dietro all'impiego di tale modalità è che lo scavo è gestito con una camera di scavo in pressione ma solo parzialmente riempita con il materiale scavato mentre la rimanente parte viene colmata con aria compressa (Figura 3.11*)*.

  Questa modalità è applicabile nei casi in cui il terreno di scavo presenti buone condizioni e il fronte della galleria sia complessivamente stabile. Lo scopo principale dell'utilizzo dell'aria compressa anziché usare la macchina in modalità chiusa è quello di scavare sfruttando i vantaggi che offre in velocità di avanzamento lo scavo con camera semi-vuota ma mantenendo comunque un certo livello di pressione nella camera di scavo per contrastare le spinte idrostatiche e controllare gli afflussi d'acqua all'interno della camera di scavo.
  È possibile passare rapidamente da questa modalità di funzionamento a quella in modalità chiusa.

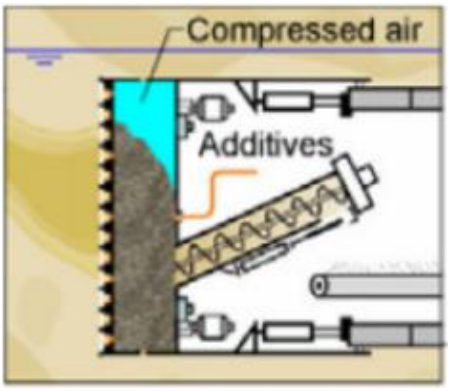


Figura 3.11 - Scavo in modalità di transizione con TBM-EPBs (Hoek et al., 2005)

- **Modalità chiusa:** Modalità di avanzamento in cui la camera di scavo è completamente riempita con il terreno scavato mantenuto in pressione tramite il controllo dei volumi in ingresso ed in uscita gestiti attraverso la velocità di avanzamento e la velocità di estrazione della coclea. La pressione applicata controbilancia quella che deriva dal terreno a monte del fronte di scavo e dall'acqua nel caso ci si trovi sottofalda *(Figura 3.12)*.

  Questa modalità di funzionamento è richiesta in terreni privi di coesione, che si trovano soggetti ad elevate pressioni idrostatiche dovute all'alto livello della falda o comunque in situazioni di scavo urbano dove vanno evitati ogni tipo di cedimenti superficiali.

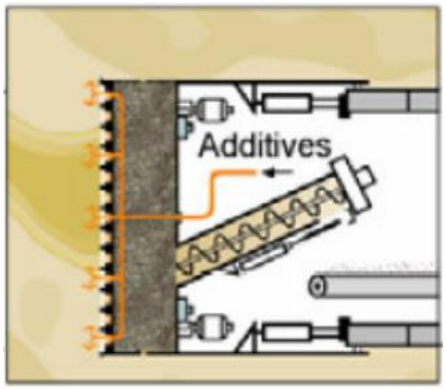


Figura 3.12 - Scavo in modalità chiusa con TBM-EPBs (Hoek et al., 2005)

4 Condizionamento del terreno

Condizionare il terreno significa aggiungere e miscelare ad esso agenti condizionanti per modificarne le sue proprietà in termini di lavorabilità, permeabilità e consistenza ottenendo come risultato di rendere fattibile ed efficiente lo scavo e poi il trasporto del materiale anche trovandosi in condizioni non del tutto idonee all'utilizzo della TBM-EPBs. Quindi l'obiettivo del condizionamento è quello di trasformare il terreno in un materiale caratterizzato da:

- Buona plasticità;
- Bassa permeabilità;
- Consistenza pastosa;
- Piccolo angolo di attrito interno.

Le prestazioni della macchina e il corretto svolgimento delle fasi di scavo dipendono fortemente dalle condizioni in cui si trova a lavorare che sono dettate dal raggiungimento o meno, attraverso il condizionamento, del comportamento meccanico ottimale del terreno di scavo.

Gli agenti condizionanti vengono iniettati in diverse parti della macchina svolgendo ad ogni fase uno specifico compito:

- Dalla testa di scavo: Vengono iniettati direttamente nel terreno ancora da scavare tramite gli ugelli disposti sulla cutterhead.
  Mescolandosi al terreno ne diminuiscono la sua resistenza e gli conferiscono una consistenza più morbida e pastosa che lo rende più semplice da essere scavato con gli utensili di cui è dotata la testa di scavo riducendone l'usura e in più permette di diminuire la domanda di momento torcente necessario al suo funzionamento.
  Inoltre, ne riducono la permeabilità evitando la possibilità di ingenti venute d'acqua.

- Nella camera di scavo: All'interno della camera di scavo il materiale deve possedere la corretta plasticità e viscosità per garantire che rimanga omogeneo consentendo così di creare e controllare la distribuzione di pressione che si deve applicare al fronte per stabilizzarlo.

- Sull'estrattore a coclea: Nella coclea gli agenti condizionanti permettono di mantenere la fluidità adatta a far transitare il materiale senza che si creino intoppi e determinando tra l'altro una minore richiesta di coppia torcente.

L'obiettivo generale che si propone il condizionamento è quello riuscire ad ottenere i seguenti effetti:

- Diminuzione dell'usura di tutte le componenti meccaniche della macchina a contatto con il terreno e lo smarino;
- Migliore uniformità nella distribuzione delle pressioni in camera di scavo con conseguente miglior controllo delle variazioni delle spinte al fronte;
- Migliore consistenza e lavorabilità del materiale all'interno della camera che conduce ad un aumento della stabilità e del controllo degli spostamenti in particolar modo superficiali;
- Riduzione dell'attrito generato dallo scudo durante l'avanzamento;
- Riduzione della potenza necessaria per la rotazione della testa di scavo;
- Agevolare il flusso di terreno scavato attraverso le aperture della testa di scavo;
- Riduzione della permeabilità e conseguente miglior controllo delle venute d'acqua al fronte;
- Limitare l'adesione del terreno argilloso sulle parti meccaniche;
- Evitare la compattazione del terreno argilloso in camera di scavo o lungo l'estrattore;
- Completo riempimento dell'estrattore;
- Flusso costante ed omogeneo lungo la coclea e conseguente migliore controllo

della caduta di pressione;

- Migliore trasportabilità attraverso il nastro trasportatore;

4.1 Agenti condizionanti

Nel caso di scavo con TBM di tipo EPBs gli agenti condizionanti più comunemente utilizzati sono:

- **Acqua:** Il contenuto d'acqua naturale responsabile della consistenza del materiale influenza il comportamento globale del terreno durante lo scavo.
  A tale scopo si può condizionare il terreno cambiando il suo contenuto d'acqua naturale in modo da agire sulla consistenza a seconda delle necessità.
  Viene usata in aggiunta ad un altro agente condizionante come la schiuma per migliorarne le funzionalità lubrificando le particelle di terreno in special modo la parte fine.
  L'utilizzo solo di acqua risulta comunque efficacie in terreni prevalentemente argillosi.
  Il condizionamento tramite aggiunta di acqua viene quantificato attraverso due parametri:

  - La percentuale di acqua libera aggiunta al materiale (w_{add}), rappresentata dal rapporto tra peso di acqua aggiunto ($P_{w,add}$) e peso della parte solida del materiale (P_s).

$$w_{add} = \frac{P_{w,add}}{P_s} \cdot 100$$

  - La percentuale totale di liquido contenuta nel materiale (w_{tot}), rappresentata dal rapporto tra il peso di acqua libera aggiunta, di acqua naturale contenuta, di liquido generatore (P_l) e il peso della parte solida del materiale (P_s).

$$w_{tot} = \frac{P_l}{P_s} \cdot 100$$

- **Schiuma**: Le schiume possono essere definite come una dispersione di bolle di gas in un liquido in cui la fase gassosa è separata da sottili film di fase liquida. La fase liquida, denominata liquido generatore, è formata a sua volta da acqua e da un agente schiumogeno tensioattivo.

  La composizione di una comune schiuma usata come condizionante presenta mediamente le seguenti proporzioni in percentuale: acqua 5-10%; aria 90-95%; agente tensioattivo 0,05-0,3%; Polimero ≤ 0,01% (presente solo in alcuni casi per stabilizzare le bolle della schiuma e comunque in piccolissime quantità).

  I tensioattivi sono molecole formate da una combinazione di una testa idrofila (componente polare) e una coda idrofobica (componente apolare) e proprio grazie a questa proprietà quando viene mescolato con l'acqua si generano le bolle di gas costituenti la schiuma (*Figura 4.1*).

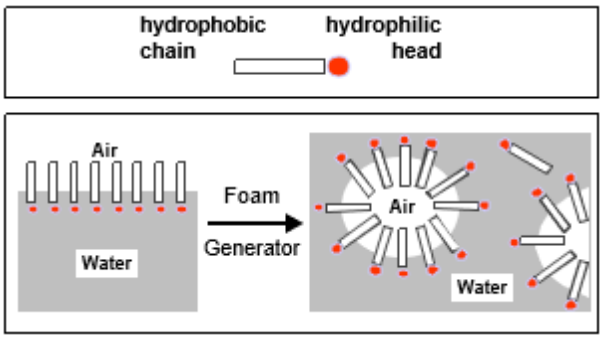


Figura 4.1 - Comportamento del tensioattivo nella formazione di schiuma (Langmaack, 2000)

L'effetto della schiuma nel terreno è generato grazie all'agente tensioattivo che reagendo con l'acqua presente è in grado di portare a repulsione le particelle di materiale invertendo la forza elettrostatica tra di esse e, provocando quindi una riduzione della tensione superficiale dell'acqua nel terreno, ne segue una diminuzione delle forze di legame che per effetti di natura capillare tenderebbero a legare le particelle di acqua e terreno. Questi effetti variano in base al tipo di tensioattivo utilizzato ed in base alle quantità.

In *Figura 4.2* è possibile vedere come la tensione superficiale decresca all'aumentare della percentuale di tensioattivo introdotto.

Le caratteristiche di fluidità, plasticità e impermeabilità al materiale vengono fornite dalla schiuma siccome le bolle di cui è composta si vanno a posizionare tra i vuoti intergranulari facilitando lo scorrimento tra le particelle granulari e ostacolando la filtrazione dell'acqua.

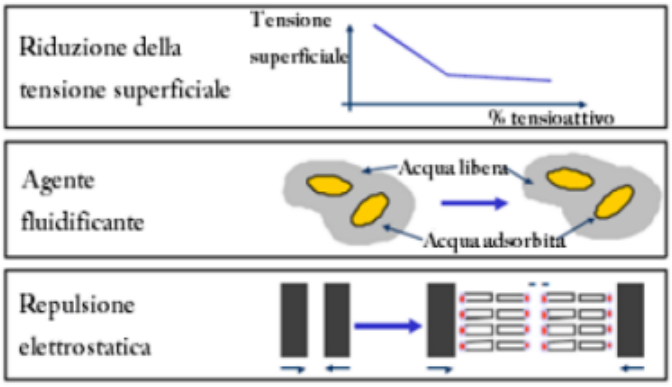


Figura 4.2 - Effetti della schiuma sul terreno (Langmaack, 2000)

- **Bentonite:** L'uso della bentonite come additivo condizionante nella camera di scavo delle TBM-EPBs va a conferire o aumentare la plasticità e allo stesso tempo ridurre la permeabilità dei terreni a grana grossa. Proprio per questa sua proprietà viene iniettata pure al fronte in caso di scavo in terreni molto permeabili con gravi problemi di venute d'acqua.

  Il parametro con il quale viene definito il condizionamento tramite aggiunta di bentonite, oltre il peso specifico proprio dello slurry (γ_{slurry}) è il *SIR* (Slurry Injection Ratio) che rappresenta il volume di slurry bentonitico immesso nel volume di terreno:

$$SIR = \frac{V_{slurry,bent}}{V_{terr}} \cdot 100 \qquad (\%)$$

  L'aggiunta di filler bentonitico viene impiegata per modificare la curva granulometrica nei materiali grossolani qualora la frazione di fine presente fosse insufficiente per ottenere un condizionamento ottimale tramite l'uso di altri agenti come acqua e schiuma.

- **Polimeri a lunga catena**: I polimeri sono essenzialmente lunghe catene di molecole formate dall'unione di un grande numero di monomeri. Quelli che trovano maggior impiego nel campo del condizionamento sono i bio-polimeri, creati a partire da catene di idrocarburi, in questa maniera risultano essere prodotti biodegradabili e non presentano problemi relativi al loro stoccaggio. Ne esistono in una grande varietà di forme ma, solitamente, sono solidi che vengono poi disciolti e dispersi in acqua.

  Possono venire impiegati come condizionanti da soli oppure in concomitanza all'uso di schiuma. Introdotti in proporzioni relativamente piccole per lubrificare e conferire plasticità al terreno grossolano.

  Per descrivere il loro utilizzo come condizionanti si fa riferimento alla concentrazione di polimero nello slurry polimerico ($C_{slurry,pol}$), ovvero il rapporto percentuale in peso tra il polimero e l'acqua. L'altro parametro necessario per quantificare il condizionamento tramite polimeri è, come nel condizionamento con bentonite, il *SIR* ossia il volume di slurry aggiunto nel terreno, ma in questo caso si fa uso di uno slurry polimerico.

  Nello specifico nelle TBM-EPBs ricoprono le seguenti funzioni (*Kupferroth et al., 2001*):

  - aumentare la viscosità dell'acqua nel terreno vicino il fronte di scavo;
  - incrementare il legame tra le parti fini del limo e della sabbia per ridurre la permeabilità;
  - aumentare la rigidezza del terreno e aiutare a formare un "tappo" nella coclea;
  - rendere la schiuma più rigida e resistente per prevenire dissesti durante le pause di lavoro;
  - lubrificare il terreno nella fase di convogliamento dalla camera di scavo alla vite senza fine della coclea;

- prevenire o ridurre l'adesione agli utensili o ai dischi o altre superfici metalliche;
- ridurre la coppia torcente della testa per una minore manutenzione e per aumentare la velocità di avanzamento.

- **Agenti lubrificanti, anti-adesione e disgreganti:** Impiegati in terreni prevalentemente argillosi hanno la finalità di limitare l'adesione dell'argilla alle parti meccaniche a contatto con essa e di evitare il suo ricompattamento all'interno della camera o dell'estrattore.

4.2 Condizionamento con schiume

Per riuscire a descrivere il condizionamento tramite uso di agenti schiumogeni, è opportuno che vengano introdotti dei parametri che definiscano quantitativamente le sue caratteristiche in base al tipo di schiuma e al suo utilizzo col terreno.

Tali parametri vengono poi adottati in fase progettuale, infatti è necessario stabilire la loro combinazione che porta ad avere il risultato ottimale, in termini di efficacia del condizionamento, per ciascuna tipologia di terreno.

Infine, è necessario anche effettuare delle prove di laboratorio sulle schiume per ricavare alcuni parametri e/o per determinare alcune loro proprietà.

4.2.1 Parametri caratteristici del condizionamento con schiume

I parametri attraverso i quali si possono descrivere le caratteristiche del condizionamento con uso di agenti schiumogeni in macchine TBM-EPBs sono:

- **Concentrazione del tensioattivo (*c*):** percentuale di agente tensioattivo presente nel liquido generatore della schiuma formato da acqua e appunto il liquido di tensioattivo.
  È indipendente che si faccia il rapporto in volume o pesi in quanto si considera che il peso specifico del liquido tensioattivo sia pari a quello dell'acqua perciò

anche la miscela di liquido generatore risultante avrà sempre il medesimo peso.

$$c = \frac{V_{tensioattivo}}{V_{liq}} \cdot 100 \qquad (\%)$$

- ***FER* (Foam Expansion Ratio):** rapporto tra il volume di schiuma e il volume iniziale del liquido generatore, il quale, può essere interpretato come la somma dei volumi delle componenti da cui è formato, ovvero la somma del volume di tensioattivo e del volume di acqua:

$$FER = \frac{V_s}{V_{liq}}$$

Il *FER* varia tra 8 e 20 e per valori bassi (8-10) la schiuma si definisce "bagnata" ed è più pesante, mentre per valori alti (14-20) viene definita come "asciutta" e si ha una schiuma più leggera. Il peso specifico della schiuma è pari appunto all'inverso del valore del *FER*.

La scelta di questo parametro è definita in funzione del terreno da scavare e, in generale, per terreni prevalentemente sabbiosi si adottano *FER* piuttosto alti, al contrario nel caso di terreni che hanno un elevato contenuto di argilla, si opta per *FER* bassi caratterizzati da una schiuma bagnata che risulta avere effetti migliori in terreni argillosi.

- ***FIR* (Foam Injection Ratio):** rapporto tra il volume di schiuma iniettato nel terreno e il volume di terreno scavato, viene tipicamente espresso in percentuale:

$$FIR = \frac{V_s}{V_{terr}} \cdot 100 \qquad (\%)$$

Il *FIR* durante la ricerca del condizionamento ottimale di un terreno deve essere scelto in modo che apporti sufficiente schiuma per fornire la corretta plasticità

e consistenza al terreno ma allo stesso tempo va evitato l'eccesso di schiuma che darebbe luogo alla segregazione del materiale in camera di scavo o a creare consistenze troppo fluide per essere trasportate con il nastro.
Tale parametro, espresso in percentuale, oscilla in un range di valori compresi comunemente tra 10% e 80%.

- **Tempo di semivita della schiuma (t_{50}):** tempo impiegato dalla schiuma per drenare il 50 % del liquido generatore a pressione atmosferica (*EFNARC, 2005*). È un parametro che descrive la stabilità della schiuma nel tempo. Grandi valori di t_{50} stanno a significare che la schiuma ha bolle stabili che durano a lungo prima di collassare, al contrario t_{50} bassi esprimono scarsa stabilità.

  In generale, il tempo di semivita è legato alla concentrazione del tensioattivo e dipende dalla scelta del valore di *FER*. Infatti, per *FER* alti si ha schiuma asciutta e più stabile, *FER* bassi danno schiume più bagnate le cui bolle diventano instabili più velocemente.

  Invece aumentando la concentrazione del tensioattivo si migliora la stabilità delle bolle di schiuma e quindi si raggiugono valori di t_{50} più elevati, al contrario a basse concentrazioni di tensioattivo nella schiuma corrispondo bassi valori di t_{50} che significano scarsa stabilità per le bolle.

  È un parametro che viene determinato tramite una apposita prova di laboratorio in cui però non interviene il terreno. Però si evidenzia che la stabilità della schiuma quando si trova miscelata al terreno risulta superiore rispetto al valore che si ottiene tramite la procedura standard. Perciò se risultasse importante determinare con precisione tale parametro in fase di progetto del condizionamento andrebbe valutato tenendo conto del terreno da scavare in quanto si ricreerebbe una situazione più vicina a quella che avviene realmente in camera di scavo.

  TR (Treatment Ratio): Rappresenta il contenuto di volume di tensioattivo immesso nel volume di terreno scavato. È un parametro di condizionamento

che riguarda principalmente l'aspetto ambientale, infatti deve restare al di sotto di un valore di soglia limite che è definito per ogni terreno sulla base di test eco-tossicologici. Viene calcolato come:

$$TR = \frac{1}{10} \cdot c \cdot \frac{\mathrm{FIR}}{FER} \qquad [l/m^3]$$

4.2.2 Prove di laboratorio sulle schiume

Le prove utilizzate per la determinazione dei parametri e delle proprietà caratteristiche delle schiume impiegate come condizionanti sono:

- **Test di semivita:** Attraverso questa prova si valuta il tempo di semivita della schiuma (t_{50}) ed è importante che vada effettuata per ogni tipologia di schiuma impiegata nelle prove per la determinazione del condizionamento ideale.

  L'attrezzatura necessaria per eseguire la prova è costituita dai seguenti elementi (*Martinelli, 2016*): un imbuto con pietra porosa installata al fondo, un contenitore graduato dalla capacità di 1 o 2 litri, un generatore di schiuma (*Figura 4.3*) tramite il quale si può regolare il valore del *FER*, una bilancia con precisione fino a 0.1 gr ed un semplice cronometro.

Figura 4.3 - Immagine e schema di funzionamento del generatore di schiuma usato presso il Laboratorio "Gallerie ed Opere in sotterraneo" del Politecnico di Torino (Martinelli, 2016)

La procedura viene condotta secondo linee guida *EFNARC (2005)* e si sviluppa nei seguenti passaggi:

i. Si prepara una soluzione di liquido generatore con la concentrazione di tensioattivo desiderata;

ii. Si produce attraverso il generatore una schiuma con il *FER* prestabilito;

iii. Vengono prelevati 80 gr di schiuma, quantità che costituisce il campione del test, e vengono messi all'interno dell'imbuto con la pietra porosa adagiata al fondo a fungere da filtro;

iv. Si predispone al di sotto dell'imbuto un recipiente di raccolta graduato posto sulla bilancia;

v. Viene misurato con il cronometro il tempo di semivita, ossia il tempo che intercorre tra il contatto del campione di schiuma con la pietra porosa e l'istante in cui nel contenitore sottostante all'imbuto si hanno 40 gr di liquido generatore che corrisponde al 50 % del peso iniziale.

Per ottenere un risultato finale più attendibile è consigliato eseguire almeno tre prove per ciascuna tipologia di schiuma considerandone poi il valore medio.

4.3 Prove di laboratorio per la determinazione del condizionamento ottimale

Ciascun materiale possiede diverse proprietà e necessita quindi un condizionamento specifico. A tal proposito è impossibile definire a priori quali siano i valori ottimali dei parametri di condizionamento per un terreno. Risulta dunque necessario eseguire delle prove di laboratorio che forniscano un range di valori da poter poi usare in sito. Tramite lo svolgimento dei test è possibile comprendere come il terreno reagisce agli agenti condizionanti usati nelle diverse quantità e proporzioni valutando quali gli

conferiscano il comportamento migliore nei vari scenari che si potranno presentare durante le fasi di scavo.

Ad oggi però non esistono prove e procedure normate per determinare la qualità di un condizionamento sul terreno, tuttavia si sono sviluppati una serie di test in grado di individuare se il terreno una volta condizionato presenti le proprietà richieste per condurre adeguatamente attraverso di esso uno scavo con una TBM-EPBs.

4.3.1 Slump test

Nella prova di slump è previsto l'utilizzo del cono di Abrams come metodo per valutare il comportamento del terreno condizionato in maniera semplice e speditiva mediante una interpretazione dell'abbassamento e della deformazione che l'impasto subisce a causa del proprio peso nel momento in cui viene rimosso il recipiente che lo sorregge. Il test viene descritto nelle norme (*ASTM, 2015a*) ed è la stessa prova usata anche per valutare la classe di lavorabilità dei calcestruzzi.

Come prima cosa occorre inumidire il cono e posizionarlo su una superficie che sia rigida, liscia, non assorbente e anch'essa inumidita. Dopodiché la prova consiste nel riempire il cono, che va mantenuto fermo esercitando una pressione coi piedi sulle staffe alla base, con il terreno condizionato in precedenza secondo le proporzioni volute. Infine, si solleva delicatamente e rapidamente il cono e si misura l'abbassamento della massa condizionata (*Figura 4.4*).

Si considera anche la tipologia di movimento compiuto dalla massa e il suo comportamento in termini di plasticità e fluidità ponendo attenzione al verificarsi di segregazione di acqua e/o di schiuma.

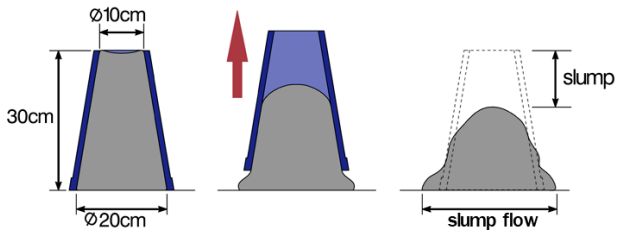


Figura 4.4 - Schema della prova di Slump

Abbassamenti del cono compresi tra 12 e 20 cm sono valori che vengono suggeriti come ottimali dalla letteratura tecnica (*Peila et al., 2008*).

Queste prove sono eseguite in laboratorio con l'obiettivo di definire i parametri ottimali del condizionamento ma anche in sito con finalità di controllo di quanto valutato in laboratorio.

Dalle osservazioni della prova si possono identificare cinque tipologie di comportamento:

- Il collasso è irregolare e c'è difficoltà nel formare un materiale "plastico". Questo può derivare da a un contenuto d'acqua e/o di schiuma insufficiente, a un eccesso di schiuma con carenza d'acqua o a una curva granulometrica non adatta al condizionamento;
- Comportamento rigido con un valore di slump basso ma con la formazione di massa plastica. È un comportamento limite tendenzialmente dovuto a carenza di schiuma (*FIR* troppo basso);
- Materiale troppo fluido con evidente segregazione di acqua e/o schiuma dovuta ad una presenza eccessiva di questi componenti. È un comportamento non idoneo;
- Comportamento di tipo plastico con modesta segregazione di acqua. In questo caso il terreno ha un comportamento limite;
- Materiale plastico con assenza di segregazione di acqua e/o schiuma, non si manifestano rotture della massa e si ha un abbassamento regolare. Se si verificano queste condizioni il condizionamento è ottimale (*Peila et al., 2008*).

L'analisi dei differenti casi nel corso degli anni ha portato a definire un diagramma (*Figura 4.5*) che consente una classificazione immediata del materiale condizionato soggetto alla prova di slump.

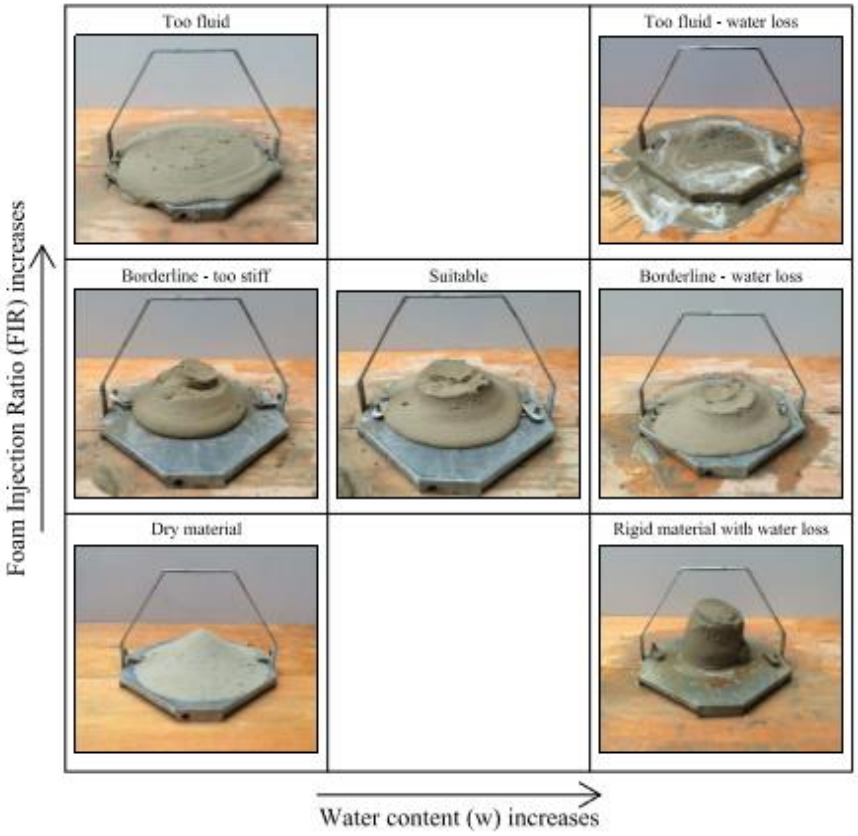


Figura 4.5 - Diagramma di valutazione della qualità della di slump in funzione del FIR e del contenuto d'acqua (Peila et al., 2009)

Il vantaggio delle prove di slump sul materiale condizionato risiede nella facilità, velocità e economicità dell'esecuzione. Invece un limite deriva dal fatto che, viste le limitate dimensioni del cono di Abrams, si devono escludere dalle prove le frazioni granulometriche più grossolane che in realtà sono presenti durante lo scavo. L'altro limite della prova riguarda il fatto che non si ricrea un ambiente rappresentativo della camera di scavo in termini di pressioni e temperatura.

4.3.2 Prova di estrazione

La prova, conosciuta anche con il termine inglese Screw Conveyor Device Test, ha come obiettivo quello di valutare l'idoneità del terreno condizionato a trasmettere pressione e ad essere estratto con un flusso continuo mediante un estrattore a coclea.

Si cerca di simulare in maniera tendenzialmente esaustiva il lavoro che avviene nelle coclee installate nelle TBM-EPBs e a questo scopo è stato costruito un macchinario del tutto simile che riproduca, come detto, l'estrazione del materiale condizionato dalla camera di scavo in pressione (*Vinai et al., 2007*).

Figura 4.6 - Fotografia dell'attrezzatura per la prova di estrazione utilizzata al laboratorio "Gallerie ed Opere in sotterraneo" del Politecnico di Torino (Borio, 2010)

L'apparecchio (*Figura 4.6*) è costituito da un serbatoio cilindrico di 800 mm di altezza con un diametro nominale di 600 mm, chiuso con una piastra di alluminio di 40 mm di spessore. La piastra è collegata ad un pistone idraulico di diametro 50 mm e con una corsa di 500 mm che viene azionato attraverso una pompa idraulica facendolo muovere verso il basso per l'applicazione della pressione. L'apparato è stato progettato per consentire una pressione di esercizio nel serbatoio fino a 1,5 bar.

Alla base del serbatoio si innesta, con un'inclinazione di 30° rispetto l'orizzontale, un estrattore a coclea di lunghezza pari a 1500 mm e diametro interno dell'involucro contenente la vite di 162 mm. Tale vite, azionata tramite motore elettrico che gli conferisce una velocità di rotazione compresa tra 6 e 15 rpm, è costituita da un albero di 60 mm di diametro con eliche a passo 100 mm. Per raccogliere i parametri funzionali provenienti dal test e registrarli per essere successivamente analizzati, è stato creato un sistema di acquisizione dati apposito (*Vinai et al., 2008*).

È formato da otto sensori che monitorano:

- Il movimento della piastra;
- La pressione al di sotto della piastra;
- La pressione alla base del serbatoio;
- La pressione lungo l'estrattore in 4 punti;
- La coppia torcente richiesta.

L'esecuzione della prova avviene con la seguente procedura (*Martinelli et al., 2018*):

i. viene preparato il terreno condizionato utilizzando una quantità variabile tra 25-30 kg per ogni impasto;

ii. il terreno condizionato viene riversato nel serbatoio ripetendo quest'azione finché il serbatoio non sarà pieno (capienza di circa 450 kg);

iii. la pressione sulla massa condizionata viene applicata abbassando la piastra superiore fino al raggiungimento della pressione di prova stabilita pari ad 1 bar;

iv. viene attivata la coclea e nel frattempo la piastra viene abbassata per mantenere costante la pressione nel serbatoio;

v. vengono effettuate con regolarità prove di slump sul terreno in uscita dalla coclea per verificarne la qualità nel tempo.

I parametri visionati con questa prova permettono di avere indicazioni sulla capacità del condizionamento nel produrre un terreno sufficientemente pastoso in modo da capire se sia in grado o meno di applicare un'adeguata contropressione, se possa essere estratto correttamente dalla coclea facendo decadere gradualmente la pressione e se i valori mobilitati di coppia torcente non siano elevati. Perciò risulta importante eseguire questa prova, che si riferisce maggiormente verso le reali esigenze, per confermare o meno i risultati ottenuti dalle prove di slump.

I limiti della prova sono correlati al fattore di scala e alle ridotte pressioni raggiungibili nel serbatoio rispetto a quelle realmente operative in camera di scavo.

Il condizionamento tra l'altro avviene a pressione atmosferica prima di essere immesso nel serbatoio, mentre nella realtà la miscelazione di terreno e agenti condizionanti avviene alle ben più alte pressioni di esercizio della macchina.

4.3.3 Prova di permeabilità

Una bassa permeabilità deve essere ottenuta tramite il condizionamento per impedire la nascita di flussi d'acqua dal terreno alla camera di scavo e quindi la nascita di forze di filtrazione che riducono la stabilità della galleria. Permette anche di trasmettere una corretta contro pressione al fronte e una graduale e costante caduta di pressione lungo la coclea.
Il limite di permeabilità da raggiungere con il condizionamento è stato definito negli anni e deve essere mantenuto inferiore al valore teorico di $10^{-5}\ m/s$.

Generalmente la riduzione della permeabilità è legata al tipo di terreno, in special modo alla sua granulometria, e alla tipologia di condizionamento utilizzata. In alcuni terreni è sufficiente la schiuma per riempire i vuoti intergranulari, per terreni con frazioni grossolane è necessario pure l'aggiunta di bentonite o polimeri per ottenere un condizionamento adeguato a quanto riguarda la permeabilità.

In questa prova si utilizza un permeametro a battente idraulico costante (secondo *ASTM, 2006*), i cui componenti principali (*Figura 4.7*) sono i seguenti:

- cella di prova con diametro interno di 75 mm e battente d'acqua costante;
- serbatoio contenente acqua a volume costante e uguale a 2 l;
- tubicino di collegamento (8 mm) tra serbatoio e permeametro;
- rubinetti per il controllo del flusso d'acqua nei tubi;
- cilindro graduato con capacità di 1 litro per raccogliere l'acqua filtrata.

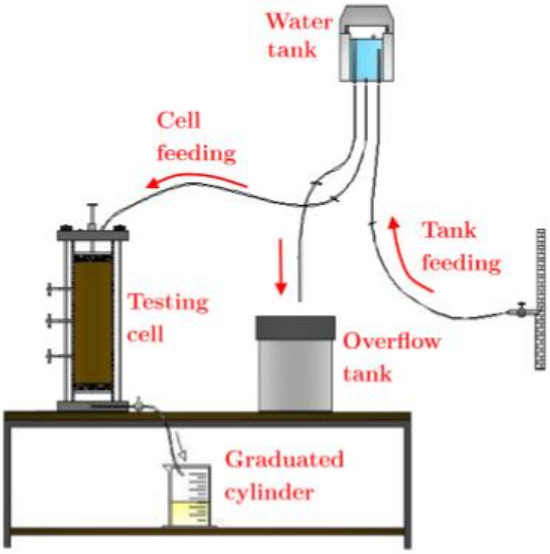


Figura 4.7 - Schema del test di permeabilità (Martinelli, 2016)

La prova consiste nel valutare il tempo impiegato da 2 litri di acqua a passare attraverso il campione in esame alla pressione atmosferica.

Il battente d'acqua utilizzato per questo test era di solito uguale a 1 metro (0,1 bar), ma per testare il materiale condizionato e confrontare poi con il terreno naturale è stato utilizzato un valore di 1 bar (10 m d'acqua).

Dalle prove eseguite si è ricavato che maggiore è il *FIR* maggiore è il tempo impiegato per far filtrare il 2 litri di acqua e perciò si ha una impermeabilizzazione migliore (*Borio & Peila, 2011*).

5 Caso Studio

L'oggetto dello studio è stato quello di descrivere e valutare, qualitativamente e quantitativamente, attraverso prove di laboratorio come le caratteristiche geomeccaniche del terreno in esame, dopo che questo aveva subito un processo di condizionamento, variassero nel tempo al degradarsi del tensioattivo utilizzato.

La necessità di effettuare il condizionamento deriva dal fatto che il materiale studiato proviene da un sito dove è prevista la realizzazione di una galleria ferroviaria ad alta velocità, per la quale la metodologia di scavo designata è mediante l'utilizzo di una Tunnel Boring Machine di tipo Earth Pressure Balance shield.

Più precisamente il condizionamento in questo studio è stato condotto impiegando cinque differenti agenti condizionanti: tre diversi tipi di tensioattivi denominati in questo elaborato rispettivamente come Prodotto A, Prodotto B e Prodotto C; un Prodotto D (slurry bentonitico) e un Prodotto E (slurry polimerico).
Lo studio ha interessato la valutazione di cinque differenti tipi di condizionamento applicati al terreno in esame che hanno utilizzato i prodotti appena citati: tre condizionamenti hanno riguardato l'applicazione dei tre tensioattivi ciascuno dei quali usato separatamente, un condizionamento ha coinvolto l'uso del tensioattivo Prodotto C insieme allo slurry bentonitico Prodotto D ed infine un condizionamento ha previsto l'impiego simultaneo sempre del tensioattivo Prodotto C con lo slurry polimerico Prodotto E

Uno dei motivi per cui è nata la necessità di compiere questo studio è a scopo di carattere logistico e organizzativo del cantiere di scavo. Infatti, immediatamente dopo che il terreno condizionato viene estratto dalla galleria è sottoposto a una normativa che impone vincoli dal punto di vista ambientale derivanti dalla presenza degli agenti condizionanti.
Perciò, inizialmente si è costretti a doverlo accumulare in vasche di raccolta all'interno dell'area di cantiere posta all'imbocco dello scavo, in attesa che si abbassi il livello di concentrazione dei tensioattivi al di sotto della soglia imposta per poterlo trasferire al di fuori del cantiere.

Risulta evidente che il tempo impiegato dal tensioattivo a degradarsi fino a scendere al di sotto della soglia limite e la produzione giornaliera in avanzamento prefissata definiscano il volume delle vasche adibite ad accogliere il materiale. Spesso tale spazio richiesto è molto grande e non è ricavabile nel cantiere che ha dimensioni limitate, di conseguenza l'unica soluzione è ridurre i volumi scavati diminuendo la velocità di avanzamento, però questa misura si ripercuote inevitabilmente sui costi che subiranno un aumento.

Successivamente, quando i vincoli ambientali sono rispettati, il terreno è trasferito all'esterno del cantiere in un'altra area di stoccaggio. È proprio in questa fase che trova una delle maggiori rilevanze questo studio. Infatti è utile determinare lo stato in cui si trova il terreno in questo momento, ovvero determinare se la sua consistenza è ancora troppo fluida e pastosa oppure presenta caratteristiche già tali per poter permettere un suo abbancamento. Nel caso ci trovassimo nella prima situazione, allora è altresì importante valutare il tempo impiegato dal materiale a riottenere il comportamento adatto a poterlo abbancare. Questi fattori sono interessanti perché determinano il tempo che il terreno dovrà rimanere nel sito di stoccaggio intermedio prima di giungere al deposito finale e lo spazio ad esso necessario con il quale si va a scegliere e dimensionare l'area adibita a questo.

Infine, l'altro motivo principale che ha condotto a questo studio è quello di valutare se il materiale di scavo soggetto a condizionamento, anziché finire nei siti di deposito e restare inutilizzato, presentasse caratteristiche meccaniche, e nell'ipotesi che avvenga dopo quanto tempo dal condizionamento le riacquistasse, tali da poter essere reimpiegato come materiale da costruzione per opere in terra come possono essere i rilevati.
Si ritiene proprio il rilevato particolarmente interessante in questo specifico caso in quanto la galleria in questione si incontra lungo lo sviluppo di una linea ferroviaria e quindi il terreno potrebbe essere riutilizzato per le costruzioni delle parti appunto in rilevato di questa.

In particolare, in conseguenza a quanto appena spiegato, lo studio si è focalizzato sulla comparazione del terreno condizionato tramite i vari agenti condizionanti sopra citati

con lo stesso terreno allo stato naturale non soggetto a condizionamento. Si è voluto evidenziare per ogni agente condizionante se, ed eventualmente dopo quanto tempo dalla loro applicazione, si recuperassero le caratteristiche presentate in principio dal terreno.

Nello studio è stato sviluppato il confronto anche tra i vari agenti condizionanti analizzando come il terreno, considerando le sue caratteristiche geomeccaniche, reagisse diversamente nel tempo al degrado di ognuno di essi.

Le prove di laboratorio effettuate per questo studio servono a determinare alcune proprietà geomeccaniche caratterizzanti il terreno utili a comprendere il suo comportamento nei confronti del condizionamento con il fine di raggiungere gli obiettivi delineati in precedenza.

Nel dettaglio le prove svolte a questo scopo sono state:

- Slump;
- Miscelatore torsionale;
- Prova scissometrica;
- Prova di taglio diretto;
- Proctor.

Ognuna di queste prove ha fornito risultati che permettono di interpretare dal punto di vista geomeccanico da loro indagato come il terreno ha risposto ai diversi condizionanti in specifici istanti di tempo prestabiliti.

5.1 Prove di laboratorio per la valutazione delle caratteristiche geomeccaniche del terreno condizionato

Per riuscire a ricavare particolari proprietà nel comportamento del materiale condizionato al variare nel tempo, si sono utilizzate le prove indicate precedentemente dove, ciascuna, ha contribuito diversamente a questo scopo andando ad indagare una

ben precisa caratteristica geotecnica ritenuta importante dal punto di vista tecnico e rappresentativa per i fini prefissati che lo studio voleva ottenere.
Le varie prove, come detto, sono state eseguite, con le medesime modalità, per ogni tipologia di condizionamento in diversi istanti di tempo successivi all'applicazione dell'agente condizionante. Questo permette di valutare gli effetti che questi agenti, e il loro progressivo decadimento, inducono alle caratteristiche geomeccaniche del terreno indagate con le seguenti prove di laboratorio oggetto di questo studio.

5.1.1 Prova di Slump

La prova di slump nel caso studio è stata condotta con le medesime attrezzature e seguendo le stesse procedure descritte al *Paragrafo 4.3.1* dove veniva presentato il suo uso come metodo con il fine di studiare, valutare e indirizzare la scelta su quale fosse il condizionamento ottimale per i terreni.

5.1.1.1 Applicazione della prova di slump al caso studio

La prova è stata utile in primis come ulteriore conferma che i parametri dei condizionanti scelti, in seguito alla campagna prove appositamente dedicata e svolta diversi mesi prima dell'inizio di questo studio, conducessero ad avere un materiale ben condizionato.
Infatti, per il caso studio la prova di slump è stata usata innanzitutto come mezzo per verificare la correttezza delle operazioni pratiche di condizionamento svolte in laboratorio durante la fase di preparazione dei campioni di terreno condizionato su cui effettuare poi le prove.
Ovvero, comparare, per ciascuno dei condizionanti utilizzati, se il terreno presentasse la stessa consistenza e indicativamente gli stessi valori di abbassamento riscontrati durante la campagna di prove iniziale che ha portato ad individuare i parametri di condizionamento ritenuti ottimali, e pertanto se il campione condizionato prodotto potesse essere utilizzabile per condurre i test previsti.

Questo è stato importante per accertare sia la bontà del condizionamento sul terreno a disposizione in laboratorio, sia l'uguaglianza tra i terreni utilizzati in questo studio e quelli utilizzati nello studio di determinazione dei parametri condizionanti ottimali, scongiurando che ci potessero essere stati degli errori in cantiere nel loro confezionamento oppure cambiassero in minima parte le caratteristiche geotecniche ma sufficientemente da modificare il risultato del condizionamento.

Oltre a questi scopi la prova di slump è stata eseguita come una delle cinque prove su cui si è basato lo studio.
Attraverso lo slump test si è voluta descrivere l'evoluzione temporale del comportamento del materiale, della sua consistenza e quindi degli abbassamenti subiti se soggetto ai diversi agenti condizionanti.
Nessuna caratteristica meccanica in particolare è connessa ai risultati di questa prova che è stata condotta con l'intento esclusivo di valutare visivamente al progredire del degrado degli agenti condizionanti il modificarsi del comportamento generale del materiale e l'evolversi della coesione e del contenuto d'acqua apportati in seguito al condizionamento. In questa maniera assume particolare rilevanza metterlo a confronto con come si presenta visivamente il terreno al naturale per capire se riassume, ed orientativamente dopo quanti giorni, la consistenza incoerente originale.

5.1.2 Miscelatore torsionale

Si tratta di uno strumento innovativo, progettato per confrontare i parametri della massa condizionata con quelli del materiale al naturale. Dal momento che questa apparecchiatura non è basata su nessun altro tipo di prova geotecnica che sia già esistente, i risultati che si ottengono vengono utilizzati come indicazioni sulle differenze che si sviluppano a seguito del condizionamento, senza poter fornire valori dei parametri ricavati che abbiano una accertata valenza assoluta ma bensì solo relativa ai singoli casi.

Con queste premesse, l'obiettivo del dispositivo è quello di quantificare la resistenza che il campione di materiale oppone nei confronti della rotazione delle pale di

miscelazione, cercando di riprodurre un meccanismo simile a quello che avviene all'interno della camera di scavo.

Una significativa caratteristica del dispositivo è quella di poter applicare una pressione idrostatica attraverso aria compressa al campione di terreno contenuto nel serbatoio ricreando ancora più effettivamente la situazione reale che si ha nelle TBM-EPBs.
È permesso in questo modo studiare il comportamento delle masse di terreno, sia naturali che condizionate, miscelando il materiale con diverse pressioni di esercizio predefinite registrando nel frattempo i valori di coppia corrispondenti.
Questo è stato oggetto di studi in passato (*Martinelli, 2016*) ma in questa campagna di prove non si è studiato il materiale pressurizzato quindi è un aspetto che non verrà trattato.

C'è la possibilità, inoltre, di aggiungere e miscelare gli agenti condizionanti come schiuma e acqua con il terreno direttamente all'interno del serbatoio, posto eventualmente in pressione simulando ancora più dettagliatamente le condizioni operative in camera di scavo. Tra l'altro con questo apparato è possibile lo studio di tipologie di terreni aventi distribuzione granulometrica molto eterogenea consentendo la presenza di elementi alquanto grossolani che solitamente sono complicati da studiare con i macchinari di prova usuali.

Un'altra questione che può essere indagata attraverso il macchinario è l'evoluzione dell'usura delle parti meccaniche, aspetto molto importante non solo nelle TBM da roccia ma anche nelle TBM-EPBs.
Questo aspetto è stato oggetto di più studi (*Barbero et al., 2012*; *Oñate Salazar et al., 2016*) ma non verrà preso in considerazione in questo elaborato in quanto questo specifico argomento non è stato affrontato.

Il macchinario (*Figura 5.1, a)* consiste in un serbatoio cilindrico di acciaio inox (altezza 613 mm, diametro interno 600 mm, capacità complessiva 0,13 m^3), concepito per evitare la corrosione e per facilitare poi le operazioni di ripulitura post svuotamento del materiale, è dimensionato a resistere a pressioni interne fino 10 bar, pertanto superiori alle normali pressioni raggiunte nelle macchine tipo EPBs.

Le dimensioni del diametro sono state scelte tenendo in considerazione il fatto che un diametro eccessivamente piccolo avrebbe portato ad indurre effetti di contorno sul terreno contenuto facendolo apparire più rigido delle sue effettive condizioni.
Aperto nella parte superiore per consentire il riempimento, viene sigillato con una spessa piastra di chiusura (25 mm), quando è usato in pressione, dove sono predisposte aperture per i dispositivi necessari a questo tipo di utilizzo (*Figura 5.1, b)*.

Come strumento di miscelazione è stato adottato un sistema di quattro coppie di pale deformate e non allineate tra loro (*Figura 5.1, c*) saldate ad un albero centrale.
La rotazione in senso orario genera un movimento del materiale verso il basso, mentre la rotazione opposta antioraria produce un movimento ascendente. Con questo meccanismo e disposizione risulta migliorata la miscelazione terreno-schiuma.

Il movimento delle pale è assicurato da un motore elettrico che permette di raggiungere come velocità massima di rotazione i 32 giri/min, fornendo come valore massimale di coppia in rotazione 500 Nm.

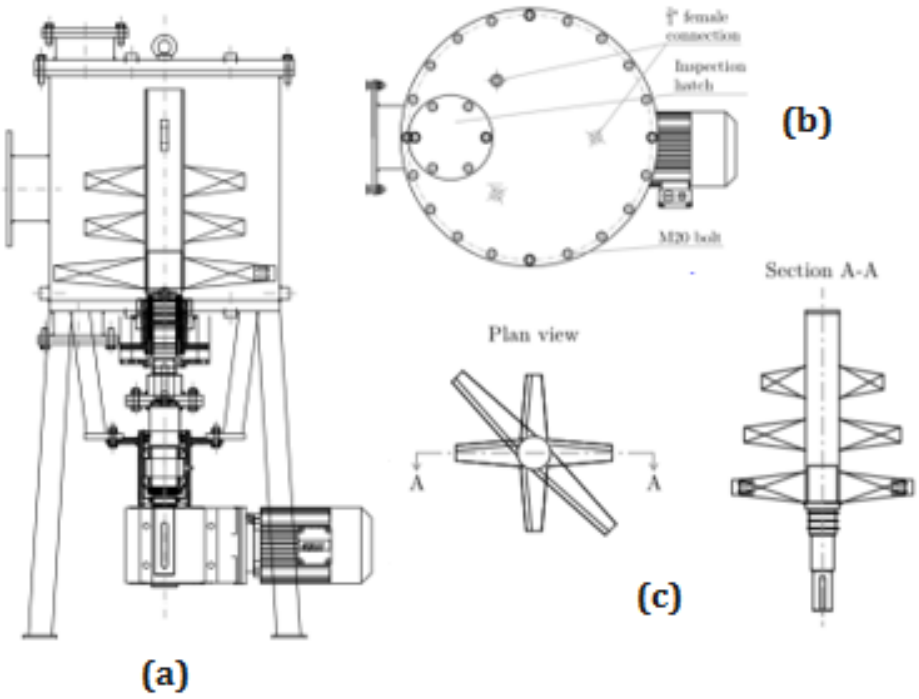


Figura 5.1 - Disegno tecnico del miscelatore torsionale-vista laterale (a); piastra di chiusura-vista dall'alto; sistema di pale (c). (Martinelli, 2016)

Attraverso il software implementato appositamente per il controllo di questo dispositivo si può sia registrare i vari parametri misurati, sia impostare la velocità e il senso di rotazione delle pale. Lo strumento è capace inoltre di misurare in contemporanea differenti parametri durante la fase di rotazione del sistema di pale:

- Coppia torcente delle lame in rotazione: Viene misurata con una cella di carico solidale ad una barra metallica collegante il motore al telaio che sorregge l'apparecchio. Il momento è poi calcolato dal software moltiplicando il carico registrato sulla cella per la lunghezza nota del braccio di leva.

- Pressione interna superiore e inferiore: Misurata, solo in caso di uso in pressione dello strumento, attraverso due distinti trasduttori posti rispettivamente nella parte superiore del serbatoio e al suo fondo.

Un'operazione importante è il campionamento dei valori di coppia torcente a vuoto, ossia i valori misurati quando vengono fatte ruotare le pale senza che il serbatoio fosse riempito col materiale. Il software poi in fase di acquisizione durante la prova effettiva sul terreno rimuove automaticamente questi valori da ciò che viene misurato dalla cella di carico fornendo in questo modo la coppia netta, ovvero quella indotta solo dalla resistenza e dall'attrito del materiale che è il vero dato ricercato dal test.

5.1.2.1 Applicazione della prova con miscelatore torsionale al caso studio

Come già detto in precedenza, in questo studio non è stato previsto l'utilizzo di questo strumento in pressione, cosa per la quale era stato invece ideato originariamente.

Non essendo necessaria l'applicazione della pressione, il serbatoio non è stato sigillato con la piastra di copertura ma è stato lasciato aperto per tutto il periodo di conduzione della prova, quindi sia durante lo svolgimento vero e proprio con l'albero in rotazione, sia durante i periodi di riposo in cui il materiale veniva lasciato inalterato al suo interno. Questa modalità di esecuzione della prova è stata la medesima tanto per le due tipologie di terreno naturale, tanto per i campioni di terreno condizionato.

Questo ha favorito la creazione di condizioni affinché il terreno condizionato potesse essere conservato in maniera standard per tutte le prove non alterando il suo rilascio del contenuto di acqua e il processo di decadimento degli agenti condizionanti.

Per garantire di operare in uguali condizioni per tutte le prove si è deciso di riempire il serbatoio sempre allo stesso livello, occupando all'incirca due terzi della capienza totale, perché si era notato in precedenza che a livelli maggiori di riempimento corrispondevano coppie nette misurate dallo strumento più elevate probabilmente dovute al maggior peso che grava sulle lame in rotazione e alla maggiore compattazione indotta sul terreno.

La coppia torcente che viene misurata non è stata ancora correlata da nessuna relazione alle grandezze meccaniche note, ma presumibilmente esiste un legame riconducibile alla resistenza a taglio del terreno.
Data la mancanza di questa relazione con una grandezza meccanica generale, alla stessa maniera di come è avvenuto per le altre prove, i risultati della prova sono stati interpretati come confronto tra quelli registrati sul terreno naturale e quelli invece misurati nei diversi giorni sul terreno condizionato. Così facendo si ha l'opportunità di monitorare la progressiva evoluzione che quest'ultimi mostrano in rapporto ai valori mostrati dal terreno naturale, i quali sono presi come riferimento che si vorrebbe raggiungere.

5.1.3 Prova scissometrica

La prova scissometrica (Vane shear Test) consente la misura diretta e rapida della resistenza al taglio non drenata (coesione non drenata C_u) dei terreni.
Può essere eseguita in situ, sia sul piano campagna sia a diverse profondità al fondo di sondaggi, oppure in laboratorio su campioni di terreno indisturbati o ricostituiti opportunatamente confinati. Il principio su cui si basa è identico per entrambe le tipologie di applicazioni, si avranno solamente dei cambiamenti nei dispositivi usati e nelle modalità di conduzione della prova dovuti al fatto di adattarli per soddisfare le diverse specifiche esigenze.

Avendo eseguito una prova su campioni di terreno in laboratorio, utilizzando però uno strumento portatile ad uso manuale, ci si occuperà di illustrare solo le caratteristiche inerenti a questa situazione.

Il test prevede l'infissione nel campione di terreno di una paletta a quattro lame verticali ed ortogonali tra loro e ruotandola ad una velocità costante si misura il valore di picco della coppia di momento torcente necessario per portare a rottura il terreno lungo la superficie cilindrica che inviluppa le alette. Lo sforzo di torsione viene misurato o attraverso una molla elastica calibrata a fornire un valore del momento proporzionalmente alla rotazione che subisce, oppure in alcuni strumenti più moderni la misura avviene grazie a trasduttori elettronici. La resistenza non drenata viene poi ricavata convertendo con una relazione analitica il valore di coppia torcente registrata.

Per quanto riguarda le applicazioni di laboratorio classiche la paletta è montata su un dispositivo apposito, nel quale si fa alloggiare anche il campione di terreno da testare, che la fa lentamente calare all'interno del terreno fino ad una profondità pari a due volte la sua altezza, e gli applica in maniera automatica la coppia torcente che produce la rotazione alle velocità impostate e stabilite dalla norma (*ASTM, 2016*). Si ottengono risultati molto precisi, in quanto la resistenza a taglio viene mobilitata gradualmente, ma con operazioni che richiedono un certo intervallo di tempo.

La letteratura di ricerca e le modifiche apportate a queste tipologie di dispositivi utilizzati per condurre particolari prove in precisione in laboratorio è molto ampia.
In particolare (*Messerklinger et al., 2011*) hanno realizzato un apparato per condurre questa prova che dà la possibilità di trovare la resistenza non drenata del terreno modificando la pressione che può essere applicata al campione durante l'esecuzione della prova, aspetto molto interessante nel caso dei terreni condizionati.
Sempre riguardante lo studio del condizionamento (Merrit et al., 2013) hanno studiato, usando un dispositivo Vane shear standard, la relazione che c'è tra la resistenza non drenata calcolata con la prova scissometrica e i risultati delle prove di slump condotti su più materiali sottoposti a diversi condizionamenti.

Altrimenti, per eseguire le prove più speditivamente ma ottenendo sempre risultati attendibili, si può usare un dispositivo ad uso manuale e facilmente trasportabile, lo stesso usato per eseguire le indagini superficiali in sito. In questo caso la paletta è montata su un corpo cilindrico, dove è allocata una molla torsionale, fornito di un semplice manubrio a forma di T e la prova viene completamente svolta in maniera manuale dall'operatore.

Per l'impiego in sito l'unica cosa in cui la strumentazione differisce dall'utilizzo di laboratorio sono le dimensioni maggiorate della paletta. La struttura di quest'ultima permane sempre la stessa con quattro alette ortogonali tra di loro di forma rettangolare oppure con le estremità inclinate a 45° a dare una forma che facilita l'inserimento nel terreno. Il diametro (D) in questo caso è compreso tra 35 e 100 mm e le dimensioni dell'altezza variano tra $1D \div 2{,}5D$ (*ASTM, 2015b*). L'albero centrale a cui le alette sono collegate deve avere un diametro ridotto (d < 17 mm) per una lunghezza di almeno $5d$ dall'attaccatura di queste e loro stesse hanno spessori ridotti inferiori ai 3 mm e sono acuminate all'estremità, in modo da non creare disturbo eccessivo al terreno durante l'immissione.

Per usi di laboratorio le grandezze della paletta sono più ridotte secondo quanto standardizzato nelle norme (*ASTM, 2016*). Il diametro delle alette, di forma rettangolare e piatte con spessore inferiore al millimetro, è compreso tra 12,7 e 25,4 mm, mentre l'altezza ha dimensioni solitamente doppie rispetto al diametro anche se sono accettate palette aventi alette con diametro ed altezza uguali in grandezza.

Per una buona risoluzione di coppia torcente, si deve selezionare un diametro della paletta che sia in grado di fornire una risoluzione ottimale. Il diametro selezionato è direttamente correlato alla consistenza del suolo da analizzare.

Per terreni più morbidi, sono necessarie dimensioni maggiori per permettere di avere una buona risoluzione. In terreni più rigidi e coesivi, sono sufficienti alette più piccole anche per evitare di danneggiare il dispositivo di misurazione della coppia.

Un esempio di strumentazione standard è quello fotografato in *Figura 5.2* che mostra il dispositivo presente nei laboratori del Politecnico di Torino, il quale è fornito di tre palette di diversa grandezza intercambiabili, con alette di altezza doppia rispetto ai

diametri aventi misure crescenti da 16,20 e 25,4 mm ed è dotato pure di una piccola asta con funzione di prolunga.

Figura 5.2 - Esempio di strumento Vane Shear Test manuale (Martinelli et al., 2015)

La procedura di esecuzione consiste semplicemente nell'inserire delicatamente la paletta nel terreno fino a farla penetrare totalmente ad una profondità di almeno 60 mm, assicurandosi che il dispositivo di misura a molla segni inizialmente lo zero, si procede a far compiere un giro completo alla paletta in maniera più regolare possibile utilizzando il piccolo manubrio per dare il movimento.

Questo è un dispositivo molto semplice, comodo e maneggevole e la prova è molto veloce e ripetibile frequentemente anche se c'è da prestare attenzione durante l'esecuzione perché si potrebbero commettere errori, come non mantenere durante la rotazione lo strumento stabilmente in verticale e sempre alla stessa profondità, e falsare quindi i risultati che si ottengono.

I campioni sui quali vengono effettuate le prove devono avere dimensioni sufficienti da consentire almeno una distanza tra superficie di rottura che si viene a formare e contorno laterale del campione pari ad almeno due diametri per evitare la nascita di effetti di bordo che falsino l'esito della prova.

Il calcolo della resistenza non drenata avviene attraverso una equazione che la mette in relazione alla coppia torcente misurata mediante considerazioni di tipo geometrico, derivanti dal fatto che la resistenza è sviluppata sulla superficie cilindrica di rottura creata dalle alette.

Tale relazione per paletta con alette rettangolari è:

$$C_u = \frac{6M_t}{\pi d^2(d + 3h)}$$

In cui: C_u= Resistenza a taglio non drenata; M_t= Momento torcente massimo registrato; d= Diametro della pala; h= Altezza delle alette.

Prima di utilizzare i dati raccolti con questa prova come valori progettuali in una analisi geotecnica devono essere corretti attraverso un fattore di correzione che può dipendere da i valori del Limite Platico (PI) e/o dal Limite Liquido (LL) (*Bjerrum, 1973*).

5.1.3.1 Applicazione della prova scissometrica al caso studio

Nonostante questa prova sia nata inizialmente con l'obiettivo di valutare la resistenza non drenata in terreni coesivi e con prevalenza di grana fine, negli ultimi anni questo test è stato ampiamente utilizzato anche nella valutazione del condizionamento dei terreni (*Martinelli et al., 2015*).

Generalmente viene condotta in terreni che sviluppano una certa coesione e composti maggiormente da materiale fine, oppure in terreni che presentano valori di permeabilità bassi, tali da permettere l'insorgere di condizioni non drenate dopo l'applicazione di un carico come può essere il momento torcente indotto durante la prova.

Tra questa ultima categoria di terreni rientrano quelli che hanno subito un processo di condizionamento e che grazie a questo godono di valori di permeabilità comunque bassi nonostante la loro granulometria naturale non lo permetterebbe.

Proprio nel terreno analizzato nel presente caso studio la frazione granulometrica fine contenuta è molto esigua e appunto per questo motivo, nonostante il processo di condizionamento ne abbia ridotto notevolmente la permeabilità, non è propriamente esatto parlare del calcolo della resistenza al taglio non drenato, proprietà tipicamente associata ai terreni limosi e argillosi.

Piuttosto, in questo specifico studio di ricerca, è più corretto parlare che attraverso la prova scissometrica avviene la misura di una caratteristica che è collegata in maniera proporzionale alla resistenza al taglio del terreno fornita dal materiale, ma che viene considerata solo a fini comparativi tra quella manifestata dal terreno allo stato naturale e quella calcolata a vari giorni sui campioni di materiale condizionato.

Inoltre, dato che il terreno su cui è stata eseguita la prova contiene elementi piuttosto grossolani (fino a 20 mm) in confronto alle dimensioni dei grani costituenti i terreni per i quali tale strumento è stato ideato, e che la resistenza a taglio massima appartenente ai terreni condizionati è limitata, sempre confrontandola con quella sviluppabile invece dai terreni su cui è solitamente condotta la prova, si è optato di usare una paletta (*Figura 5.3*) che avesse dimensioni maggiorate (Diametro= 54,5 mm; Altezza= 109 mm) rispetto a quelle standard comunemente usate in laboratorio e descritte dalla norma di riferimento sopra citata.

Questo permette di ricavare risultati più sensibili in termini di resistenza misurata e che non siano influenzati dalla presenza dei grani più grandi che potrebbero creare su palette di più piccole dimensioni attriti non rappresentativi delle reali caratteristiche del terreno.

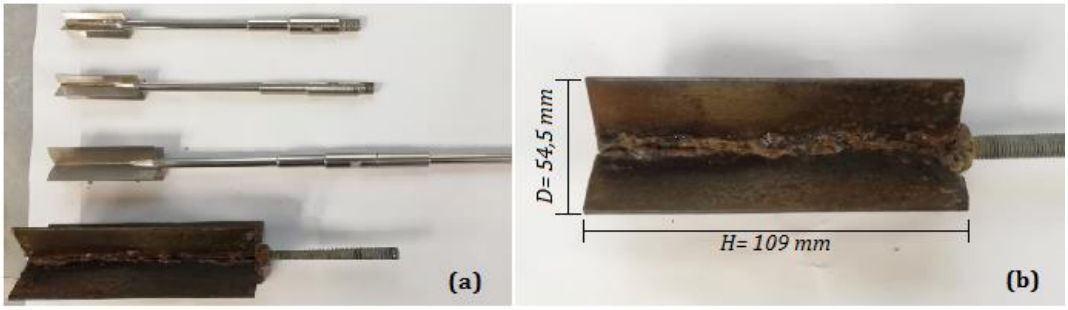


Figura 5.3 - Immagine della paletta modificata utilizzata in questa campagna di prove: Confronto con le palette di dimensioni standard (a); Dimensioni della paletta impiegata (b)

5.1.4 Prova di taglio diretto

È il metodo più comune per calcolare la resistenza al taglio di un terreno e viene standardizzato nelle norme (*ASTM, 2011*).

Durante la prova di taglio diretto, il provino è confinato all'interno di una scatola rigida (scatola di Casagrande per la prova di taglio diretto) divisa in due parti su un piano orizzontale, ognuna libera di muoversi rispetto all'altra (*Figura 5.4*).

Il campione è sottoposto ad un carico verticale N e ad una forza di taglio T, ed entrambi gli spostamenti orizzontali e verticali vengono misurati durante lo svolgimento della prova mediante trasduttori lineari di spostamento variabile (LVDT).

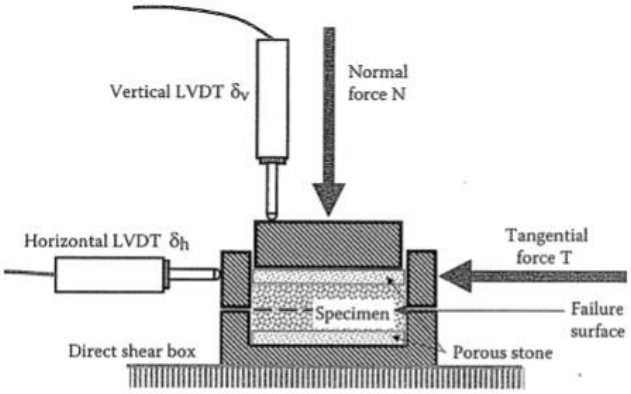


Figura 5.4 - Schema della sezione di una scatola di taglio diretta (Fratta et al., 2007)

La prova è eseguita applicando al provino una velocità di deformazione controllata la quale si sviluppa in prossimità del singolo piano di taglio determinato dalla configurazione della scatola. Pertanto, le sollecitazioni di taglio e gli spostamenti non sono distribuiti uniformemente all'interno del campione e non può essere definita con certezza un'altezza entro la quale si sviluppano le deformazioni di taglio, perciò questo impedisce la loro determinazione attraverso la prova. Il tipo di sollecitazione applicata e la superficie di rottura imposta determinano una rotazione delle tensioni principali e quindi dei piani principali rispetto alle condizioni che si hanno nell'altra prova frequentemente usata per determinare la resistenza a taglio, ovvero la prova triassiale, dove la superficie di rottura è libera di svilupparsi secondo il piano debole.

La scatola di taglio è inserita all'interno di un involucro che viene riempito d'acqua in modo da saturare completamente il campione di terreno contenuto al suo interno. In seguito all'applicazione del carico normale si instaura un processo di consolidazione, del tutto simile a quello che avviene nell'edometro, reso possibile dalla presenza di pietre porose su entrambe le facce piane del provino che creano le vie di filtrazioni per il liquido avendo una permeabilità maggiore di quella dei terreni che sono sottoposti al test. La filtrazione avviene anche attraverso la superficie di scorrimento, dunque la prova risulta essere condotta sempre in condizioni consolidate e drenate (DC).

La scatola di taglio può avere lo spazio per allocare i provini di terreno di forma circolare o quadrata, fabbricata generalmente in acciaio, è divisa orizzontalmente in due parti sovrapposte, tenute insieme da due viti di allineamento, che vengono alzate durante la fase di taglio.

Per l'esecuzione della prova è previsto sistemare al fondo della scatola una piastra di base che funzioni da piano d'appoggio, sopra di questa è posta la pietra porosa inferiore e a contatto con questa viene messa una sottile carta filtro che ha la funzione di impedire, durante il drenaggio, il passaggio di piccole particelle solide di terreno che potrebbero finire ad occludere i vuoti presenti nella pietra porosa compromettendone il funzionamento. Sopra la carta filtro infine è posta una piastra nervata, dotata di forellini per il passaggio dei liquidi, che è a diretto contatto con il provino di terreno, la sua funzione è quella di trattenere, grazie alle nervature, in posizione il provino durante la fase di taglio e trasferire le sollecitazioni taglianti facendo in modo che le deformazioni si sviluppino tutte nell'intorno della superficie di rottura. Il provino è ovviamente disposto in corrispondenza del piano divisorio della scatola che lo interseca a metà della sua altezza.
Al di sopra del provino sono disposti in serie gli stessi elementi presenti inferiormente ovvero in questo ordine verso l'alto: piastra nervata, carta filtro, pietra porosa ed infine viene posta una piastra di carico verticale con lo scopo di ripartire uniformemente sulla superficie superiore del provino il carico a cui è sottoposta.

In *Figura 5.5* è mostrata una rappresentazione degli elementi appena descritti.

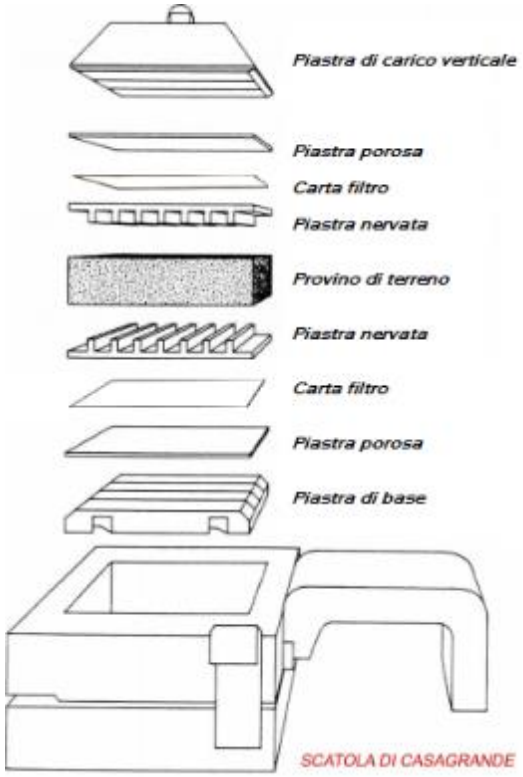


Figura 5.5 - Schema della disposizione degli elementi di una scatola di taglio diretto

Al termine del consolidamento vengono allentate le viti di allineamento, in questo modo le due parti di scatola non sono più a contatto diretto e non ci saranno così attriti a disturbare il loro scorrimento.

L'azione tagliante è applicata tramite il sistema di taglio, all'interno del quale è fissata la scatola, che tramite un motore fa traslare su una guida la parte superiore di questa con una velocità costante preimpostata e nel frattempo vengono registrati gli spostamenti verticali e orizzontali dai trasduttori e, dalla cella di carico, il valore dello sforzo tagliante applicato.

Il carico verticale è applicato attraverso un sistema costituito da un braccio di leva a cui, ad una estremità, vengono appesi i diversi pesi, in base all'entità dei quali corrisponde un determinato valore di carico che viene trasmesso al provino. L'elemento che trasmette direttamente il carico al provino è un telaio metallico a forma rettangolare, sul quale, sul suo lato inferiore, grava il braccio di leva con i pesi a esso collegati, e a sua volta sul lato superiore del telaio è posta un'asta che va direttamente ad esercitare pressione, in modo puntuale, sulla piastra di carico del

provino trasferendo ad esso il carico esercitato dai pesi, e lo mantiene tale sia durante la fase consolidativa sia durante la fase tagliante. All'asta sono collegati sia il trasduttore per la misura degli spostamenti verticali sia una cella di carico che permette di monitorare che la prova avvenga con le condizioni di carico decise in partenza.

In *Figura 5.6* è riportato uno schema generale della macchina di taglio diretta con il telaio su cu si regge il dispositivo e tutti gli elementi principali che la compongono:

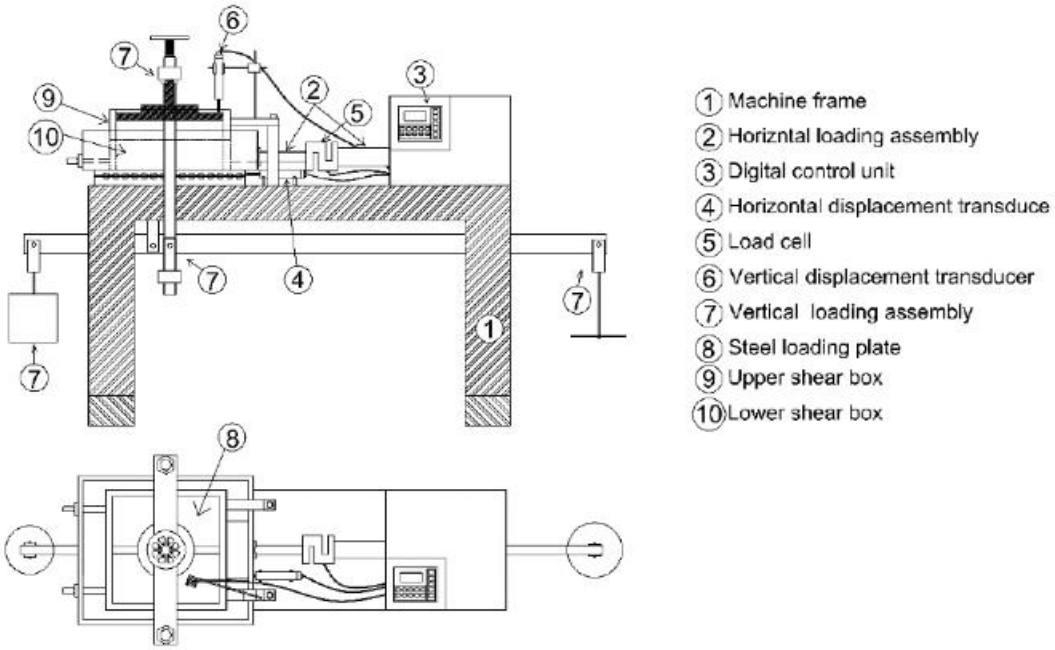


Figura 5.6 - Schema generale di un dispositivo per la prova di taglio diretto (Karimpour et al., 2015)

La velocità alla quale viene impostata la deformazione deve essere bassa tale da garantire il dissiparsi delle sovrapressioni interstiziali e lo svilupparsi del processo drenante di consolidazione.

In generale tre o più campioni sono testati, ciascuno sottoposto ad un diverso carico normale, per determinare l'effetto positivo di questo sul comportamento della resistenza al taglio e ricavare i parametri dell'inviluppo di rottura c'e φ' del criterio di Mohr-Coulomb.

5.1.4.1 Applicazione della prova di taglio diretto al caso studio

Nelle prove di taglio svolte la procedura prevista dalla normativa di riferimento citata in precedenza è stata appositamente adattata alle specifiche esigenze del caso studio. La strumentazione impiegata è rimasta invariata ma sono state apportate delle variazioni nelle modalità di esecuzione della prova che hanno permesso di poterla applicare ai terreni condizionati secondo le particolari necessità richieste in questo studio di ricerca.

La procedura standard appena descritta prevede di portare a saturazione il provino di terreno riempiendo con acqua l'involucro che alloggia la scatola di taglio.

Nel caso in esame, siccome le prove avvengono a vari giorni successivi su terreno che è stato sottoposto a condizionamento, questa operazione non viene compiuta perché la saturazione del provino apporterebbe modifiche al comportamento che il terreno condizionato ha acquisito ai vari giorni di distanza dall'applicazione degli agenti condizionanti.
Di conseguenza, i risultati che ne uscirebbero non sarebbero rappresentativi delle reali caratteristiche sviluppate dal materiale al deteriorarsi dei condizionanti, che invece risulta proprio essere l'obiettivo finale di tale studio.
Nelle restanti operazioni la prova è stata effettuata seguendo quanto descritto in precedenza sulla prova standard.

I provini di terreno condizionato sono stati lasciati al contenuto in acqua posseduto al momento della prova e ugualmente è stato fatto per le prove sul terreno naturale, anch'esse condotte senza saturare il campione.
Sono stati però testati in questo caso più provini preparati con contenuti in acqua differenti al fine di poter poi raffrontare i risultati con quelli derivanti dalle prove sul materiale condizionato che presentassero il medesimo contenuto in acqua.

Questa modalità di confronto cerca di ricreare una situazione in cui il terreno naturale e quello condizionato presentino lo stesso gradi di umidità con l'intento di escludere dai risultati che si ottengono gli effetti riconducibili ad un diverso contenuto in acqua.

Le differenze che si vengono a constatare tra terreno condizionato e non, aventi lo stesso contenuto di umidità, sono allora legate principalmente all'azione apportata dagli agenti condizionanti, della quale ne viene appunto favorita la quantificazione.

Al ripetere le prove a giorni successivi viene apprezzato nel tempo l'effetto del degradarsi dei condizionati e del decadimento della loro azione che si ripercuote sulle caratteristiche geomeccaniche, infatti, contemporaneamente a questo si registra una corrispondente variazione in termini di risposta meccanica del terreno.

5.1.5 Prova Proctor

In alcune applicazioni ingegneristiche può manifestarsi talvolta la necessità di migliorare le caratteristiche del terreno, sia nelle condizioni naturali in sito, sia soprattutto quando viene impiegato come materiale da costruzione (per esempio rilevati, terrapieni, ecc.).

Tra le tecniche di miglioramento di tipo meccanico quella che riveste la maggiore importanza è il costipamento, che consiste nell'aumentare artificialmente la densità del terreno attraverso l'applicazione di energia meccanica.

Gli effetti del costipamento sono: quelli di produrre un avvicinamento dei granuli con conseguente riduzione di compressibilità e cedimenti, aumenta il grado di incastro tra i grani conferendo valori del modulo di deformazione, delle resistenze a compressione e, in particolare, dell'angolo di attrito a taglio più elevati. Infine riducendo l'indice dei vuoti si riduce pure la permeabilità e si rende il terreno meno soggetto a subire infiltrazioni d'acqua.

La riduzione della porosità che si accompagna all'addensamento è legata in gran parte all'espulsione dell'aria contenuta nella terra, ed in modesta parte alla migrazione dell'acqua dato che il costipamento contrariamente alla consolidazione è un fenomeno rapido durante il quale il contenuto d'acqua varia poco.

In sito si possono usare diversi metodi di costipamento in reazione alla natura del terreno da trattare ed eventualmente alle tipologie di mezzi a disposizione.

In laboratorio invece i metodi di costipamento vengono riprodotti attraverso differenti prove in cui si dispone il terreno, in un recipiente metallico cilindrico, a strati successivi che vengono di volta in volta compattati.

Il metodo di costipamento, e quindi la prova, più diffuso in laboratorio è la prova Proctor, che prende il nome dall'ingegnere statunitense che ne fu l'ideatore e che per primo nel 1933 condusse studi sistematici sull'argomento esaminando l'influenza del contenuto d'acqua e dell'energia di costipamento.

L'obiettivo è quello di determinare il valore massimo di densità secca ottenibile con una particolare procedura di costipamento e di usarla come confronto con quella raggiunta in sito per verificare l'efficienza delle operazioni svolte.

La prova così ideata consiste nella compattazione di più strati di terreno, disposti in una fustella cilindrica, attraverso la caduta libera per un certo numero di volte da una altezza prefissata di un pestello di peso noto.

Il risultato finale della densità secca dipende ovviamente dall'energia di compattazione impiegata, che può essere fatta variare cambiando il peso del pestello, l'altezza di caduta del pestello, il numero di colpi per strato di terreno, o lo spessore degli strati.

Più specificatamente l'obiettivo principale della prova è quello di determinare la densità del secco del terreno ottenuta per diversi valori del contenuto d'acqua sottoponendolo alle modalità di compattazione descritte.

Se si fa variare il contenuto d'acqua del campione di terra in esame, mantenendo costante l'energia di costipamento e si rappresenta in un diagramma *Figura 5.7* la variazione della densità secca γ_d in funzione del contenuto in acqua *w*, si ottiene una curva a campana, per ogni valore di energia di compattazione usata, che presenta un massimo in densità (γ_{dmax})in corrispondenza di un certo contenuto in acqua indicato anche come optimum Proctor (w_{opt}).

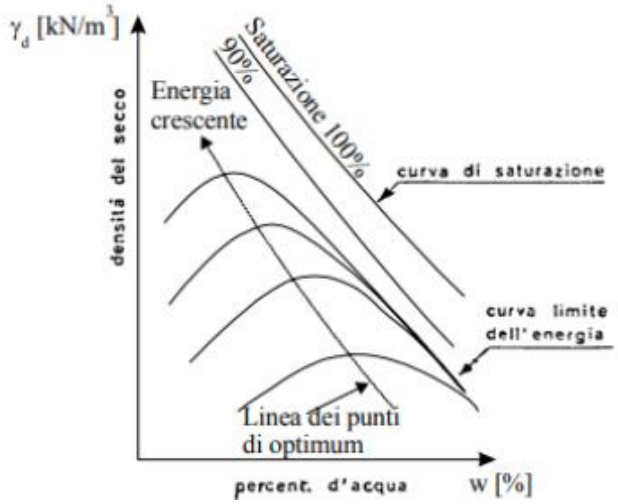


Figura 5.7 - Curve di costipamento della prova Proctor (Baglieri, 2016)

La forma a campana della curva di costipamento deriva dal fatto che piccole quantità di acqua lubrificano i grani favorendo un loro avvicinamento se soggetti ad azioni costipanti. Contrariamente, quantità eccessive di acqua producono una separazione tra i grani di terreno in quanto questa va a riempire i vuoti esistenti tra di essi impedendo il loro avvicinamento e perciò la loro compattazione.

Per ogni terreno l'optimum di contenuto d'acqua, il maximum di densità secca e la forma della curva variano al variare dell'energia di costipamento. Andando verso contenuti di acqua elevati, cioè oltre l'optimum, la curva di costipamento è all'incirca parallela alla curva di saturazione; che corrisponde anche alla curva con percentuale di vuoti nulla. Tale curva può essere facilmente individuata calcolando per ciascun valore di peso di volume secco il contenuto d'acqua necessario a saturare il materiale.

Se per una stessa terra si adopera lo stesso metodo di costipamento, ma cambiando l'energia impiegata, si ottiene una famiglia di curve con andamento tendenzialmente simile. Al crescere dell'energia di costipamento aumenta la densità secca massima ottenibile γ_{dmax} e diminuisce il contenuto d'acqua ottimale per il quale lo si raggiunge.

La linea che congiunge i punti di optimum si dispone all'incirca parallela alla curva di saturazione, ciò significa che per un dato terreno il massimo effetto di costipamento si ha per un preciso grado di saturazione quindi un preciso valore della percentuale di vuoti. Per contenuti d'acqua superiori rispetto all'optimum, le curve corrispondenti

alle diverse energie tendono a confondersi in un'unica linea che definisce pertanto la curva dell'energia limite. Ciò significa che per un certo contenuto d'acqua c'è un grado di addensamento massimo (la percentuale di vuoti nulla non è raggiungibile) che può essere ottenuto indipendentemente dall'energia di costipamento e il contenuto d'acqua per il quale lo si raggiunge non è mai uguale a quello di completa saturazione. Pertanto, un aumento dell'energia di costipamento è più efficace quando si lavora con contenuto d'acqua inferiore a quello corrispondente all'optimum.

Per la prova Proctor si fa riferimento generalmente a due tipi indicati come: Proctor normale (*AASHTO standard-T99*) e Proctor modificata (*AASHTO modificata-T180*).

La differenza consiste nella differenza di energia di costipamento che si fornisce al campione di terreno, quindi nella dimensione degli strumenti utilizzati, dell'altezza di caduta e del numero di strati.

- **Proctor standard:** Viene utilizzata per opere ordinarie come ad esempio i rilevati. Quando il campione di terreno da compattare è tutto passante al setaccio da 5 mm (n°4 ASTM) viene impiegata la fustella piccola da 943 cm^3(Metodo A). Altrimenti si usa la fustella grande da 2125 cm^3 (Metodo B) purché il materiale trattenuto al setaccio da 25 mm sia inferiore al 35%, condizione necessaria affinché il test risulti effettuabile su quel campione perché l'attrito tra grani e fustella deve essere un effetto trascurabile.

  Gli elementi principali *(Figura 5.8*) sono una fustella, sormontata da un collare mobile, che serve a contenere il terreno, e un pestello, vincolato a cadere all'interno di una guida, che è lo strumento che svolge la funzione di compattatore.

  - Altezza della fustella: 116,43 mm;
  - Diametro della fustella: 101,6 mm (Fustella piccola); 152,4 mm (Fustella grande);
  - Altezza di caduta del pestello: 305 mm;
  - Peso del pestello: 2,495 Kg;
  - Numero di strati: 3;

- Energia di compattazione: 59 N/cm^2.

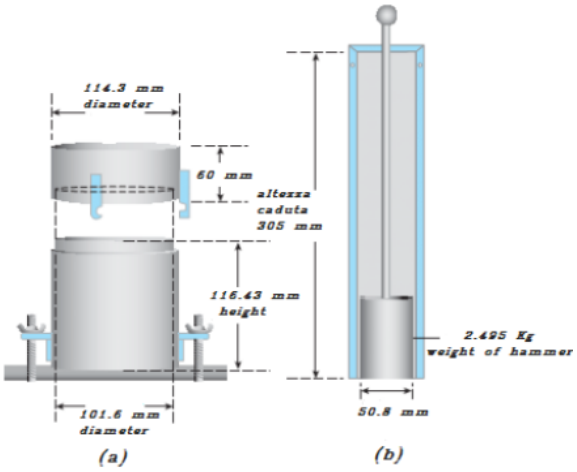


Figura 5.8 - Schema prova Proctor standard - Metodo A (Salahudeen et al., 2018)

Il numero di colpi da applicare per ogni strato è uguale a 25 per la fustella piccola e 56 per la grande, avendo come risultato quindi quello di applicare sempre la stessa quantità di energia per unità di volume in entrambi i metodi. Questo è valido indipendentemente sia per la prova standard sia per quella modificata.

Per ognuno dei tre strati alla fine dell'applicazione di tutti i colpi previsti, eseguiti con una particolare sequenza come mostrato successivamente, si dovrebbero ottenere tre strati uniformi e approssimativamente uguali in spessore e grado di compattazione.

- **Proctor modificata:** Viene eseguita su materiale più qualitativo, impiegato in opere dove sono richieste prestazioni migliori come sottofondi stradali e/o aereoportuali. Per l'uso delle fustelle vale quanto già detto per la prova standard in quanto vengono utilizzate le medesime per entrambe le prove.

  Gli elementi principali e le loro misure caratteristiche che la contraddistinguono dall'altra prova sono qui elencati e mostrati in *Figura 5.9*:

  - Altezza della fustella: 116,43 mm;

  - Diametro della fustella: 101,6 mm (Fustella piccola); 152,4 mm (Fustella grande);

- Altezza di caduta del pestello: 457 mm;
- Peso del pestello: 4,535 Kg;
- Numero di strati: 5;
- Energia di compattazione: 269 N/cm^2

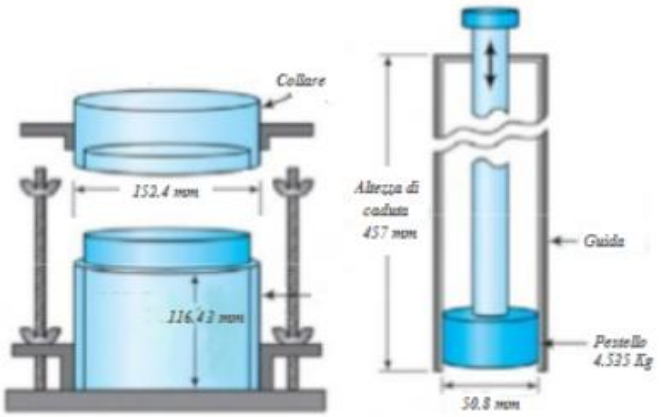


Figura 5.9 - Schema prova Proctor modificata - Metodo B (Orabi, 2014)

Gli strati da compattare nella Proctor modificata sono cinque e il numero di cadute da applicare è sempre 25 per il Metodo A e 56 per il Metodo B, seguendo per altro le stesse sequenze, ma aumenterà l'energia per unità di volume che viene fornita al terreno rispetto a quanto avviene nella prova standard.

Le sequenze con le quali viene lasciato cadere sul terreno il pestello, come preannunciato, differiscono passando dal metodo a fustella piccola a quello a fustella grande ma restano le medesime, invece, per tutte e due le tipologie di prove. Per la fustella più piccola la sequenza è rappresentata in *Figura 5.10:*

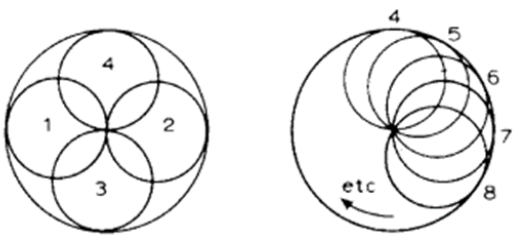


Figura 5.10 - Sequenza colpi pestello - fustella piccola (ASTM, 2007)

Invece per la fustella di dimensioni più grandi la sequenza dei colpi con cui è costipato ogni singolo strato delle due tipologie di prove Proctor è rappresentata in quest'altra *Figura 5.11:*

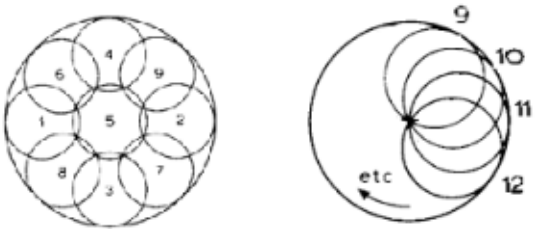


Figura 5.11 - Sequenza colpi pestello - fustella grande (ASTM, 2007)

L'energia di compattazione per unità di volume, come già è stato accennato, è funzione, in questa prova, del peso del pestello, del numero degli strati con i quali il terreno è sistemato nella fustella, del numero di colpi dalla caduta del pestello, dall'altezza stessa dalla quale è lasciato cadere e, infine, dal volume della fustella. Utilizzando le due diverse fustelle l'energia di costipazione per unità di volume non cambia perché il maggiore numero di colpi eseguiti nella prova con la fustella maggiore in volume vengono proprio compensati dalla maggiore capacità volumetrica.
Si hanno differenti quantitativi di energia effettuando però una prova Proctor standard piuttosto che una modificata, dove l'energia costipativa applicata al terreno è maggiore. La relazione tramite la quale viene quantificata l'energia di costipamento per unità di volume è:

$$E = \frac{P_{p \cdot h_c \cdot n_s \cdot n_{\frac{c}{s}}}}{V_f} \quad [\frac{N \cdot cm}{cm^3}]$$

Con: $E = Energia\ di\ costipamento\ per\ unità\ di\ volume$; $P_p = Peso\ del\ pestello$;
$h_c = Altezza\ di\ caduta\ del\ pestello$; $n_s = Numero\ di\ strati$;
$n_{\frac{c}{s}} = Numero\ di\ colpi\ per\ strato$; $n_{\frac{c}{s}} = Numero\ di\ colpi\ per\ strato$;
$V_f = Volume\ fustella.$

La forma della curva di costipamento varia con la tipologia di terreno (*Figura 5.12*):

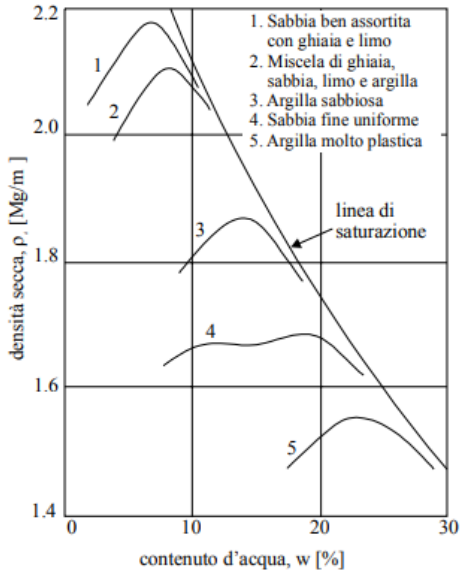


Figura 5.12 - Curve prova Proctor per diversi terreni ottenute con uguale energia di costipamento (Baglieri, 2016)

La variazione di contenuto d'acqua influenza la densità secca maggiormente in alcuni tipi di terreni, come le sabbie eterogenee ben assortite, per le quali, anche con piccole variazioni di contenuto d'acqua, si possono avere notevoli variazioni in densità e le percentuali di optimum in contenuto d'acqua con le quali si arriva alle densità massime sono basse.

Invece per le sabbie uniformi la curva di costipazione rimane molto appiattita e i valori di densità secca raggiunti sono inferiori rispetto a quelli di suoli con curve granulometriche più ampie. Al contrario però si ha un più ampio margine di contenuti d'acqua per i quali si ottengono valori di densità secca prossimi a quello ottimale.

Per quanto riguarda i terreni a grana fine si osserva che il contenuto d'acqua ottimale necessario per raggiungere il maximum è piuttosto elevato in quanto si tratta di terreni dotati di coesione, ma i valori di densità secca raggiunti sono molto più bassi rispetto ai suoli più sabbiosi e questo comportamento viene inoltre acutizzato all'aumentare della plasticità. In più per terreni prevalentemente fini argillosi la forma della campana risulta marcatamente pronunciata e questo significa che la compattazione è difficoltosa per contenuti in acqua lontani da quello ottimale, specie se in eccesso.

La procedura consiste innanzitutto nell'essiccare a 50 °C il terreno e poi passarlo ai setacci come è stato indicato in precedenza.
Dopodiché preparare 15 Kg o 36 Kg rispettivamente se si deve eseguire una prova su stampo piccolo oppure grande e preparare i cinque campioni necessari alla prova umidificandoli con contenuti di acqua variabili tra loro di circa il 2%.

La fase operativa si articola, per ognuno dei campioni preparati con differenti di contenuti di acqua, nelle seguenti fasi:

i. Il terreno bagnato viene disposto secondo uno strato all'interno della fustella (occuperà all'incirca un terzo dell'altezza nella prova standard e circa un quinto nella modificata);

ii. Lasciando cadere il pestello viene applicato il numero di colpi prestabilito seguendo la sequenza suggerita dalle norme;

iii. L'operazione viene ripetuta per tre strati nella prova standard mentre per cinque in quella modificata, cercando il più possibile di formarli con altezze simili. L'ultimo strato dovrebbe finire poco sopra l'attaccatura della fustella al collare;

iv. Infine, il collare viene rimosso, livellato il terreno al bordo della fustella, pesato il contenuto e prelevata una porzione di terreno per calcolarne il contenuto di acqua

v. Viene calcolata, con la seguente relazione, la densità secca (γ_d) raggiunta al termine della prova in seguito alla conoscenza del volume della fustella (V), del peso del terreno al suo interno (P) e del contenuto d'acqua (w):

$$\gamma = \frac{P}{V} = \frac{P_s + P_w}{V} = \frac{P_s}{V} + \frac{P_w}{V} \cdot \frac{P_s}{P_s} = \gamma_d + w \cdot \gamma_d = \gamma_d(1 + w)$$

Da cui si ricava infine: $\gamma_d = \frac{\gamma}{1+w}$

Con P_s il peso dei grani di terreno, con P_w il peso dell'acqua e γ la densità umida.

5.1.5.1 Applicazione della prova Proctor al caso studio

Come spiegato all'inizio di questo capitolo tra gli obiettivi principali di questa ricerca ci sono proprio quelli di comprendere se il terreno condizionato oggetto di studio potesse essere inizialmente abbancato una volta uscito dal cantiere e successivamente reimpiegato per la realizzazione di rilevati.

Appunto per questo motivo si è deciso di inserire tra le prove da eseguire la prova Proctor, che è quella a cui si fa riferimento più diffusamente per lo studio della costipazione dei terreni in quanto riesce a fornirne una valutazione facile ed accurata. Infatti, la capacità ad essere costipato adeguatamente è fondamentale per un terreno che si voglia impiegare in costruzioni come i rilevati e pertanto è stato ritenuto indispensabile conoscerla sui terreni condizionati e si è andato a valutarne la sua evoluzione nei giorni che seguono il condizionamento.

È stata costruita per il terreno naturale non condizionato la curva a campana Proctor secondo le modalità e procedure descritte in precedenza trovando i valori del contenuto ottimale di acqua per il quale è massima la densità secca del materiale.

Al contrario, per i terreni condizionati non è stata costruita la curva trovando i relativi valori di densità secca massima e optimum di contenuto d'acqua perché questo avrebbe comportato di modificare la percentuale del contenuto in acqua presentato nei momenti di svolgimento della prova che è invece un parametro da cui dipendono significativamente le caratteristiche dei terreni condizionati le quali sono rappresentative del grado di recupero delle condizioni iniziali.

L'aumento o la riduzione della percentuale di acqua contenuta varierebbe la risposta del terreno alla prova, che quindi non sarebbe più direttamente correlata all'effettiva capacità di costipazione avuta dopo un certo tempo di maturazione post condizionamento.

Per non interferire con il naturale processo di recupero che interessa il materiale condizionato lasciato a riposo, si è deciso di effettuare la prova misurando la densità del secco ottenuta semplicemente per un valore di contenuto in acqua, ovvero quello posseduto ai giorni di svolgimento della prova stessa.

I risultati ricavati in termini di densità secca possono essere correlati con i rispettivi valori calcolati con la curva Proctor sul terreno naturale. È evidenziata in questa maniera, allo stesso quantitativo di contenuto d'acqua, quale è la densità secca raggiunta con il materiale condizionato in confronto di quella raggiungibile in principio con il terreno naturale, fornendo un riscontro evidente sulle capacità di costipazione riottenute dal terreno.

Si capisce in questo modo se, dopo un certo tempo, il terreno condizionato fosse pronto o meno all'utilizzo per rilevati, esattamente come ricercato con questa campagna di prove.

5.2 Caratterizzazione del terreno studiato

Le prove sono state svolte sui terreni consegnati presso il "Laboratorio Gallerie ed Opere in Sotterraneo" del Politecnico di Torino provenienti da una cava nei pressi del tracciato della galleria, appartenente alla stessa formazione geologica da studiare.

Anche i terreni usati per gli studi di condizionamento già eseguiti erano stati prelevati dalla stessa cava presentando analoghe caratteristiche.

5.2.1 Parametri di condizionamento ottimali

La campagna di prove effettuata per questo caso studio si è svolta conoscendo già quali fossero i parametri di condizionamento definiti come ottimali per ognuno dei cinque differenti tipi di condizionanti usati.

Questi parametri sono stati stabiliti a seguito di una antecedente sperimentazione, prettamente indirizzata a questo scopo, compiuta sempre all'interno del "Laboratorio di Gallerie e Opere in Sotterraneo" del Politecnico di Torino.

Di seguito in *Tabella* 5.1 vengono riportati i valori di tali parametri inerenti ad ognuno dei prodotti condizionanti usati in questo studio e che saranno poi impiegati per tutte le prove riguardanti il presente elaborato:

Nome Prodotto	w_{tot} (%)	c (%)	FER (-)	FIR (%)
Prodotto A	11	1,1	20	30
Prodotto B	11	1,0	20	30
Prodotto C	11	2,0	14	20

Prodotto C+D	w_{tot} (%)	c (%)	FER (-)	FIR (%)	γ_{slurry} (g/cm³)	SIR (%)
	11	2,0	14	20	1,15	15
Prodotto C+E	w_{tot} (%)	c (%)	FER (-)	FIR (%)	c_{slurry} (%)	SIR (%)
	11	2,0	14	20	4	10

Tabella 5.1 - Parametri ottimali del condizionamento

5.2.2 Caratterizzazione della granulometria

Il terreno studiato in questa campagna di prove viene suddiviso, alla stessa maniera di come era stato fatto durante lo studio del suo condizionamento, in due tipologie: una epurata della frazione trattenuta al setaccio da 20 mm e che verrà indicata in questo elaborato come "*Tagliato ai 20 mm*", e un'altra che invece contiene tutte le sue frazioni granulometriche e che viene qui indicata come "*Grossolano*". Un esempio visivo delle due tipologie di terreno è fornito nella *Figura 5.13*:

Figura 5.13 - Esempio delle due tipologie di terreno: "Terreno tagliato ai 20 mm" (a); terreno "Grossolano" (b)

Si mostrano in *Figura 5.14* le curve granulometriche relative alle due tipologie di terreno, che sono state ricavate prima dell'esecuzione del presente studio sullo stesso campione ricevuto poi in laboratorio e sul quale è stata poi condotta la ricerca:

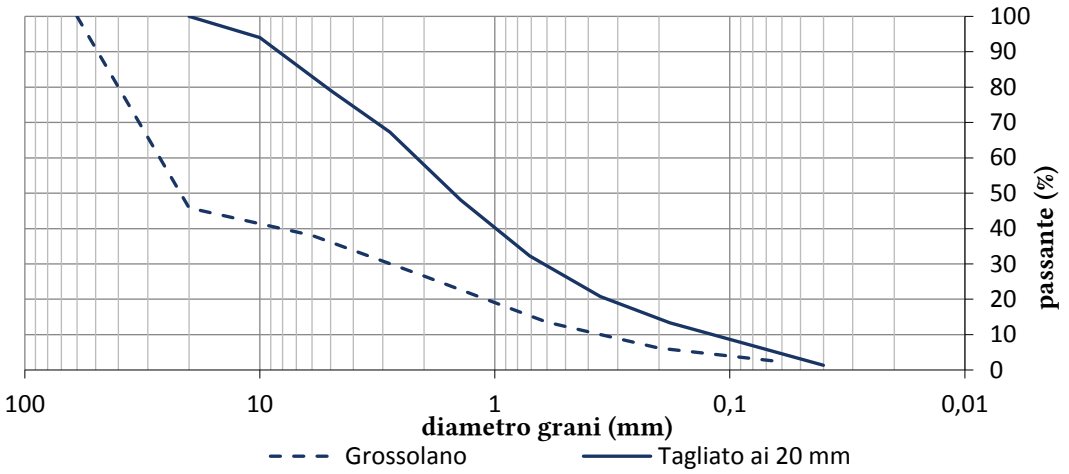


Figura 5.14 - Curve granulometriche dei materiali studiati

Si può osservare come la percentuale trattenuta ai 20 mm per il terreno denominato "*Grossolano*" sia una componente consistente e addirittura prevalente in quanto ammonta al 55 % sul totale complessivo del terreno. Per questa sua particolare granulometria la tipologia di terreno "*Grossolano*" è stata sottoposta solamente alla prova con miscelatore torsionale, la quale permette di valutare comunque con attendibilità le caratteristiche presentate da terreni con frazioni granulometriche di grandi dimensioni.

Queste curve ottenute sul campione consegnato in laboratorio per questo studio sono del tutto analoghe a quelle ricavate in precedenza per i terreni sui quali era stato valutato il condizionamento, fornendo quindi una ulteriore garanzia sull'utilizzo per queste prove dei parametri di condizionamento ricavati da quella ricerca.

5.2.3 Valutazione dei contenuti d'acqua naturale

Il terreno è arrivato in laboratorio sigillato in sacchi di plastica in modo da cercare di non alterarne drasticamente con il trasporto l'umidità naturale posseduta in sito al

momento della prelevazione. Il lotto è stato consegnato in 9 bancali (5 di terreno "*Tagliato ai 20 mm*" e 4 di terreno "*Grossolano*"), sui quali erano disposti i sacchi contenenti 20 Kg di terreno ciascuno per un totale di circa 2000 Kg.

Al fine di verificare il contenuto d'acqua (*w*) dei terreni oggetto di studio consegnati presso il laboratorio, è stato prelevato un piccolo campione da ciascun bancale, raccogliendo quindi 9 campioni di cui 5 di terreno "Tagliato ai 20 mm" e 4 appartenenti al materiale "Grossolano".

La prova è stata effettuata secondo la norma (*ASTM, 2010*), i campioni selezionati sono stati lasciati in forno per 24h a 110 °C e tramite la variazione del peso in seguito all'essiccazione, si sono misurati i contenuti d'acqua, espressi in percentuale del peso del campione, riportati in *Tabella 5.2*:

Tagliato ai 20 mm		**Grossolano**	
Campione	w (% in peso)	Campione	w (% in peso)
1	4.8	1	3.3
2	6.1	2	2.9
3	5.4	3	3.5
4	6.2	4	3.1
5	3.5		
Media	**5.2**	**Media**	**3.2**

Tabella 5.2 - Contenuti di acqua naturale dei terreni oggetti di studio

Il terreno naturale è stato lasciato chiuso negli stessi sacchi in plastica nei quali è arrivato, conservandolo in laboratorio alla temperatura media di 20 °C e non ha subito operazioni di rimaneggiamento fino al suo utilizzo per essere condizionato, in modo che i valori dei contenuti di acqua non subissero importanti variazioni.

I valori medi del contenuto d'acqua naturale (w_n) ottenuti vengono così presi come base per il calcolo della quantità d'acqua da aggiungere in fase di condizionamento dei terreni, su cui eseguire le prove, per portarli al contenuto d'acqua totale stabilito per ciascun agente condizionante in *Tabella 5.1* al *Paragrafo 5.2.1.*

5.2.4 Procedura delle operazioni di condizionamento

Per le prove da svolgere c'è la necessità di disporre di certe quantità di terreno condizionato, pertanto per ognuna di esse si sono dovuti produrre differenti campioni di materiale sottoposto a condizionamento con ciascun tipo di agente condizionante oggetto dello studio.

La procedura delle operazioni seguita nella fase di condizionamento dei campioni di terreno è descritta come segue:

i. Si prepara la betoniera per miscelare il materiale che va preventivamente inumidita per evitare che sulla sua superficie si trattenga parte dell'acqua destinata al condizionamento;

ii. Viene versato nella betoniera un quantitativo di terreno naturale noto in peso, per cui in tal caso si è fatto riferimento ai sacchi nel quale il materiale era disposto al momento di arrivo in laboratorio.

Si è usato un singolo sacco di materiale, corrispondente quindi a 20 Kg, nel caso dei condizionamenti per le prove di slump, di taglio diretto, scissometrica e Proctor. Invece, per quanto riguarda il miscelatore torsionale si è proceduto a condizionare due sacchi di terreno alla volta (40 Kg), date le maggiori quantità di materiale necessario per svolgere questa prova;

iii. Si aggiunge, in base al peso del campione, il quantitativo di acqua (w_{add}) necessario, oltre quella naturale (w_n), per portare il terreno alla percentuale di contenuto d'acqua totale (w_{tot}) definito dal condizionamento. Quindi si attiva la betoniera per omogeneizzare l'impasto;

iv. Si genera la schiuma attraverso lo strumento riportato al *Paragrafo* 4.2.2, il quale consente il controllo indipendente del flusso d'acqua e del flusso di aria e, inoltre, è possibile regolare manualmente la concentrazione del tensioattivo desiderata. Impostati i parametri di funzionamento si attiva il sistema, si aspetta qualche minuto per la produzione della schiuma ed eccetto modeste fluttuazioni, può essere prodotta schiuma con un *FER* definito a priori.

In ogni caso, prima di aggiungerla al terreno, si raccoglie un campione di questa riempiendo un contenitore dalla tara e volume già noti, e dunque si pesa con una bilancia. Viene calcolato il *FER*, ricordando la sua correlazione inversa con la densità della schiuma, come:

$$FER = \frac{V_{contenitore}}{P_{totale} - P_{contenitore}}$$

Questa operazione serve a verificare che effettivamente la schiuma generata è caratterizzata dal *FER* desiderato;

v. Dal valore del *FIR* prefissato con cui eseguire il condizionamento, si calcola il peso di schiuma necessario corrispondente alla quantità di terreno da condizionare. Quindi, con un contenitore di peso noto, si prende la schiuma prodotta dal generatore e si pesa il tutto andando a separare il corretto quantitativo in peso di schiuma precedentemente stabilito.
Infine, lo si versa nella betoniera dove avviene la miscelazione con il terreno fino a produrre un materiale uniforme che abbia assorbito tutta la schiuma immessa. Nel caso dei condizionamenti con aggiunta di bentonite e polimero, prima si preparano i relativi slurry, rispettivamente con il peso specifico e la concentrazione designati, poi nelle quantità definite dal *SIR* lo si aggiunge nella betoniera al terreno assieme alla schiuma e si procede a miscelare;

vi. Il materiale condizionato è estratto dalla betoniera e per prima cosa viene valutato attraverso una prova di slump per accertarsi che il comportamento corrisponda a quello mostrato in fase di determinazione del condizionamento. Riscontrando ciò si dimostra la corretta esecuzione delle operazioni e pertanto il materiale prodotto è utilizzabile per le prove programmate;

vii. Per ultimo il terreno condizionato è riposto in appositi contenitori per quanto riguarda quello destinato alle prove di slump, di taglio diretto, scissometrica e Proctor, mentre il terreno riservato alla prova del miscelatore torsionale viene direttamente sversato all'interno del serbatoio dello strumento.

5.2.5 Metodologia di conservazione del terreno condizionato

Siccome l'obiettivo del presente studio è quello di valutare l'evoluzione nel tempo dei parametri geomeccanici dei terreni condizionati, è importante definire una metodologia di conservazione per i campioni di materiale condizionato sui quali eseguire le prove ai tempi di maturazione designati.

Dunque, per le prove di slump, di taglio diretto, scissometrica e Proctor il terreno dopo il condizionamento è stato sistemato in recipienti aperti di dimensione 23cm*33cm in strati di spessore 20 cm e lasciati riposare in laboratorio alla temperatura ambientale media di circa 20°.

In questa maniera si è creata una situazione standard nel tempo per tutti i campioni soggetti ai diversi condizionamenti e destinati alle diverse prove da eseguire in modo da consentire che il degrado ai cui sono soggetti i diversi agenti tensioattivi utilizzati e la progressiva diminuzione del contenuto d'acqua avvenga in maniera il quanto più possibile indisturbata e naturale.

Nella *Figura 5.15* seguente è mostrato come esempio uno dei recipienti contenenti terreno condizionato nei quali è stato collocato e lasciato a "riposo".

Figura 5.15 – Modalità di conservazione dei campioni di terreno

Il terreno condizionato nelle fasi di conservazione non è stato soggetto ad alcuna azione meccanica di rimescolamento, fatta eccezione per l'omogeneizzazione eseguita immediatamente prima dell'esecuzione delle prove.

Tali operazioni meccaniche sul terreno potrebbero velocizzare la perdita del contenuto d'acqua e la degradazione dei condizionanti apportando di conseguenza una modifica al comportamento presentato dal terreno favorendo il recupero delle proprietà

meccaniche possedute antecedentemente all'applicazione del condizionamento, ma creando situazioni che andrebbero ad influenzare significativamente i risultati ricercati con questo studio.

5.3 Risultati prove di Slump

Le prove di slump sono state eseguite ai fini descritti al *Paragrafo 5.1.1.1* , utilizzando l'attrezzatura mostrata in *Figura 5.16* presente nel "Laboratorio di Gallerie ed Opere in sotterraneo" del Politecnico di Torino, con le medesime procedure e modalità indicate al *Paragrafo 4.3.1*.

Figura 5.16 - Attrezzatura utilizzata per la prova di slump

Sono stati valutati campioni di terreno condizionati con ognuno dei diversi tipi di agenti condizionanti, esclusivamente sul terreno "*Tagliato ai 20 mm*" ad intervalli di tempo predeterminati ovvero: 0, 1, 3, 7 e 28 giorni a partire dal giorno in cui è avvenuto il condizionamento.

Le prove al giorno zero sono avvenute subito dopo la produzione del materiale condizionato, mentre per le prove ai giorni successivi si sono utilizzati i campioni di terreno condizionato conservati in laboratorio come descritto al *Paragrafo 5.2.5.*

Attraverso questa prova non si è determinata nessuna caratteristica geomeccanica ma si è voluto valutare visivamente l'evolversi nel tempo della consistenza del materiale condizionato comparandola con quella mostrata dal terreno naturale.

Di seguito vengono riportati i risultati ottenuti per i diversi tipi di agenti condizionanti:

Prodotto A			
Foto	**Commenti**	**Slump (cm)**	**Giorno**
	Al giorno zero presenta le caratteristiche tipiche di un terreno ben condizionato	14	0
	Dopo un giorno acquista rigidezza e si nota una diminuzione del contenuto di acqua. Conserva tuttavia una certa plasticità	8	1
	A tre giorni si nota una perdita totale di consistenza pastosa e il comportamento è prettamente rigido. Si conserva una certa compattezza	Non determinabile	3
	Dopo sette giorni il terreno mostra una consistente perdita del contenuto di acqua e delle caratteristiche coesive	Non determinabile	7
	A ventotto giorni il materiale è praticamente del tutto incoerente e visivamente appare molto simile al terreno naturale	Non determinabile	28

Tabella 5.3 - *Risultati prove di slump Prodotto: A*

Prodotto B			
Foto	**Commenti**	**Slump (cm)**	**Giorno**
	Al giorno zero si denotano il comportamento e le caratteristiche di un buon condizionamento	15	0
	A un giorno il materiale assume una consistenza più rigida denotando tuttavia plasticità e comportamento coeso	8	1
	A tre giorni non si riscontra consistenza pastosa e il comportamento è molto rigido. Rimane ancora compatto	Non determinabile	3
	A sette giorni il materiale risulta disgregato con comportamento tendenzialmente incoerente	Non determinabile	7
	Dopo ventotto giorni il materiale è praticamente del tutto incoerente. Molto simile al terreno naturale	Non determinabile	28

Tabella 5.4 - Risultati prove di slump Prodotto: B

Prodotto C			
Foto	**Commenti**	**Slump (cm)**	**Giorno**
	Al giorno zero si denota una buona consistenza pastosa tipica di un condizionamento ben riuscito	11	0
	In un giorno il materiale assume già una consistenza piuttosto rigida presentando inoltre una evidente compattezza	6	1
	A tre giorni il terreno ha perso la consistenza pastosa. Molto rigido e possiede ancora buona compattezza	Non determinabile	3
	A sette giorni il materiale si disgrega e ha perso gran parte del suo comportamento coeso	Non determinabile	7
	A ventotto giorni il terreno si mostra del tutto incoerente. Consistenza molto simile al terreno naturale	Non determinabile	28

Tabella 5.5 - Risultati prove di slump: Prodotto: C

Prodotto C+D			
Foto	**Commenti**	**Slump (cm)**	**Giorno**
	Al giorno zero si nota una buona consistenza pastosa e un buon comportamento plastico	11	0
	In un giorno il materiale irrigidisce ma conserva tuttavia una evidente consistenza pastosa e compatta	8	1
	Dopo tre giorni il terreno nonostante la rigidezza acquisita presenta ancora una consistenza piuttosto pastosa e coesa	3	3
	A sette giorni si denota la perdita di pastosità. Conserva tuttavia un buon contenuto d'acqua e una discreta compattezza	Non determinabile	7
	A 28 giorni persiste un comportamento coeso e si trattiene ancora una discreta umidità. Non appare sciolto come il terreno naturale	Non determinabile	28

Tabella 5.6 - Risultati prove di slump: Prodotto: C+D

Prodotto C+E			
Foto	**Commenti**	**Slump (cm)**	**Giorno**
	Al giorno zero la pastosità è buona così come il comportamento plastico	9	0
	Dopo un giorno il materiale è irrigidito ma permane sia la consistenza pastosa sia il comportamento plastico	9	1
	Dopo tre giorni il terreno acquisisce una ulteriore rigidezza ma presenta tuttavia una consistenza piuttosto pastosa e coesiva	5	3
	Dopo sette giorni si riscontra la perdita di una consistenza pastosa. Si conserva invece una buona umidità e una discreta	Non determinabile	7
	A 28 giorni si perde gran parte della compattezza ma appare ancora discretamente umido. Non ha la stessa incoerenza del	Non determinabile	28

Tabella 5.7 - Risultati prove di slump Prodotto: C+E

A scopo riassuntivo, per poter confrontare più direttamente i risultati ai vari giorni per i differenti agenti condizionanti e per fornire una chiara comparazione rispetto al terreno naturale nel momento in cui è arrivato in laboratorio, quindi con un contenuto d'acqua medio valutato al 5,2%, è stata creata la *Tabella 5.8* riportata in seguito:

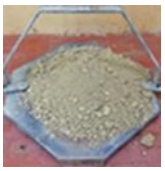
PRODOTTO A					
0 Giorni	1 Giorno	3 Giorni	7 Giorni	28 Giorni	Naturale
PRODOTTO B					
0 Giorni	1 Giorno	3 Giorni	7 Giorni	28 Giorni	Naturale
PRODOTTO C					
0 Giorni	1 Giorno	3 Giorni	7 Giorni	28 Giorni	Naturale
					
PRODOTTO C+D					
0 Giorni	1 Giorno	3 Giorni	7 Giorni	28 Giorni	Naturale
PRODOTTO C+E					
0 Giorni	1 Giorno	3 Giorni	7 Giorni	28 Giorni	Naturale

Tabella 5.8 - Comparazione tra i risultati delle prove di slump

5.3.1 Commenti sui risultati delle prove di slump

L'utilizzo del solo tensioattivo quale agente condizionante, ugualmente per tutti e tre i diversi prodotti usati, fornisce un materiale pastoso solo fino ad un giorno di riposo dopo il condizionamento, mentre nei giorni successivi il terreno diventa progressivamente più rigido e tende a perdere il comportamento coeso disaggregandosi, come era peraltro da attendersi e come chiaramente viene documentato attraverso le fotografie delle tabelle precedentemente riportate.

Alla stessa maniera sempre per tutti e tre i diversi prodotti tensioattivi, a 28 giorni il materiale appare visivamente privo di una compattezza apprezzabile con totale assenza di comportamento plastico e si nota una consistente diminuzione nel contenuto di acqua rispetto alle condizioni iniziali post condizionamento, pertanto presenta una notevole somiglianza nel suo aspetto e nel suo comportamento complessivo al terreno naturale.

Per i condizionamenti con i Prodotti C+D e i Prodotti C+E, rispettivamente un agente tensioattivo con aggiunta di filler bentonitico e sempre un tensioattivo ma con aggiunta di un polimero, si denota che mantengono entrambi una pastosità del terreno fino a 3 giorni dal condizionamento. Anche in questi casi nei giorni successivi il materiale irrigidisce e diminuisce in quanto a compattezza e plasticità.

Però ai ventotto giorni dal condizionamento il terreno nonostante sia prevalentemente disgregato evidenzia ancora consistenza coesa e una umidità trattenuta non trascurabile, specialmente per quanto riguarda il materiale condizionato con i Prodotti C+D.
Questa situazione in cui il terreno mantiene più a lungo umidità e compattezza è molto probabilmente imputabile all'aggiunta di materiale estremamente fino come lo è il filler bentonitico.

Per cui, il comportamento generale del materiale non si manifesta granulare sciolto e con consistenza del tutto incoerente come invece si ha per il terreno allo stato naturale prima di essere condizionato.

5.4 Risultati prove con il miscelatore torsionale

Queste prove sono state realizzate con una attrezzatura sperimentale di nuova concezione a disposizione presso il "Laboratorio di Gallerie e Opere in Sotterraneo" del Politecnico di Torino la quale è stata già dettagliatamente presentata al *Paragrafo 5.1.2.* e ne viene qui di seguito mostrata anche una immagine.

Figura 5.17 - Immagine del miscelatore torsionale a disposizione presso il "Laboratorio di Gallerie e Opere in sotterrraneo" del Politecnico di Torino

Il terreno indagato è stato il "*Tagliato ai 20 mm*" per quanto riguarda i condizionamenti con i Prodotti A, B e C, mentre per quanto riguarda i condizionamenti con i Prodotti C+D e i Prodotti C+E il terreno sottoposto a questo test è quello "*Grossolano*".

La prova è stata eseguita, per ciascun condizionamento, a 0 giorni, 1 giorno, 2 giorni, 3 giorni e 7 giorni mantenendo il terreno sempre all'interno del serbatoio e senza eseguire miscelazioni ulteriori oltre a quella imposta dallo svolgimento della prova.

Per quanto riguarda invece le modalità di conduzione della prova e gli obiettivi ad essa preposti ci si attiene a quanto è stato discusso nel *Paragrafo 5.1.2.1*.

Il serbatoio non è stato riempito completamente ma, per tutte le prove eseguite sia sul terreno condizionato sia sul terreno naturale, è stato fissato un livello standard di

riempimento al pari della terza fila di coppie di lame come riportato a titolo di esempio esplicativo in *Figura 5.18* dove viene mostrato l'interno del serbatoio sia vuoto e sia riempito fino al livello prestabilito durante lo svolgimento delle prove con terreno naturale "*Grossolano*" e condizionato "*Tagliato ai 20 mm*":

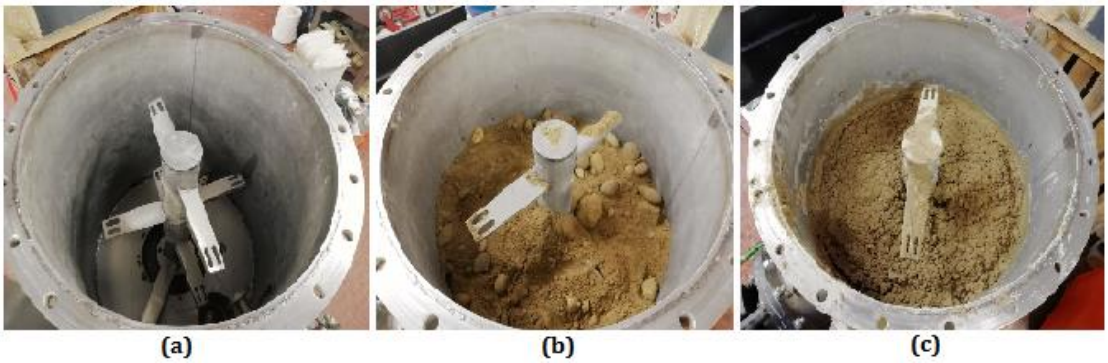


Figura 5.18 - Esempio del miscelatore torsionale prima dell'esecuzione della prova (a), durante l'esecuzione della prova con terreno "Grossolano" naturale (b), durante l'esecuzione della prova con terreno "Tagliato a 20 mm" condizionato (c)

Durante le prove viene misurata, in un intervallo di tempo di 300 secondi, la coppia netta che risulta essere epurata dal valore di coppia a vuoto che viene registrata ogni volta prima di iniziare a riempire il serbatoio con il terreno.

La coppia netta è quella necessaria a mantenere in rotazione l'albero con le lame, ricoperte dal terreno, alla velocità di 20 giri/min. Quindi è intuitivo che questo parametro è direttamente riconducibile alla resistenza a taglio caratteristica propria del terreno contenuto, anche se non sono disponibili al momento correlazioni consolidate tra queste proprietà.

Di conseguenza la valenza della prova è applicabile solo a fini comparativi tra i valori registrati ai diversi giorni sui campioni di terreno condizionato e il terreno allo stato naturale.

Chiaramente è stato effettuato un raffronto diretto tra le stesse tipologie di terreno, cioè il materiale condizionato con i Prodotti A, B e C è stato confrontato con il corrispettivo terreno naturale e ugualmente il terreno "Grossolano" condizionato con

i Prodotti C+D e C+E è stato confrontato con il terreno naturale avente la stessa granulometria.

Questo perché intuitivamente le due tipologie di terreno indagate presentano caratteristiche completamenti differenti di cui gran parte dovute alla dimensione degli elementi di cui sono costituite e quindi non si ricaverebbero dati significativi e rappresentativi sulle condizioni del terreno raffrontando tra di loro materiale condizionato appartenente ad una tipologia e terreno naturale all'altra.

I risultati consistono fondamentalmente nella raccolta delle misure della coppia torcente della quale se ne ricostruisce poi l'andamento di come varia all'interno dell'intervallo di acquisizione di 300 secondi. Di queste misure di coppia se ne ricava la media che viene assunta come riferimento per valutare il comportamento del materiale.

Questo perché i valori oscillano molto frequentemente nella finestra di acquisizione, e, inoltre, durante l'esecuzione della prova all'interno del periodo di misura stesso si denota un trend di crescita nei valori di coppia registrati probabilmente dovuto all'effetto di riduzione dei vuoti con conseguente addensamento del terreno contenuto nel serbatoio che viene indotto dal movimento rotatorio delle pale.

Quindi scegliere il valore massimo registrato nei 5 minuti di acquisizione, oppure quello raggiunto alla fine di questi significherebbe considerare effetti non correlati direttamente alle caratteristiche del materiale e a come il condizionamento ed il suo evolversi nel tempo influiscano su di esse.

Il valore medio costituisce infine la scelta più semplice e quella che raccoglie le informazioni in modo più corretto e completo.

Eseguendo le prove sul materiale condizionato a giorni successivi è possibile apprezzarne come le coppie registrate e il conseguente valore medio si modifichino al passare del tempo fornendo così informazioni sull'evoluzione del comportamento del terreno in seguito al condizionamento.

Infine, per attribuire al terreno condizionato una rapida indicazione sul suo stato di recupero delle condizioni iniziali ne viene relazionato il valore medio della coppia torcente, calcolato nei diversi giorni, con lo stesso valore medio di coppia misurato però sul materiale al naturale con il contenuto in acqua del 11%, corrispondente allo stesso raggiunto con il condizionamento subito dopo la sua applicazione.

Si mostrano di seguito i risultati ottenuti partendo da quelli che hanno riguardato l'impiego del terreno "*Tagliato ai 20 mm*" di cui si riportano in ordine prima il test condotto sul terreno naturale in precedenza al condizionamento ma portato ad una umidità dell'11% e poi a seguire quelli condotti sul terreno condizionato con i Prodotti A, B e C ai diversi giorni.

- **Terreno naturale "Tagliato ai 20 mm"**

Coppia media (Nm)	23,70

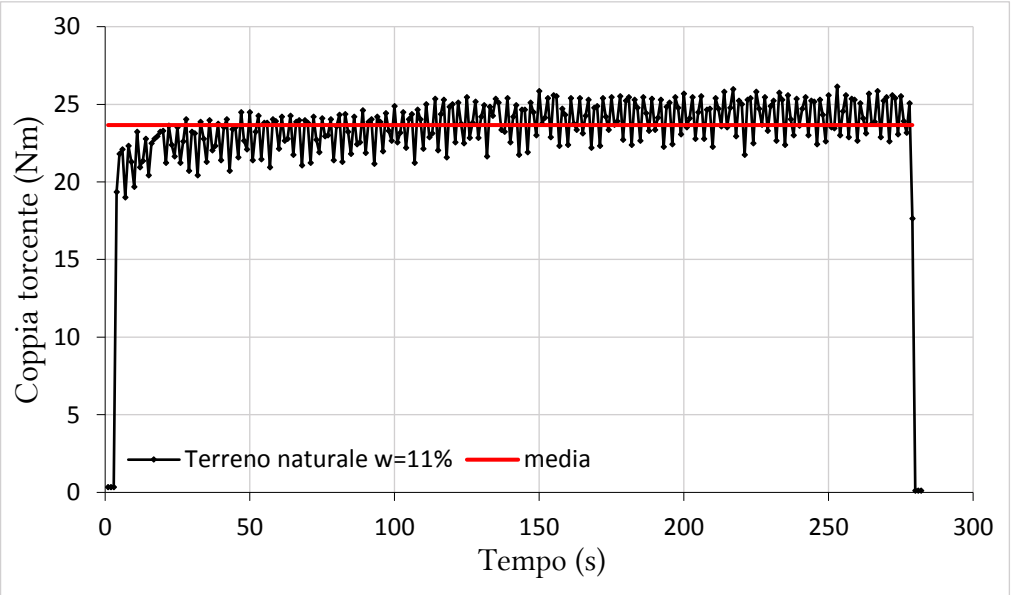


Figura 5.19 - Risultati miscelatore torsionale: Terreno naturale " Tagliato ai 20 mm"

- **Prodotto A**

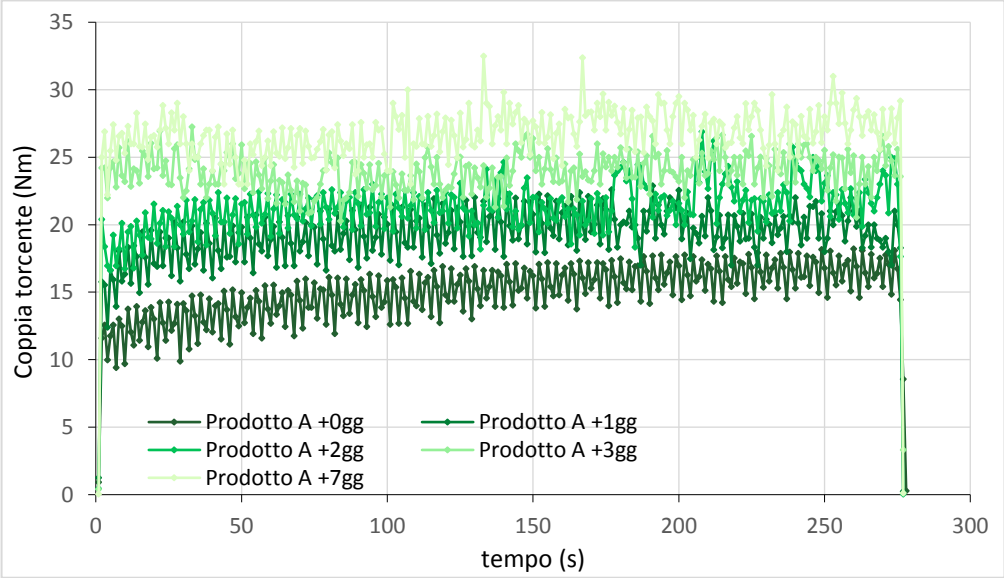


Figura 5.20 - Risultati prove miscelatore torsionale: Prodotto A

Giorni	0	1	2	3	7
Coppia media (Nm)	15,18	19,44	21,40	24,05	26,78

Tabella 5.9 - Risultati miscelatore torsionale: Prodotto A

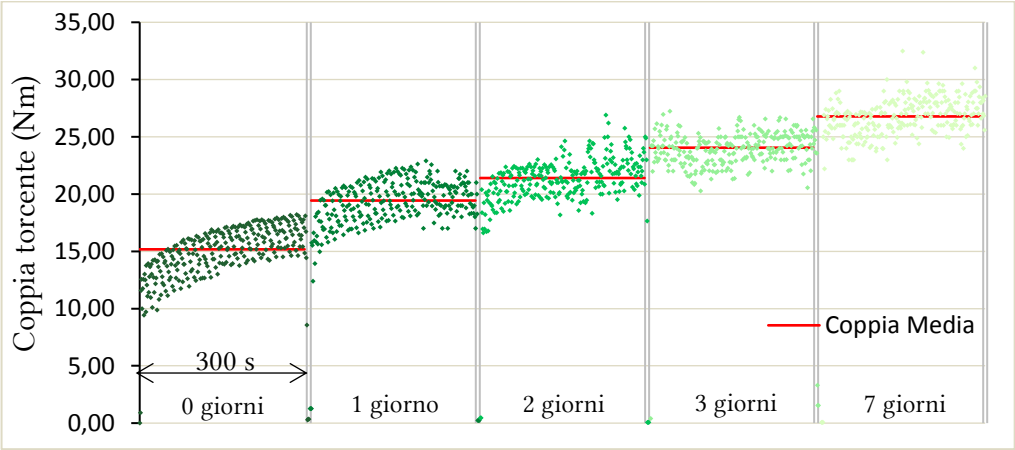


Figura 5.21 - Confronto tra i risultati del miscelatore torsionale ai vari giorni: Prodotto A

- **Prodotto B**

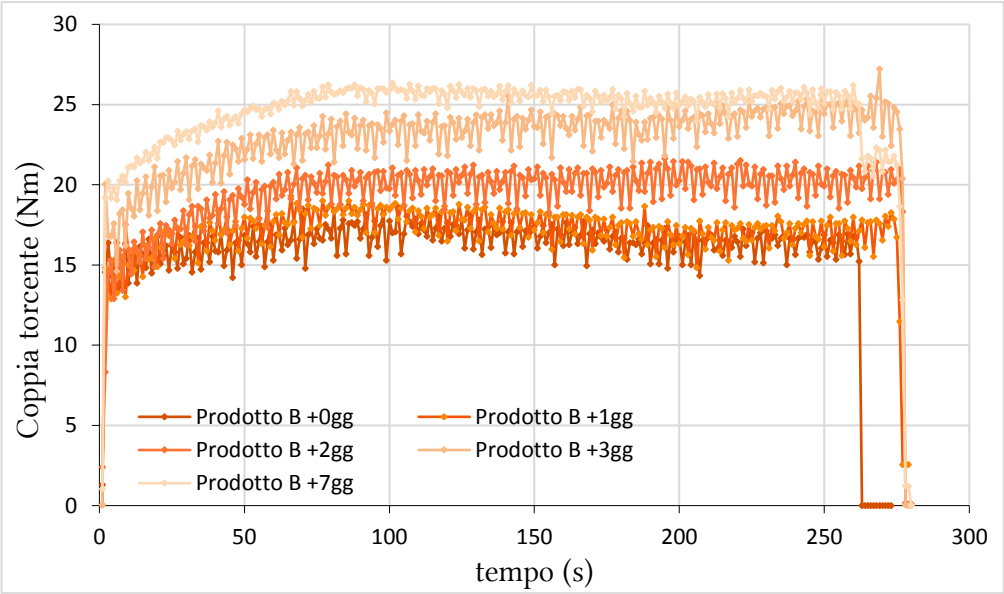


Figura 5.22 - Risultati prove miscelatore torsionale: Prodotto B

Giorni	0	1	2	3	7
Coppia media (Nm)	16,42	17,25	19,12	21,89	24,61

Tabella 5.10 - Risultati miscelatore torsionale: Prodotto B

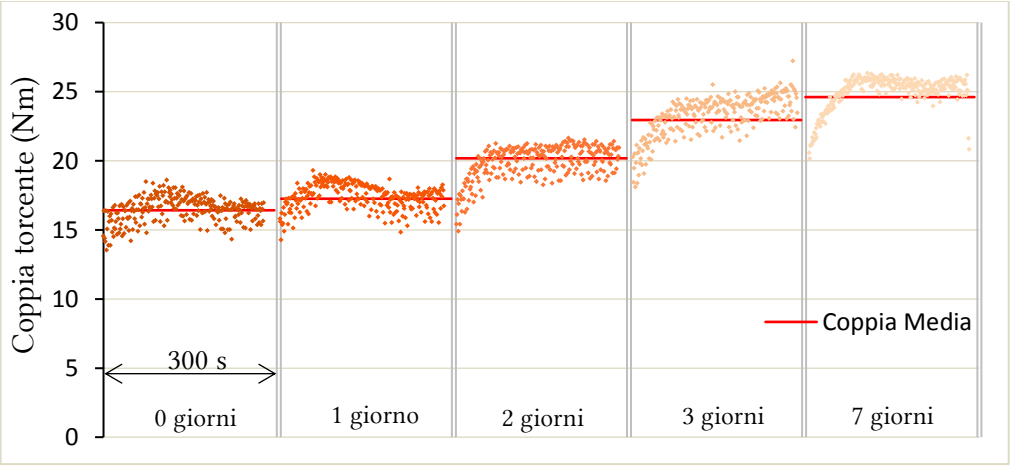


Figura 5.23 - Confronto tra i risultati del miscelatore torsionale ai vari giorni: Prodotto B

- **Prodotto C**

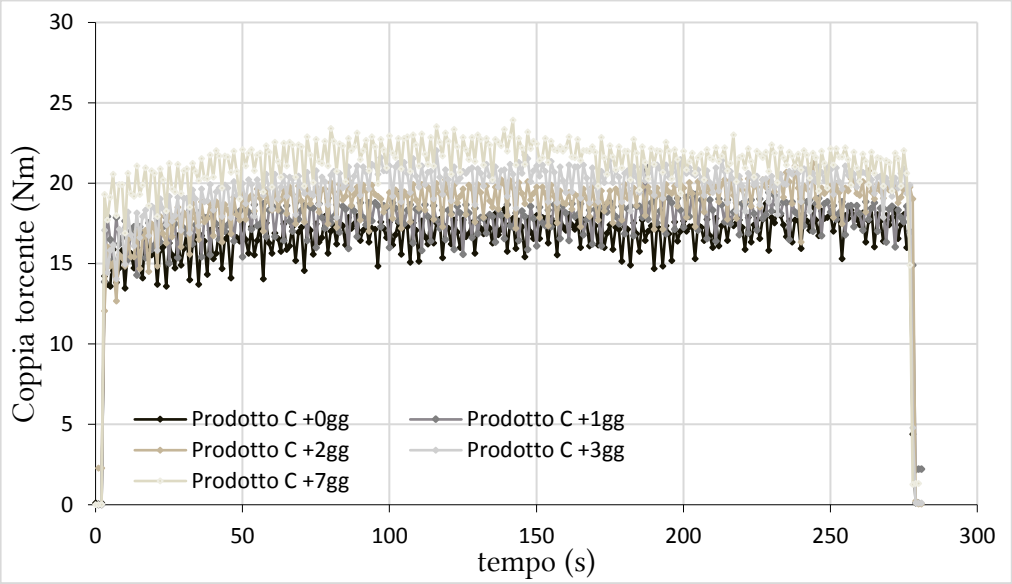


Figura 5.24 - Risultati prove miscelatore torsionale: Prodotto C

Giorni	0	1	2	3	7
Coppia media (Nm)	16,99	17,78	18,76	19,82	21,38

Tabella 5.11 - Risultati miscelatore torsionale: Prodotto C

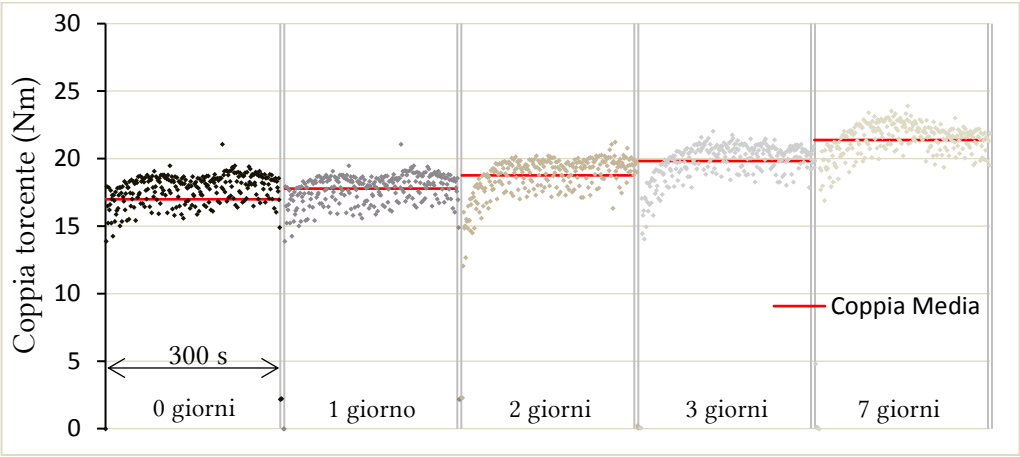


Figura 5.25 - Confronto tra i risultati del miscelatore torsionale ai vari giorni: Prodotto C

A seguire vengono mostrati in risultati derivanti dalle prove eseguite sul materiale "Grossolano. Si elencano prima quelli relativi al materiale naturale portato ad una umidità del 11% e successivamente quelli ottenuti per i condizionamenti effettuati con i Prodotti C+D e C+E al progredire dei giorni.

Si notano numerosi picchi di coppia torcente registrati che si discostano marcatamente dall'andamento generale. Sono nella maggior parte dei casi dovuti agli elementi più grossolani che interferiscono nella rotazione delle pale producendone una opposizione al movimento e determinando di conseguenza un valore elevato di coppia misurata.

Questa misura però non è rappresentativa della resistenza massima fornita dal terreno, e quindi delle sue caratteristiche meccaniche che si vogliono indagare, ma sono valori che occorrono casualmente in particolari circostanze.

- **Terreno naturale "Grossolano"**

Coppia media (Nm)	22,12

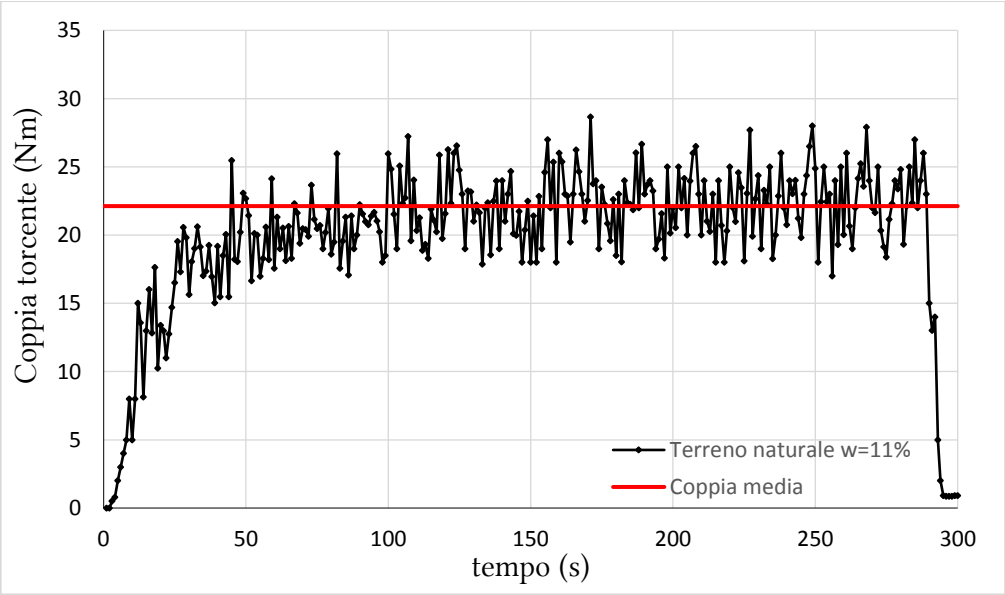


Figura 5.26 - Risultati miscelatore torsionale: Terreno naturale "Grossolano"

- **Prodotti C+D**

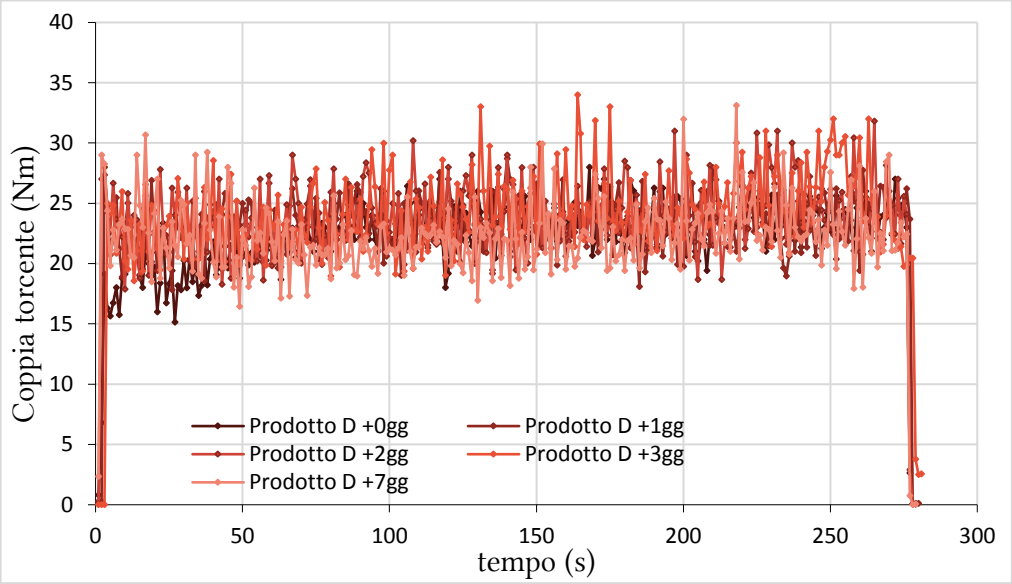


Figura 5.27 - Risultati prove miscelatore torsionale: Prodotti C+D

Giorni	0	1	2	3	7
Coppia media (Nm)	22,56	23,46	23,74	24,36	22,39

Tabella 5.12 - Risultati miscelatore torsionale: Prodotti C+D

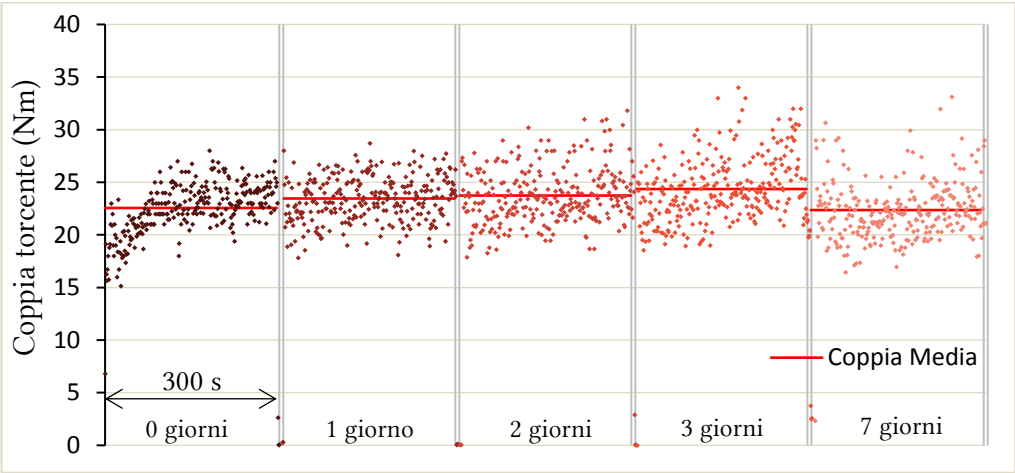


Figura 5.28 - Confronto tra i risultati del miscelatore torsionale ai vari giorni: Prodotti C+D

- **Prodotti C+E**

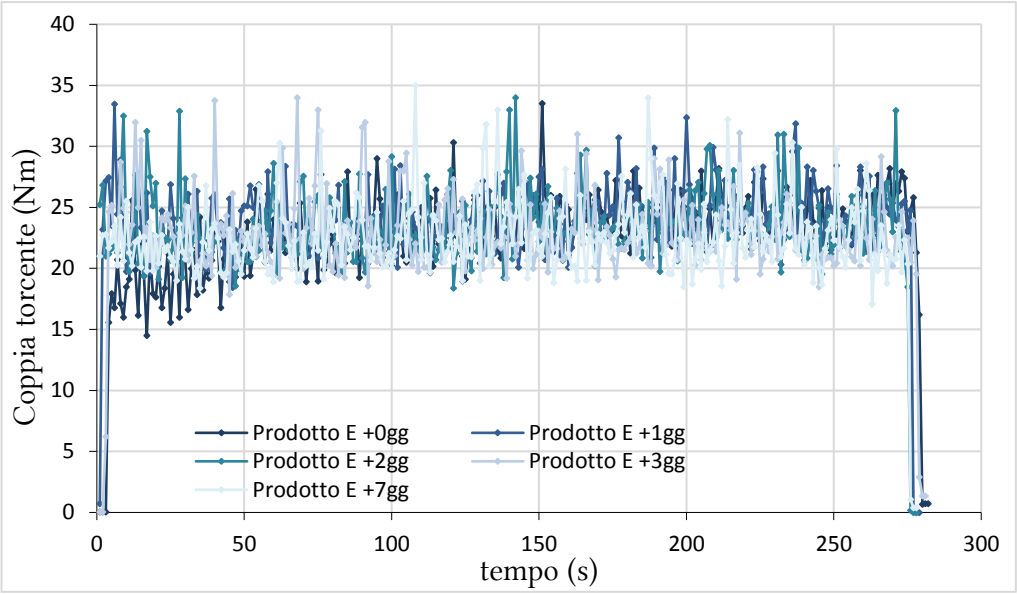


Figura 5.29 - Risultati prove miscelatore torsionale: Prodotti C+E

Giorni	0	1	2	3	7
Coppia media (Nm)	23,23	24,07	23,51	22,98	22,68

Tabella 5.13 - Risultati miscelatore torsionale: Prodotti C+E

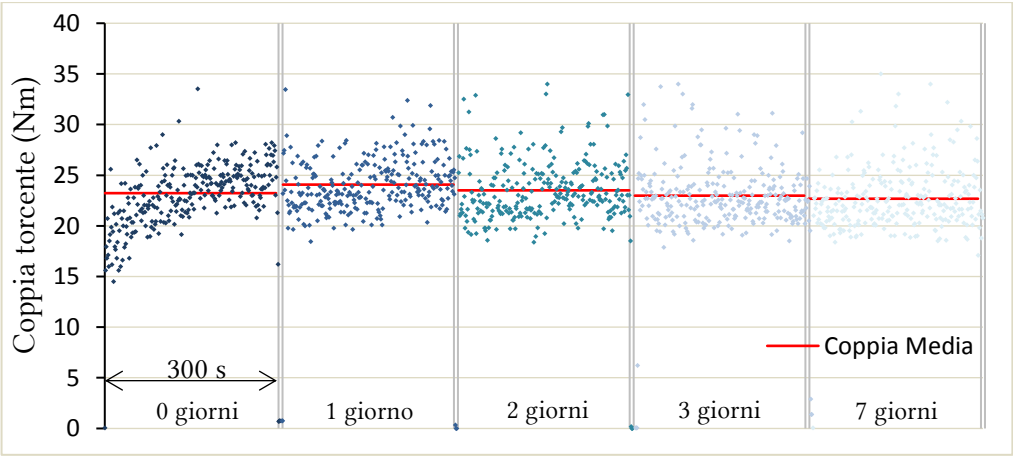


Figura 5.30 - Confronto tra i risultati del miscelatore torsionale ai vari giorni: Prodotti C+E

5.4.1 Commenti sui risultati delle prove con miscelatore torsionale

Si osserva per tutti e tre i Prodotti A, B e C, riguardanti solo agenti tensioattivi schiumogeni, che inizialmente il valore di coppia media misurata è inferiore a quello del terreno naturale "Tagliato ai 20 mm" avente la stessa umidità.

La coppia media registrata aumenta al passare del tempo, arrivando ad avere nei Prodotti A e B a 7 giorni valori addirittura superiore a quello del terreno naturale calcolato però con un contenuto di acqua del 11%.
Mentre il restante tensioattivo, il Prodotto C, non raggiunge i valori del terreno naturale avvicinandosi però a valori piuttosto prossimi.

Pertanto, l'andamento complessivo del parametro di riferimento in questa prova, ovvero la coppia media netta, tende a recuperare i valori originari anche se con differente velocità di risalita nei tre diversi tensioattivi.

Per quanto riguarda i prodotti tensioattivi con aggiunta di bentonite e polimero usati nel condizionare il materiale "Grossolano" si osserva che i valori di coppia non variano significativamente nel tempo, indice di una permanenza di pastosità del terreno per lungo tempo conferitagli dalla bentonite e dal polimero.

Come già sottolineato, i valori di picco che si discostano accentuatamente dall'andamento medio non sono relativi alla resistenza caratteristica posseduta dal materiale ma all'attrito che si genera talvolta tra pale in rotazione ed elementi grossolani e vanno quindi considerati come misure poco attendibili.

Si fa perciò sempre riferimento alla coppia media nei 300 secondi di prova come valore che meglio interpreta le caratteristiche meccaniche del terreno significative ai fini dello studio.
Tale valore medio si mantiene pressoché costante nei 7 giorni e superiore fin da subito al corrispettivo valore medio calcolato sul terreno naturale con umidità dell'11%.

Probabilmente questa situazione è spiegabile con il fatto che il terreno, senza l'applicazione di alcun condizionante al di fuori dell'acqua aggiunta per portarlo

all'umidità dell'11% corrispondente a quella totale utilizzata nel condizionamento, presentasse un comportamento molto fluido e sciolto frutto proprio sia dell'acqua immessa, sia di una predominante frazione granulometrica grossolana.

Tale frazione granulometrica di grandi dimensioni non riesce ad attirare a sé l'acqua immessa e non permette la formazione di un terreno coeso.

Il risultato è una resistenza sviluppata inferiore che non si oppone uniformemente a contrastare la rotazione delle pale.

Al contrario con l'utilizzo della bentonite e del polimero si permette sia un maggiore assorbimento di acqua con relativa diminuzione di fluidità, sia la creazione di un terreno più coeso e pastoso che offre un contrasto più uniforme, e quindi più elevato, al movimento indotto dalle pale.

5.5 Risultati prove scissometrica

La prova scissometrica è stata ideata e sviluppata per materiali coesivi a grana fine, quindi le prove condotte sui terreni oggetto di studio, che hanno un contenuto in fine limitato e allo stato naturale non presentano capacità coesive rilevanti, forniscono un risultato con validità solo comparativa tra il terreno naturale e quello condizionato.

Lo scissometro utilizzato (come spiegato al *Paragrafo 5.1.3.15.1.3*), è stato infatti modificato utilizzando una paletta di dimensioni maggiori rispetto a quelle standard per avere una maggiore sensibilità di misura data la maggiore granulometria del terreno studiato e la bassa resistenza al taglio del materiale una volta condizionato.

Queste prove sono state realizzate per fornire valori di confronto della resistenza scissometrica, per tutte le tipologie di condizionamento indagate, ai vari tempi di conservazione, nello specifico a 0, 1, 3, 7 e 28 giorni dal condizionamento.

Il valore comparativo I_{sc} ottenuto è espresso dal momento torcente massimo misurato con lo strumento diviso per la superfice cilindrica di rottura per il suo raggio.

Ad ognuno dei giorni presi in considerazione sono state ripetute tre prove per campione, prendendo come risultato il valore medio di queste.

Si è notato che l'umidità contenuta nel terreno influenza la risposta di questo in termini del valore I_{sc}.

Quindi per il terreno naturale la prova è stata eseguita su più campioni ricostituiti con differenti valori di contenuto d'acqua w (%) a partire dal valore massimo raggiunto dopo il condizionamento, cioè l'11%, andandolo poi a diminuire, così come avviene nel processo di maturazione che interessa il terreno condizionato, fino ad arrivare ad eseguire la prova sul campione completamente secco.

Si precisa che il terreno naturale non è stato lasciato a riposo come avvenuto per quello condizionato, ma i campioni di terreno sono stati appositamente ricreati con diverse percentuali di umidità contenuta.

Questa operazione ha permesso di definire il legame tra il parametro I_{sc} e il contenuto d'acqua presente al momento in cui viene calcolato. A tal proposito è stato costruito un grafico che rappresenta l'andamento con cui questo parametro subisce variazioni al cambiare dell'umidità contenuta.

Sui campioni di terreno condizionato lasciati a maturare in laboratorio, dopo aver eseguito la prova, è stata prelevata ai vari giorni una piccola quantità di materiale per poterne calcolare il contenuto d'acqua presente in quel momento, in modo da comparare i valori di I_{sc} ottenuti con i relativi valutati sul terreno naturale per lo stesso quantitativo di umidità.

Nel caso il contenuto di acqua calcolato sul materiale condizionato non corrispondesse a uno di quelli per i quali si è eseguita la prova sul materiale naturale e per i quali quindi si ha a disposizione il corrispettivo risultato di I_{sc}, per trovare il valore relativo a quello specifico contenuto in acqua si è proceduto ad effettuare una interpolazione lineare tra i valori noti.

Con questa procedura si è creata una corrispondenza più rappresentativa che tiene in considerazione l'importante effetto prodotto dall'umidità presente.

Qui di seguito si riportano per prima cosa in *Tabella 5.14* i risultati ottenuti per quanto riguarda il terreno naturale con cinque differenti quantità di contenuto d'acqua e tali

valori vengono poi graficati come rappresentato in *Figura 5.31* per evidenziarne l'andamento al variare proprio della percentuale di umidità contenuta.

Successivamente sono mostrati nelle tabelle i valori ottenuti nei vari giorni per ciascun condizionamento studiato. Di questi risultati ne viene pure proposto, nelle figure che seguono le tabelle, un confronto grafico con i risultati relativi al terreno naturale quando presenta la medesima umidità che fornisce pertanto la possibilità di apprezzare visivamente come si evolve nel tempo la resistenza scissometrica dei materiali condizionati paragonata a quella posseduta originariamente.

- **Terreno naturale**

w (%)	**0**	**3,6**	**7,1**	**8,2**	**11,0**
$I_{sc,naturale}$ (kPa)	3,86	4,20	4,72	5,00	4,22

Tabella 5.14 - Risultati prova scissometrica sul terreno naturale

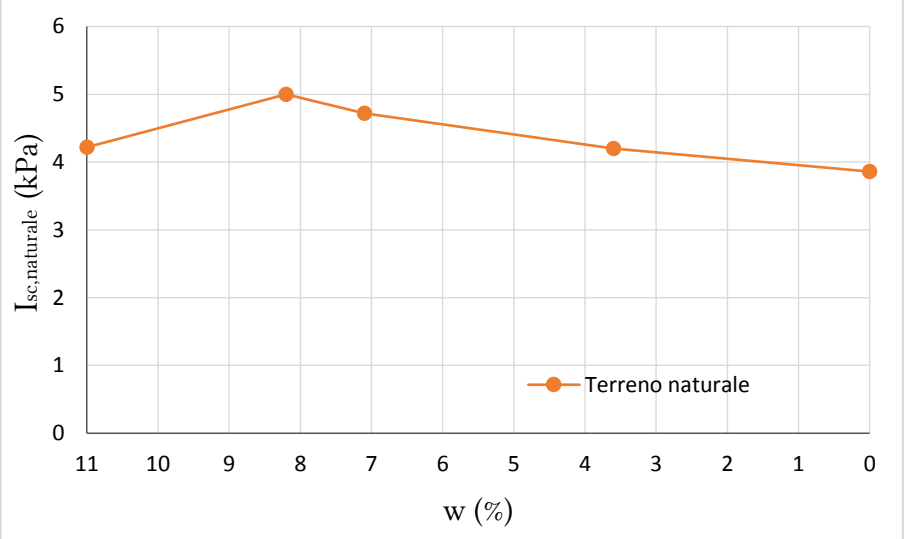


Figura 5.31 - Risultati prova scissometrica sul terreno naturale in funzione del contenuto di acqua

- **Prodotto A**

Giorni	0	1	3	7	28
$I_{sc,condizionato}$ (kPa)	1,07	1,31	3,82	3,92	3,86
w (%)	11	10,5	9,8	8,2	4,1
$I_{sc,naturale}$ (kPa) Valutato per lo stesso contenuto d'acqua del terreno condizionato	4,22	4,36	4,55	5,00	4,26
$I_{sc,cond}/I_{sc,nat}$ (%)	25,4	30,0	84,0	78,4	90,6

Tabella 5.15 - Risultati prova scissometrica sul terreno condizionato: Prodotto A

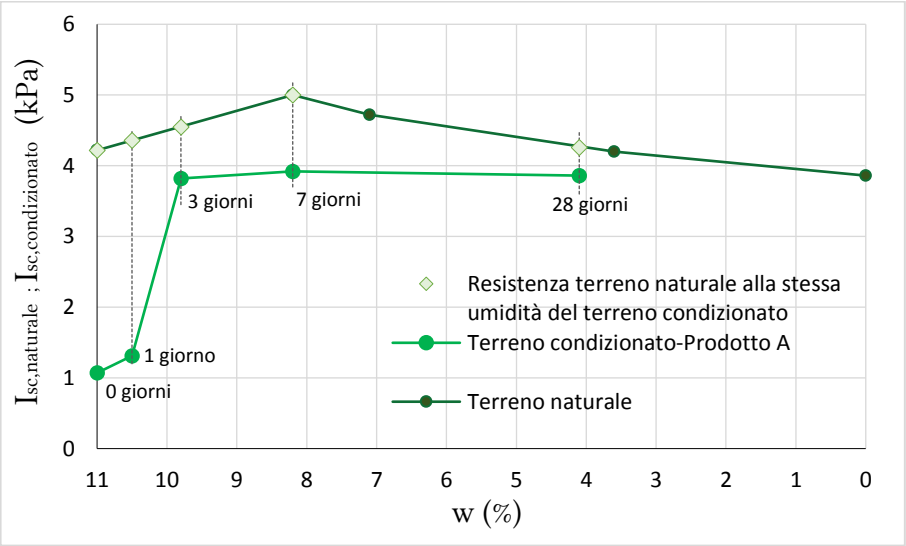


Figura 5.32 - Confronto ai vari giorni tra i risultati della prova scissometrica sul terreno naturale e sul terreno condizionato con il Prodotto A

- **Prodotto B**

Giorni	0	1	3	7	28
$I_{sc,condizionato}$ (kPa)	0,72	1,50	4,50	4,23	3,83
w (%)	11	10,5	9,7	8,3	4,0
$I_{sc,naturale}$ (kPa) Valutato per lo stesso contenuto d'acqua del terreno condizionato	4,22	4,37	4,59	4,94	4,26
$I_{sc,cond}/I_{sc,nat}$ (%)	17,1	34,3	98,0	84,9	89,9

Tabella 5.16 - Risultati prove scissometriche sul terreno condizionato: Prodotto B

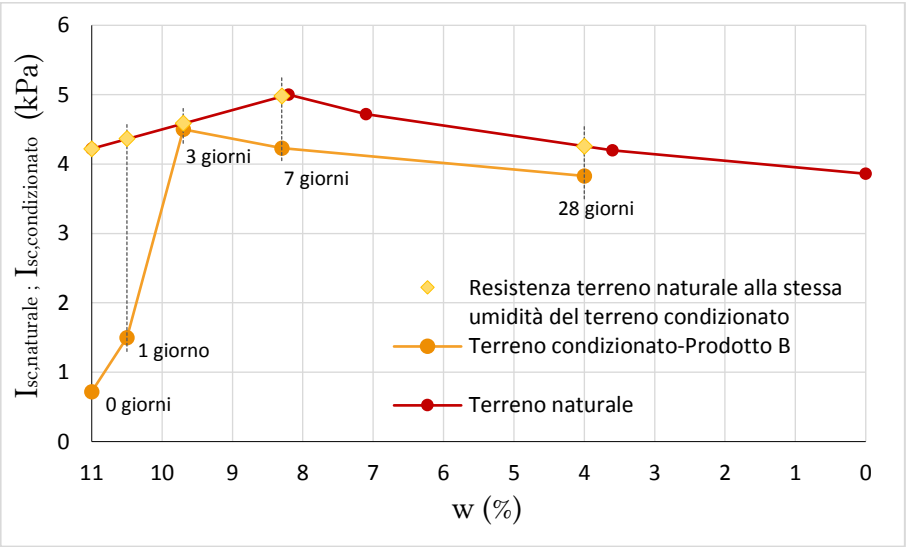


Figura 5.33 - Confronto ai vari giorni tra i risultati della prova scissometrica sul terreno naturale e sul terreno condizionato con il Prodotto B

- **Prodotto C**

Giorni	0	1	3	7	28
$I_{sc,condizionato}$ (kPa)	1,67	2,71	3,43	4,79	4,19
w (%)	11	10,5	9,8	8,6	5,4
$I_{sc,naturale}$ (kPa) Valutato per lo stesso contenuto d'acqua del terreno condizionato	4,22	4,33	4,55	4,89	4,47
$I_{sc,cond}/I_{sc,nat}$ (%)	39,6	62,0	75,3	98,0	93,7

Tabella 5.17 - Risultati prova scissometrica: Prodotto C

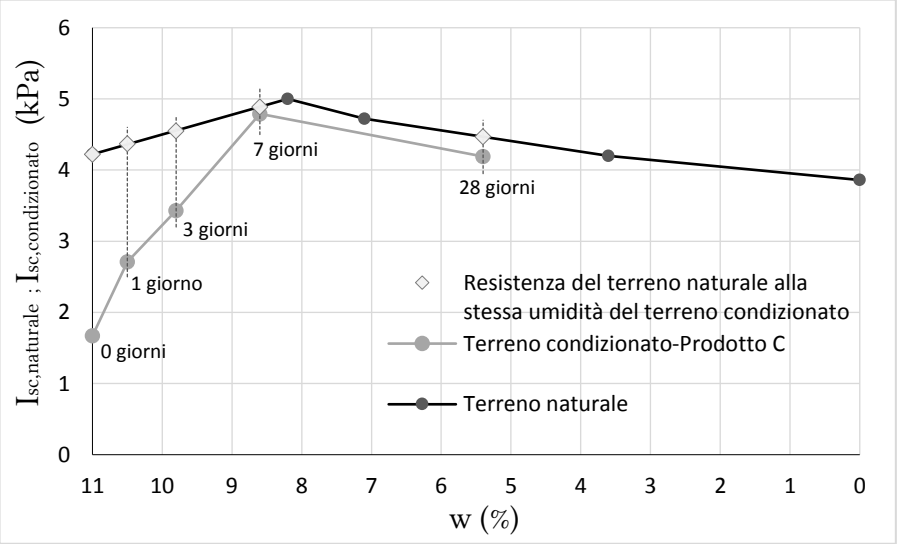


Figura 5.34 - Confronto ai vari giorni tra i risultati della prova scissometrica sul terreno naturale e sul terreno condizionato con il Prodotto C

- **Prodotto C+D**

Giorni	0	1	3	7	28
$I_{sc,condizionato}$ (kPa)	1,91	2,07	2,80	3,70	5,43
w (%)	11	10,8	10,4	9,6	5,4
$I_{sc,naturale}$ (kPa) Valutato per lo stesso contenuto d'acqua del terreno condizionato	4,22	4,27	4,38	4,60	4,38
$I_{sc,cond}/I_{sc,nat}$ (%)	45,3	48,5	63,9	80,4	124, 0

Tabella 5.18 - Risultati prova scissometrica: Prodotto C+D

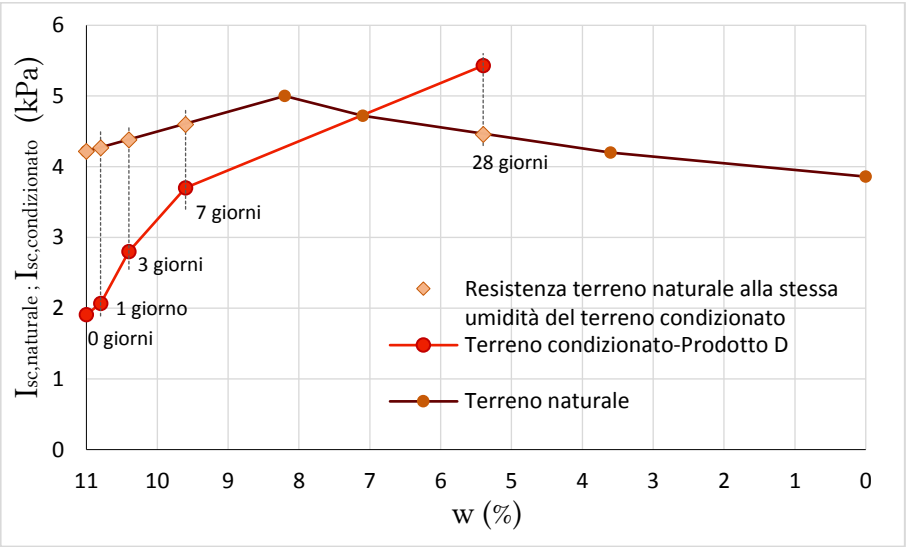


Figura 5.35 - Confronto ai vari giorni tra i risultati della prova scissometrica sul terreno naturale e sul terreno condizionato con i Prodotti C+D

- **Prodotto C+E**

Giorni	0	1	3	7	28
$I_{sc,condizionato}$ (kPa)	3,02	3,17	3,00	3,55	5,10
w (%)	11	10,6	10,2	9,0	4,3
$I_{sc,naturale}$ (kPa) Valutato per lo stesso contenuto d'acqua del terreno condizionato	4,22	4,34	4,44	4,77	4,3
$I_{sc,cond}/I_{sc,nat}$ (%)	71,6	73.0	67,3	74,1	118,6

Tabella 5.19 - Risultati prova scissometrica: Prodotto C+E

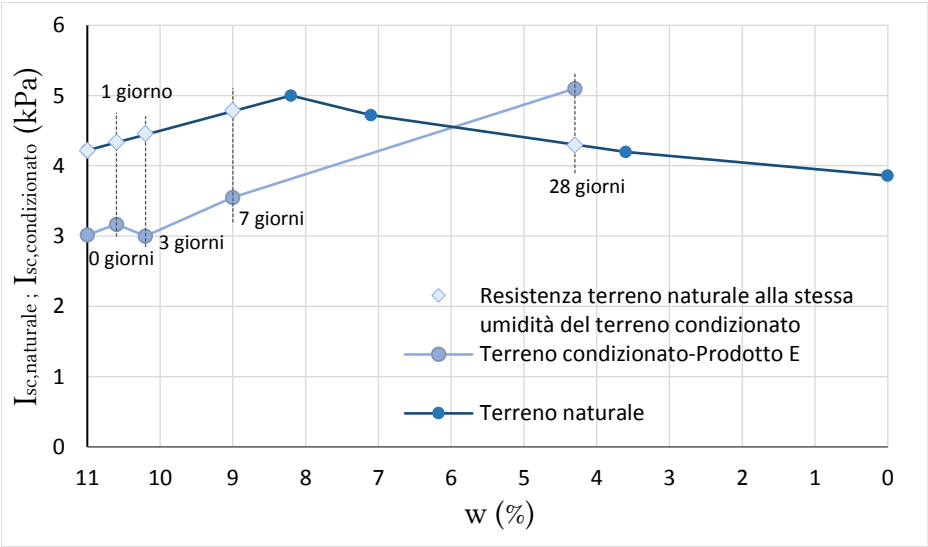


Figura 5.36 - Confronto ai vari giorni tra i risultati della prova scissometrica sul terreno naturale e sul terreno condizionato con i Prodotti C+E

Nelle tabelle sono stati riportati i risultati ricavati per ogni singolo tipo di condizionamento in termini di resistenza calcolata nei vari giorni con relativa misura di umidità contenuta. Tale resistenza è stata rapportata con la rispettiva riguardante il terreno naturale quando possiede la medesima quantità di contenuto d'acqua per mostrare in quale percentuale corrisponda a quella avuta precedentemente al condizionamento.

La figura riportata di seguito alle tabelle rappresenta graficamente le informazioni contenute all'interno delle tabelle stesse, ossia l'andamento della resistenza I_{sc} al progredire dei giorni dopo il condizionamento correlatamente al variare del contenuto in umidità dei terreni.

In sintesi in *Figura 5.37* sono diagrammati insieme i risultati delle prove scissometriche eseguite in modo da mostrare come varia, differentemente nel tempo a seconda dei condizionanti usati, il rapporto definito in percentuale tra il valore di I_{sc} registrato sul materiale condizionato e quello misurato sul terreno al naturale avente il medesimo contenuto in acqua del terreno condizionato al momento della prova.

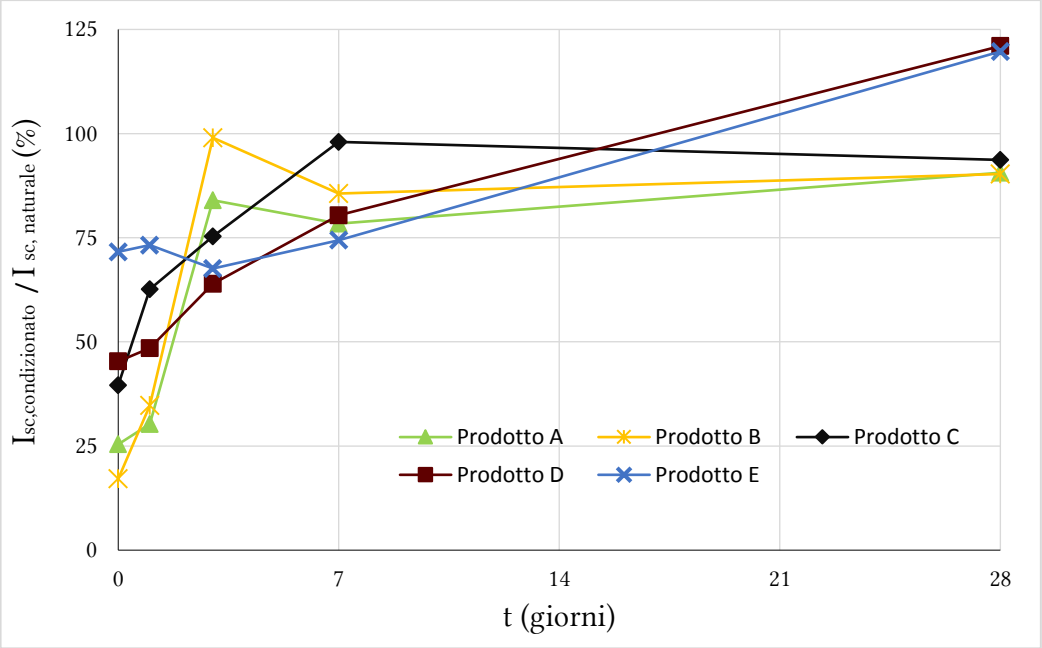


Figura 5.37 - Sintesi dei risultati delle prove scissometriche

5.5.1 Commenti sui risultati delle prove scissometriche

Si osserva che al crescere del tempo di maturazione la resistenza scissometrica tende progressivamente a salire avvicinandosi a valori compresi tra 90% e 100% del valore della resistenza scissometrica misurata sul terreno naturale al pari contenuto d'acqua.

I terreni condizionati con il Prodotto A e Prodotto B dopo 3 giorni riacquistano più dell'80% della resistenza del terreno naturale per poi assestarsi a 28 giorni a circa 90% nonostante inizialmente presentino un'aliquota bassa intorno al 25%.

Il terreno condizionato con il tensioattivo denominato Prodotto C all'inizio presenta una resistenza di circa il 40% del terreno naturale e poi riacquista una minor aliquota di resistenza (75%) a 3 giorni rispetto ai campioni condizionati con i Prodotti A e B ma dopo 7 giorni ha riacquistato il 98% della resistenza totale del terreno naturale.

Infine per quanto concerne il condizionamento con l'aggiunta di bentonite al Prodotto C, questo inizialmente fa partire la resistenza da un valore prossimo al 45% della resistenza originaria ma in seguito rallenta leggermente il processo di riacquisizione delle caratteristiche di resistenza precedentemente descritto (fino a 7 giorni).

Alla stessa maniera nel condizionamento con l'aggiunta del polimero al Prodotto C, si nota che fornisce a zero giorni un rapporto della resistenza rispetto quella al naturale di poco superiore al 70% salvo poi mantenere le caratteristiche di resistenza circa costanti (fino a 7 giorni), mentre a 28 giorni, sia per il Prodotto D sia per il Prodotto E, i valori salgono addirittura sopra il 100%, dato che si sono aggiunti materiali che apportano coesione.

5.6 Risultati prove di taglio diretto

Le prove di taglio sono state eseguite con un'attrezzatura di taglio diretto standard per le prove sui terreni, illustrata in *Figura 5.38* presente presso il "Laboratorio di Geotecnica" del Politecnico di Torino che opera esattamente con le medesime modalità descritte al *Paragrafo 5.1.4*.

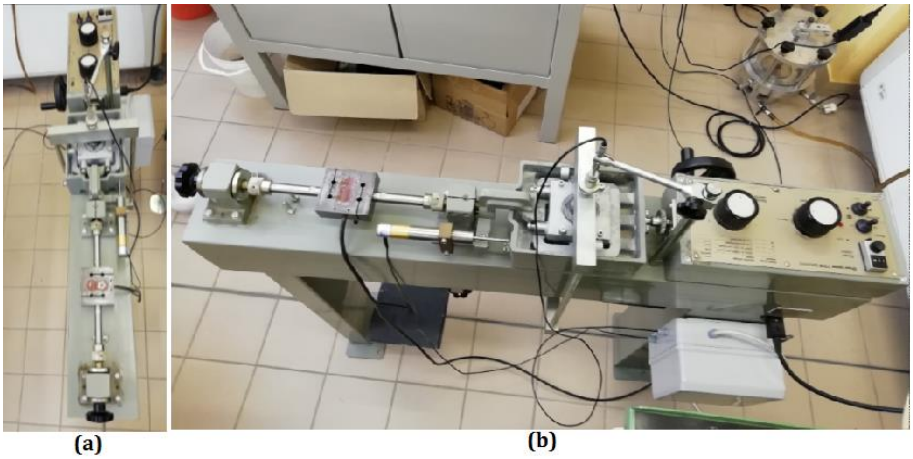


Figura 5.38 - Macchina di taglio utilizzata per la campagna di prove: Vista frontale (a); Vista laterale (b)

Al fine di valutare l'influenza del condizionamento sui parametri meccanici di resistenza a taglio dei terreni, ossia sull'angolo di attrito e sulla coesione sono state eseguite una serie di prove di taglio diretto.

Essendo poi tra i principali obiettivi quello di comprendere anche l'evoluzione di tali parametri al progredire del degrado degli agenti condizionanti le prove sono state svolte ad intervalli di 1, 3, 7 e 28 giorni dalla data di condizionamento.

Date le dimensioni della scatola di taglio è possibile condurre la prova solo su campioni di terreno passati a vagliatura al setaccio da 4,75mm, come peraltro è richiesto dalla normativa di riferimento.

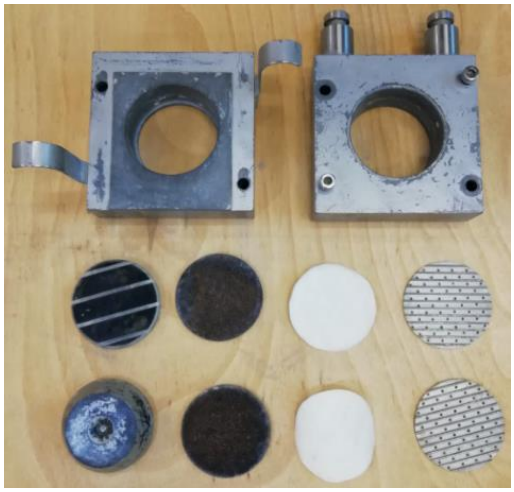


Figura 5.39 - Scatola di taglio impiegata nella campagna di prove nelle varie parti che la compongono

Nel caso specifico la scatola di taglio di cui si disponeva prevedeva l'utilizzo di provini di terreno cilindrici di diametro 5 cm. Proprio quella adoperata in questa campagna di prove viene mostrata in *Figura 5.39* nelle sue varie parti che la costituiscono prima di essere assemblata.

La prima operazione riguardante la prova perciò è stata la preparazione del terreno. Dalla frazione "Tagliato ai 20 mm" ne è stata prelevato un certo quantitativo che dapprima è stato essiccato in forno e successivamente è stato vagliato ricavandone il materiale sufficiente ad eseguire le prove sia al naturale che dopo condizionamento.

La procedura di condizionamento ha seguito le stesse modalità presentate al *Paragrafo 5.2.4* e il materiale prodotto è stato conservato in laboratorio alla stessa maniera di quello destinato alle altre prove.
Come già detto al *Paragrafo 5.1.4.1* la prova è stata svolta senza saturare i provini ma indagando il terreno con le percentuali di umidità possedute senza apportare variazioni.

Per quanto riguarda il terreno al naturale si sono prodotti cinque diversi campioni con contenuti di acqua che differivano tra loro con intervalli di due punti percentuali e mezzo.
Si è partiti da una percentuale del 11% uguale a quella del terreno subito dopo il condizionamento diminuendola poi al 7,5%, al 5%, al 2,5% arrivando infine ad effettuare la prova sul terreno completamente secco.

Per il terreno condizionato invece è stata calcolata l'umidità presente nei provini prima di effettuare le prove ai vari giorni.

In questo modo si è valutata la correlazione esistente tra terreno naturale e condizionato aventi le stesse percentuali di contenuto d'acqua proprio perché si è voluto escludere che le differenze evidenziate tra i terreni fossero collegate anche solo in parte ad una differenza di umidità.

Per ricavare l'inviluppo di rottura a taglio, e quindi l'angolo d'attrito e la coesione che rappresentano i parametri oggetto di interesse, si è proceduto ripetendo la prova su

ogni diverso campione applicando tre differenti pesi che producono sul provino pressioni verticali pari rispettivamente a 50, 100 e 200 kPa.

Per tutte le prove, sia riguardanti il terreno condizionato che naturale, dopo l'applicazione del carico di compressione verticale si è atteso per all'incirca 20 minuti che il provino completasse la fase di consolidazione dopodiché è stata impostata tramite la macchina una uguale velocità di deformazione pari a 0,750 mm/min e si è proceduto a registrare i dati attraverso il software di acquisizione.

I risultati ottenuti sono qui riportati, mostrando prima quelli relativi al terreno naturale visto che saranno utilizzati poi come confronto nel momento in cui si presentano invece quelli relativi al materiale condizionato.
Per quanto concerne quindi il terreno condizionato, per ognuno degli agenti condizionanti oggetto di studio, si elencano i valori ricavati riportandoli all'interno delle tabelle, le quali sono seguite dalle relative figure utili a mostrarne graficamente il contenuto e utili soprattutto per ricreare una comparazione visiva con i rispettivi valori misurati sul terreno naturale e su come questa comparazione evolve nei giorni al degradarsi dell'agente condizionante

- **Terreno naturale**

Tensione normale (kPa)	Tensione tangenziale (kPa)				
	w=0%	w=2,5%	w=5%	w=7,5%	w=11%
50	111	90	77	77	80
100	164	125	107	122	113
200	233	188	159	179	219

Tabella 5.20 - Risultati prove di taglio diretto sul terreno naturale

Da cui si ricavano i valori di angolo d'attrito e coesione:

w (%)	0	2,5	5	7,5	11
φ (°)	38	33	28	34	44
c (kPa)	76	59	51	49	27

Tabella 5.21 - Parametri di resistenza a taglio del terreno naturale

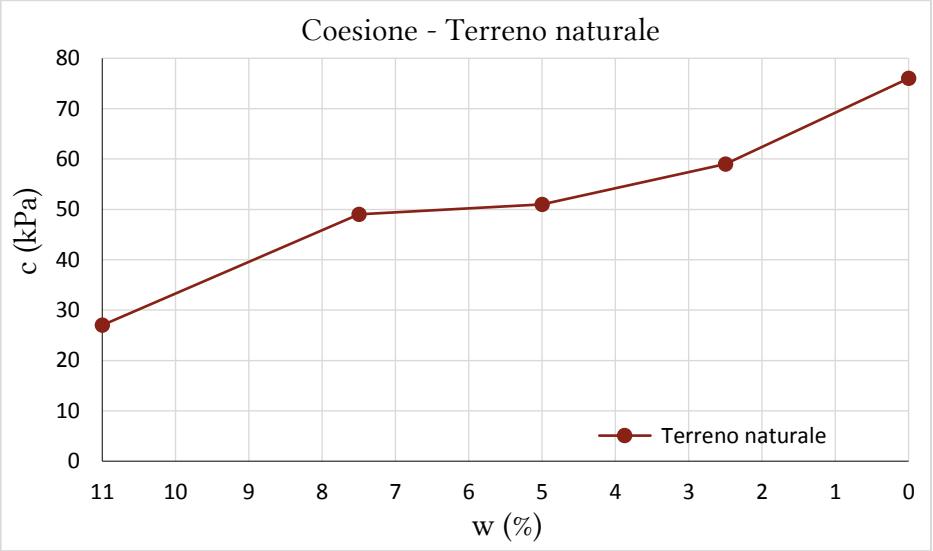


Figura 5.40 - Coesione del terreno naturale in funzione del contenuto d'acqua

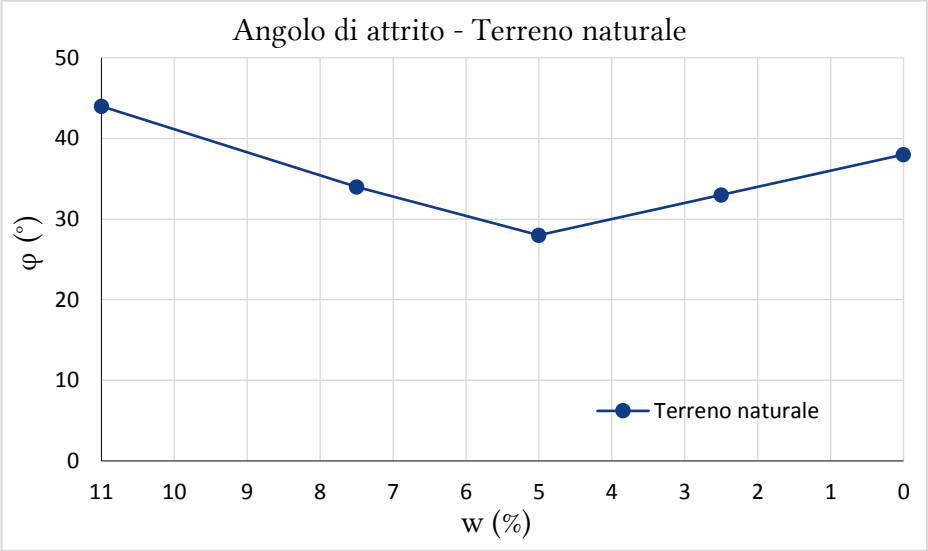


Figura 5.41 - Angolo d'attrito del terreno naturale in funzione del contenuto d'acqua

- **Prodotto A**

Tensione normale (kPa)	Tensione tangenziale (kPa)			
	w=11%	w=7%	w=3%	w=0%
	1 giorno	3 giorni	7 giorni	28 giorni
50	73,9	96,8	81,5	127,3
100	127,3	132,4	142,6	132,4
200	203,7	219,0	269,9	244,5

Tabella 5.22 - Risultati prove di taglio diretto sul terreno condizionato: Prodotto A

Da questi dati si ricavano l'angolo di attrito e la coesione per il terreno condizionato con il Prodotto A, che sono confrontati con i rispettivi valori del terreno naturale ad uguale contenuto d'acqua:

Giorni	1	3	7	28
w (%)	11	7	3	0
$\varphi_{condizionato}$ (°)	40	39	51	40
$\varphi_{naturale}$ (°)	44	32,7	32	38
$c_{condizionato}$ (kPa)	35,7	53,4	17,8	71,3
$c_{naturale}$ (kPa)	27	49,4	57,4	76
$\tan\varphi_{cond}/\tan\varphi_{nat}$ (%)	86,9	126,1	197,6	107,4
$c/c_{terreno\ naturale}$ (%)	132,2	108,1	31	93,8

Tabella 5.23 - Parametri di resistenza a taglio del terreno condizionato: Prodotto A

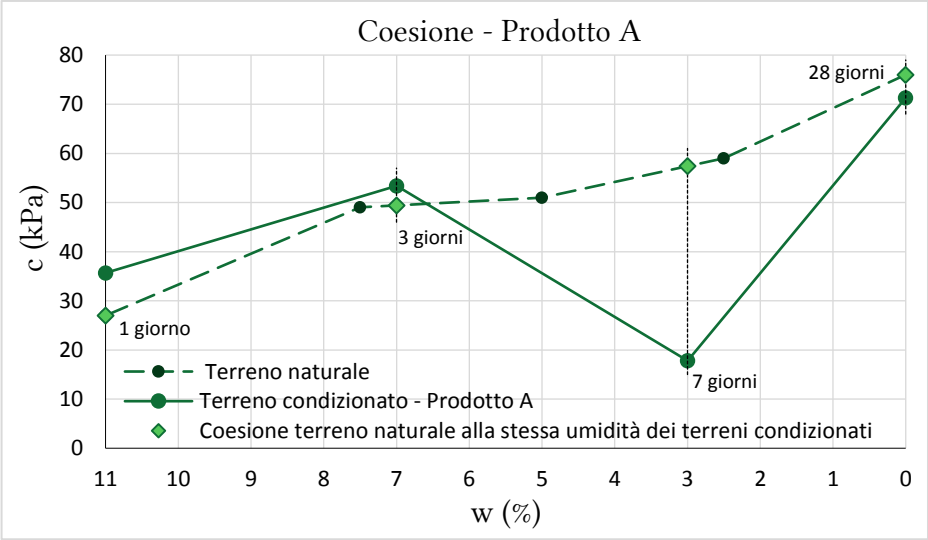


Figura 5.42 – Confronto ai vari giorni tra la coesione del terreno naturale e la coesione del terreno condizionato con il Prodotto A

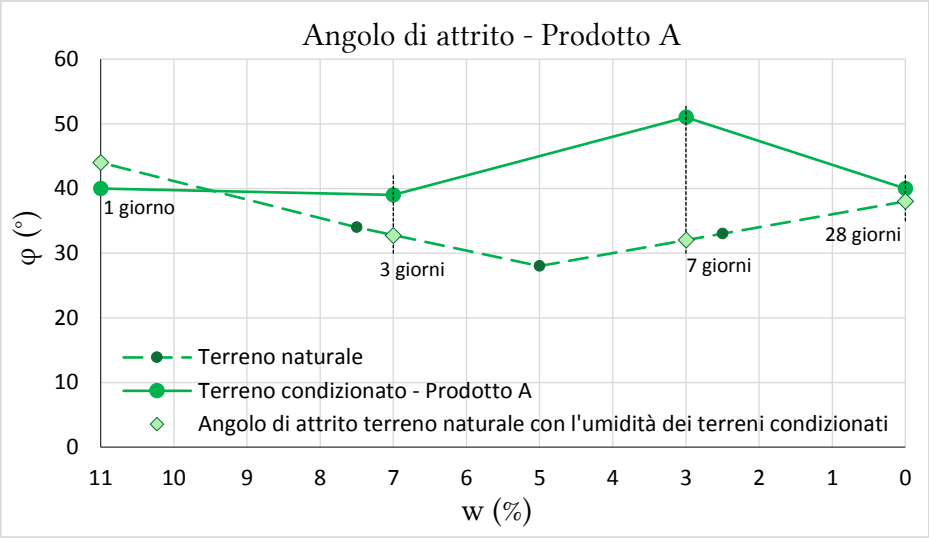


Figura 5.43 - Confronto ai vari giorni tra l'angolo d'attrito del terreno naturale e l'angolo d'attrito del terreno condizionato con il Prodotto A

Nella *Figura* 5.44 che segue sono mostrate graficamente le variazioni che subiscono nel corso dei giorni i rapporti, definiti in percentuale, riguardanti uno la tangente dell'angolo di attrito calcolata sul terreno condizionato con il Prodotto A e quella relativa al terreno naturale, e l'altro riguardante invece la coesione sempre riferendosi ai valori calcolati su materiale condizionato e naturale.

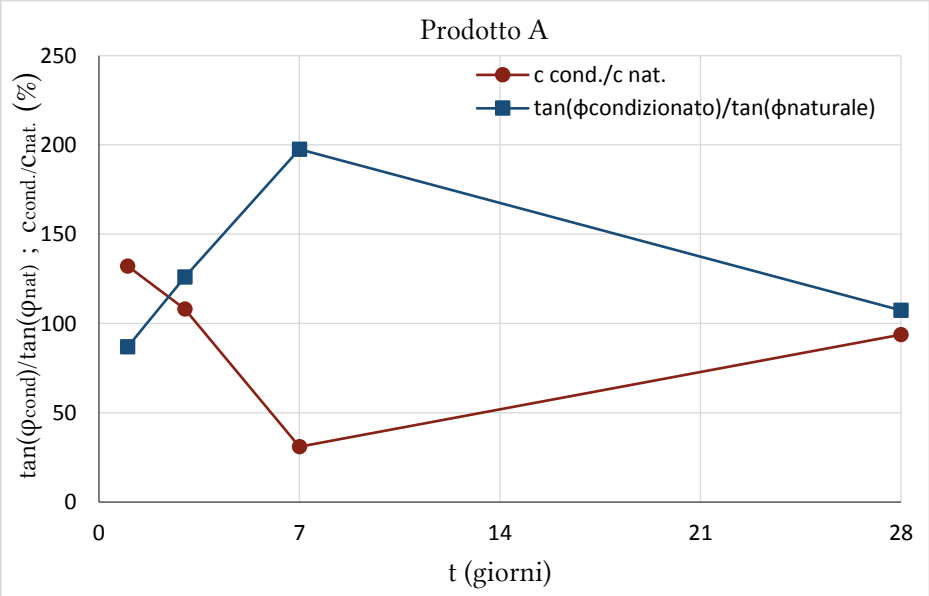


Figura 5.44 - Confronto ai vari giorni del rapporto tra i parametri di resistenza a taglio del terreno naturale e del terreno condizionato con il Prodotto A

- Prodotto B

Tensione normale (kPa)	Tensione tangenziale (kPa)			
	w=11%	w=7%	w=3%	w=0%
	1 giorno	3 giorni	7 giorni	28 giorni
50	66,2	91,6	71,3	101,9
100	112,1	142,6	127,3	132,4
200	193,5	254,7	229,2	249,6

Tabella 5.24 - Risultati prove di taglio diretto sul terreno condizionato: Prodotto B

Da questi dati sono stati ricavati l'angolo di attrito e la coesione per il terreno condizionato con il Prodotto B, i quali vengono di seguito confrontati con i rispettivi valori del terreno naturale ad uguale contenuto d'acqua:

Giorni	1	3	7	28
w (%)	11	7	3	0
$\varphi_{condizionato}$ (°)	40	48	46	46
$\varphi_{naturale}$ (°)	44	32,7	32	38
$c_{condizionato}$ (kPa)	25,5	35,7	20,4	43,3
$c_{naturale}$ (kPa)	27	49,4	57,4	76
$\tan\varphi_{cond}/\tan\varphi_{nat}$ (%)	90,9	146,8	143,8	121,1
$c/c_{terreno\ naturale}$ (%)	94,4	72,3	35,5	57

Tabella 5.25 - Parametri di resistenza a taglio del terreno condizionato: Prodotto B

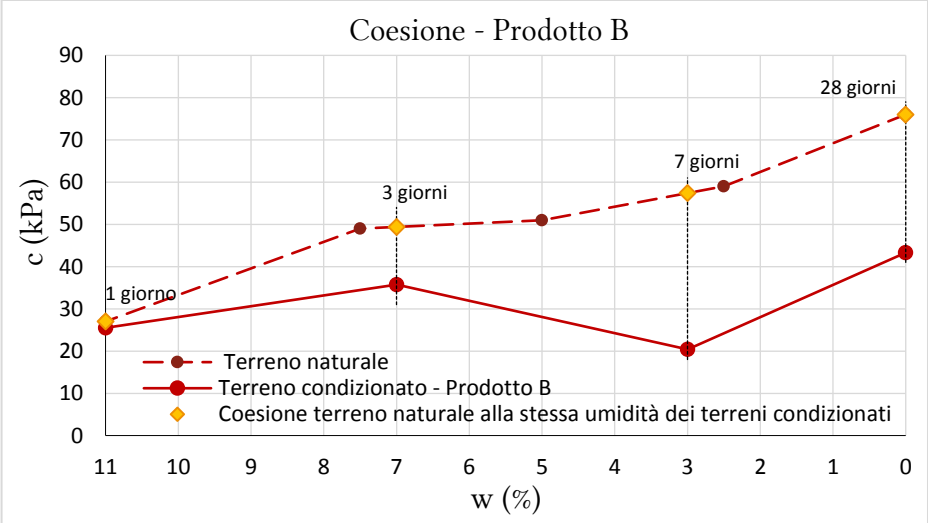


Figura 5.45 - Confronto ai vari giorni tra la coesione del terreno naturale e la coesione del terreno condizionato con il Prodotto B

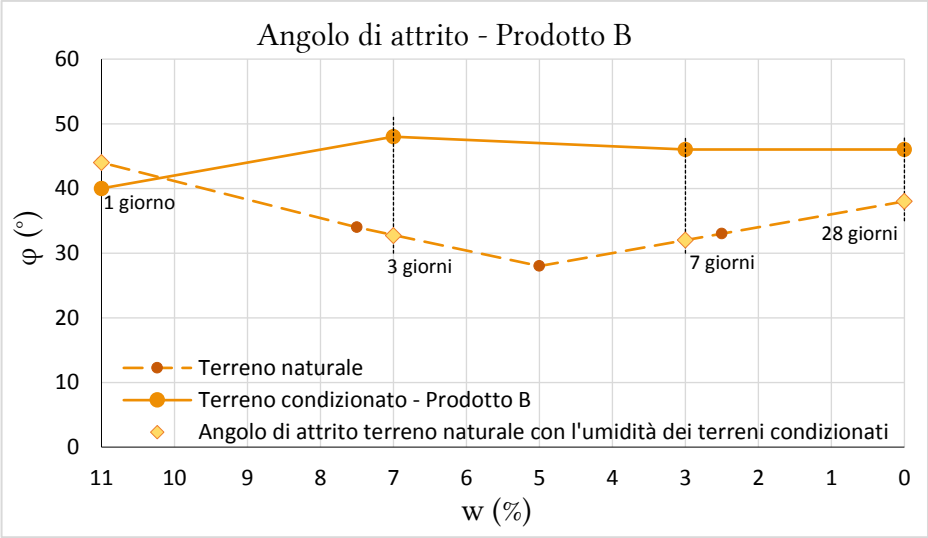


Figura 5.46 - Confronto ai vari giorni tra l'angolo di attrito del terreno naturale e l'angolo d'attrito del terreno condizionato con il Prodotto B

Nella seguente *Figura 5.47* è mostrato graficamente come variano nel corso dei giorni i rapporti, definiti in termini percentuali, riguardanti uno la tangente dell'angolo di attrito calcolata sul terreno condizionato con il Prodotto B e quella relativa al terreno naturale, e l'altro riguardante invece la coesione sempre riferendosi ai valori calcolati su materiale condizionato e naturale.

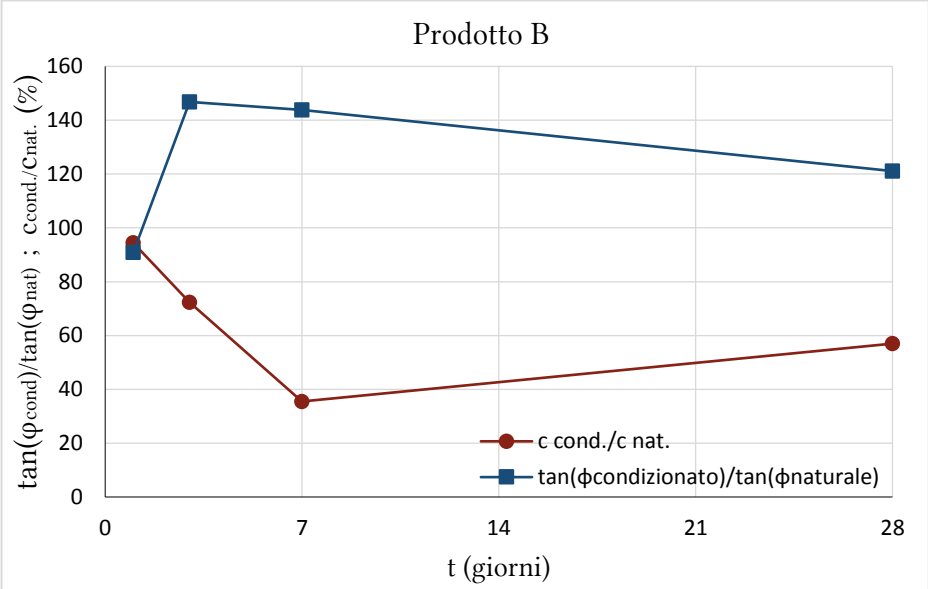


Figura 5.47 - Confronto ai vari giorni tra il rapporto dei parametri di resistenza a taglio del terreno e del terreno condizionato con il Prodotto B

- **Prodotto C**

Tensione normale (kPa)	Tensione tangenziale (kPa)			
	w=11%	w=7%	w=3%	w=0%
	1 giorno	3 giorni	7 giorni	28 giorni
50	71,3	85,1	81,5	86,6
100	126,3	135,5	127,3	147,7
200	213,4	244,5	219,0	229,2

Tabella 5.26 - Risultati prove di taglio diretto sul terreno condizionato: Prodotto C

Da questi dati si è ottenuto l'angolo di attrito e la coesione per il terreno condizionato con il Prodotto C che qui di seguito sono confrontati con i rispettivi valori del terreno naturale ad uguale contenuto d'acqua:

Giorni	1	3	7	28
w (%)	11	7	3	0
$\varphi_{condizionato}$ (°)	43	47	43	43
$\varphi_{naturale}$ (°)	44	32,7	32	38
$c_{condizionato}$ (kPa)	27,8	30,6	35,7	45,8
$c_{naturale}$ (kPa)	27	49,4	57,4	76
$\tan\varphi_{cond}/\tan\varphi_{nat}$ (%)	96,6	167	149,2	119,4
$c/c_{terreno\ naturale}$ (%)	103	61,9	62,3	60,3

Tabella 5.27 - Parametri di resistenza a taglio del terreno condizionato: Prodotto C

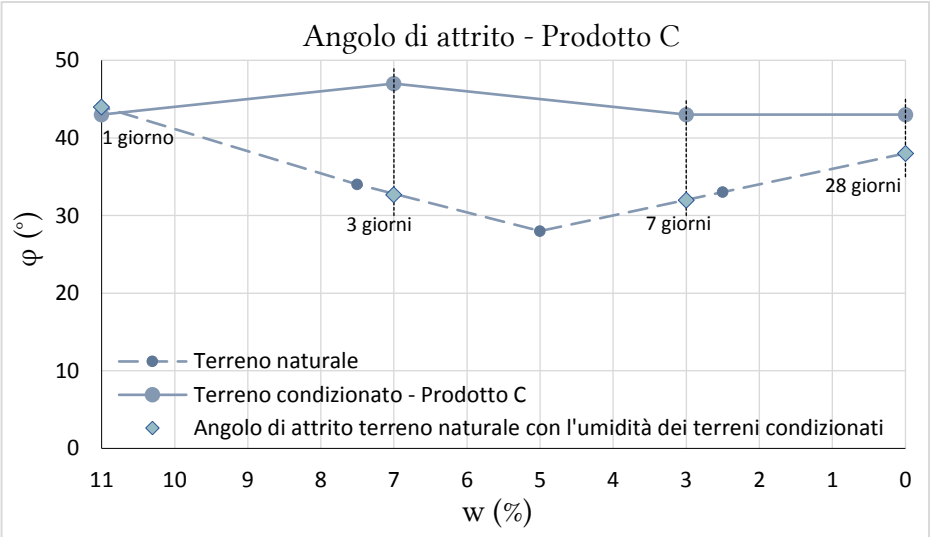


Figura 5.48 - Confronto ai vari giorni tra la coesione del terreno naturale e la coesione del terreno condizionato con il Prodotto C

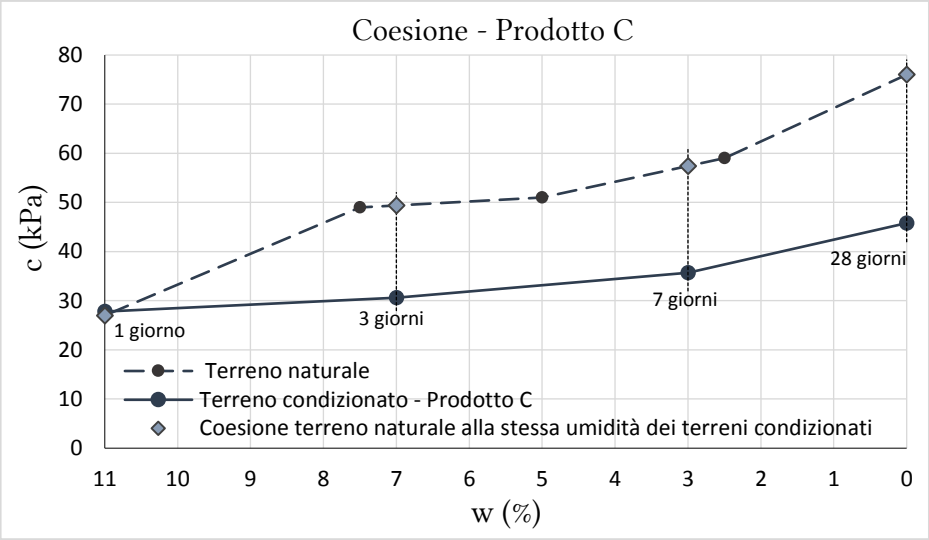


Figura 5.49 - Confronto ai vari giorni tra l'angolo d'attrito del terreno naturale e l'angolo d'attrito del terreno condizionato con il Prodotto C

Nella successiva *Figura 5.50* viene illustrato graficamente come variano nel corso dei giorni i rapporti, definiti in termini percentuali, riguardanti uno la tangente dell'angolo di attrito calcolata sul terreno condizionato con il Prodotto C e quella relativa al terreno naturale, e l'altro riguardante invece la coesione sempre riferendosi ai valori calcolati su materiale condizionato e naturale.

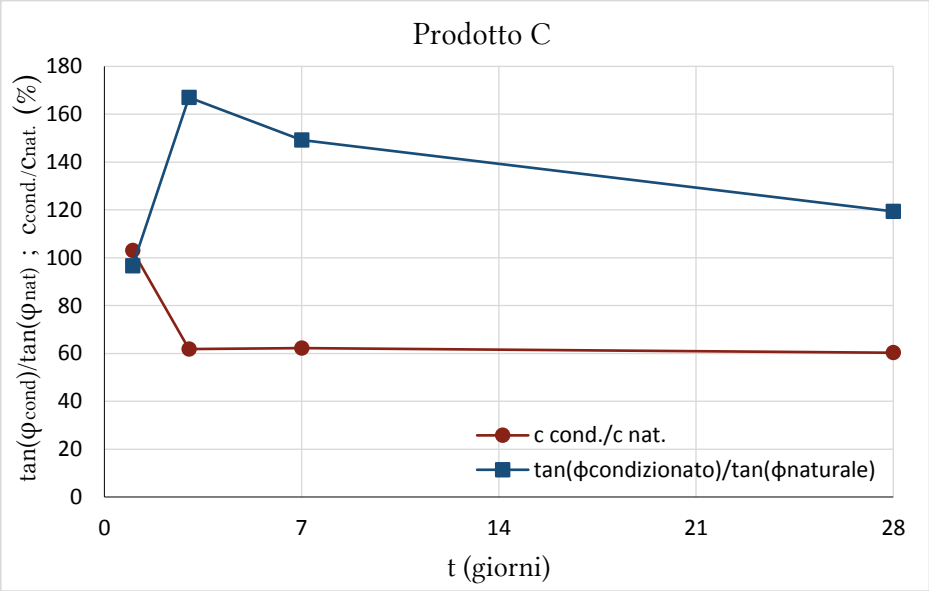


Figura 5.50 - Confronto ai vari giorni tra il rapporto dei parametri di resistenza a taglio del terreno naturale e del terreno condizionato con il Prodotto C

- **Prodotti C+D**

Il materiale condizionato con i Prodotti C+D a 1, 3 e 7 giorni di riposo presentava velocità di consolidazione molto lente per tutti e tre i differenti carichi verticali applicati.

Questo ha impedito di eseguire, per tali tempi di riposo, una prova di taglio che fornisse delle caratteristiche di resistenza a taglio che fossero realmente rappresentative del materiale in quel momento. Infatti una consolidazione non completata provoca una aderenza tra i grani di terreno non uniforme e questa situazione non permette di indagare quale sia l'effettivo comportamento meccanico a taglio del materiale. Quindi i risultati ricavati in queste situazioni sono stati scartati e non considerati ai fini dello studio.

Le velocità di consolidazione a 28 giorni di riposo ha permesso lo svolgimento regolare della prova che ha fornito i seguenti risultati:

Tensione normale (kPa)	Tensione tangenziale (kPa)	28 giorni
50	86	w=0%
100	115,6	
200	151,4	
$\varphi_{condizionato}$ (°)		23
$\varphi_{naturale}$ (°)		38
$c_{condizionato}$ (kPa)		68,1
$c_{naturale}$ (kPa)		76
$\tan\varphi_{cond}/\tan\varphi_{nat}$ (%)		54,3
c_{cond}/c_{nat} (%)		89,6

Tabella 5.28 - Risultati prova di taglio diretto sul terreno condizionato con i Prodotti C+D

- **Prodotti C+E**

Analogamente a quanto avvenuto per il Prodotto D, la lenta velocità di consolidazione non ha permesso l'esecuzione di nessuna delle prove di taglio per il Prodotto E a 1, 3 e 7 giorni di riposo dopo il condizionamento.

Solamente a 28 giorni è avvenuta una fase consolidativa sufficientemente rapida da consentire lo svolgimento delle prove di taglio che hanno prodotto i seguenti risultati:

Tensione normale (kPa)	Tensione tangenziale (kPa)	28 giorni
50	76,9	w=0%
100	121,2	
200	198,6	
$\varphi_{condizionato}$ (°)		39
$\varphi_{naturale}$ (°)		38
$c_{condizionato}$ (kPa)		38,2
$c_{naturale}$ (kPa)		76
$\tan\varphi_{cond}/\tan\varphi_{nat}$ (%)		103,6
c_{cond}/c_{nat} (%)		50,3

Tabella 5.29 - Risultati prova di taglio diretto sul terreno condizionato con i Prodotti C+E

Per riassumere ciò che è stato ricavato con le prove di taglio e fornire informazioni che siano di rapida lettura, i risultati ottenuti in termini di rapporto della coesione e di rapporto della tangente dell'angolo di attrito tra terreno condizionato e naturale, sono stati raggruppati rispettivamente in due grafici, *Figura 5.51* e *Figura 5.52*, di seguito mostrate.

In questa maniera si dispone di un diagramma che racchiude sia il confronto di ogni terreno condizionato con i diversi agenti rispetto al terreno naturale, sia un chiaro raffronto tra il comportamento dei differenti condizionamenti evidenziato nel tempo.

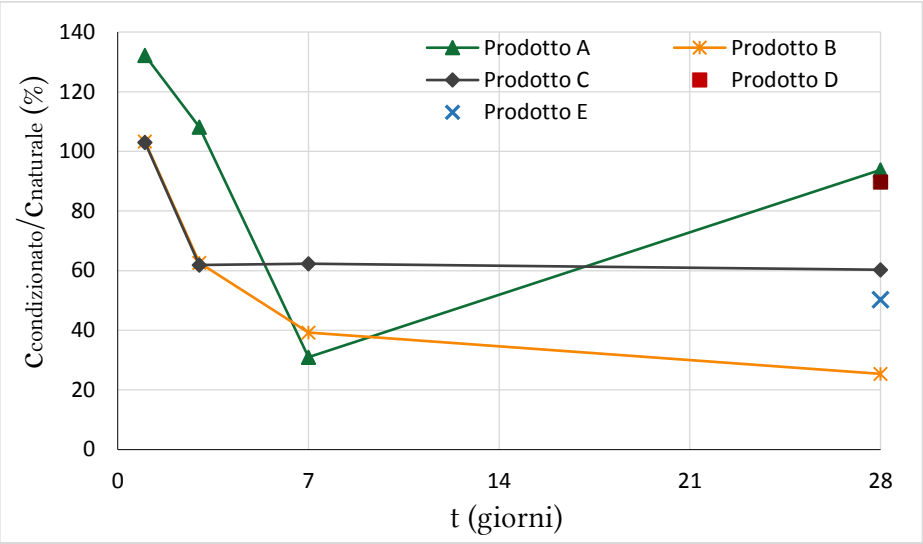


Figura 5.51 - Sintesi dei risultati delle prove di taglio diretto ai vari giorni in termini di coesione

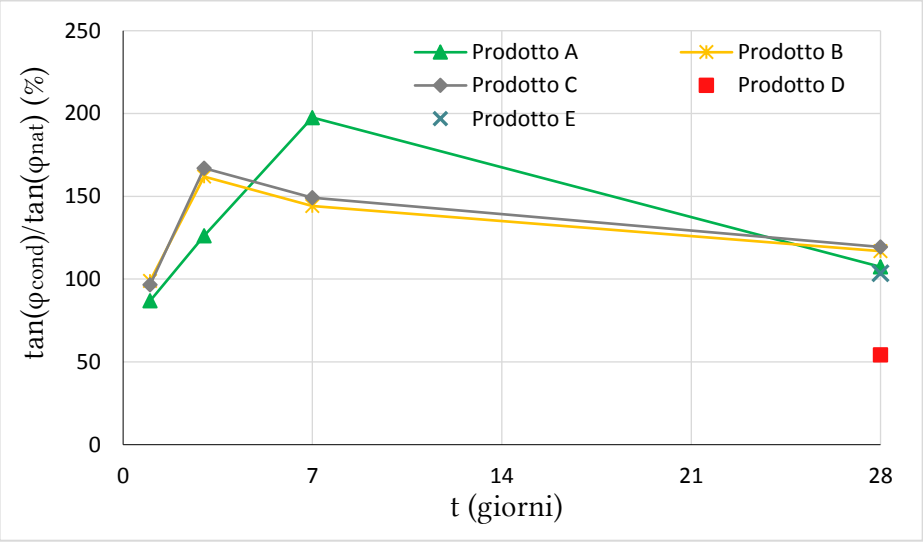


Figura 5.52 - Sintesi dei risultati delle prove di taglio diretto ai vari giorni in termini di angolo d'attrito

5.6.1 Commenti sui risultati delle prove di taglio diretto

Si osserva che a breve termine (1 giorno) l'angolo di attrito è pressoché uguale al valore del terreno naturale. Dopodiché le prove hanno restituito un consistente incremento di questo parametro che però poi tende a ritornare, dopo 28 giorni, prossimo al valore calcolato in origine sul terreno naturale.
Questo comportamento si riscontra per tutti e tre i campioni di terreno condizionati solamente con agenti schiumogeni.

Invece nei due condizionamenti che hanno previsto l'aggiunta alla schiuma rispettivamente di bentonite e di un polimero l'unico dato di cui si dispone è quello relativo ai 28 giorni di riposo, causa la lunga consolidazione richiesta nei giorni precedenti che ha impossibilitato la conduzione di una prova che fosse significativa in termini di caratteristiche di resistenza a taglio.
L'unico dato mostra che per il condizionamento con aggiunta del polimero il valore di angolo di attrito è molto simile a quello ottenuto con gli schiumogeni e quindi pure a quello del terreno naturale, invece nel caso di condizionamento con aggiunta di bentonite il valore registrato per tale parametro è più basso e si attesta all'incirca al 50% del valore naturale.

Per quanto riguarda la coesione, invece, i valori tendono a scendere drasticamente fin da subito e con il tempo tale fenomeno tende ad attenuarsi. Tale situazione riguarda i Prodotti B, C ed E mentre per il Prodotto A, nonostante anch'esso subisse un iniziale brusco decadimento, si nota a 28 giorni una marcata risalita.
Ugualmente per il condizionamento con i Prodotti C+D il cui unico dato disponibile riporta una coesione a 28 giorni prossima al 90% di quella posseduta dal terreno naturale. Anche per il condizionamento con i Prodotti C+E si è potuto ricavare un unico dato a 28 giorni ma tale valore si attesta solo al 50% della coesione naturale.

Si rende necessario sottolineare che i valori di angolo di attrito e di coesione determinati non sono relativi ai terreni "*Tagliato al 20*" e "*Grossolano*" ma al passante a 4,75 mm da essi ricavato.

Questo implica che la coesione dei terreni in analisi è molto minore rispetto ai valori forniti dalle prove di taglio e ne deriva che questa assume un'importanza ridotta paragonata alla componente attritiva.

In virtù di questa precisazione, quindi, il contributo della coesione che è emerso dalla campagna di prove deve essere ridimensionato in conseguenza della frazione granulometrica più fine utilizzata per eseguire le prove rispetto a quella dei terreni realmente indagati.

5.7 Risultati prove Proctor

La prova Proctor è stata eseguita secondo la procedura modificata *AASHTO T193*, utilizzando esclusivamente la frazione granulometrica passante ai 20 mm e impiegando il metodo B, ovvero quello che prevede l'impiego della fustella di maggiori dimensioni come già descritto al *Paragrafo 5.1.5.*

L'attrezzatura con cui sono state compiute le prove è stata resa disponibile presso il" Laboratorio di strade, ferrovie ed aeroporti" del Politecnico di Torino e viene mostrata in Figura 5.53:

Figura 5.53 - Attrezzatura utilizzata per lo svolgimento delle prove Proctor

Le modalità in cui è stata condotta questa prova all'interno dell'indagine e gli scopi ad essa attribuiti sono stati in precedenza delineati nel *Paragrafo 5.1.5.1*

La prova è stata fatta sul terreno naturale utilizzando diversi contenuti d'acqua in modo da costruire la curva a campana Proctor caratteristica del terreno.

Al fine di valutare l'influenza del condizionamento sulla possibilità di costipare il terreno sono state eseguite, per ognuno dei cinque agenti condizionanti, una serie di prove Proctor modificata a 3 e 28 giorni dal condizionamento e i risultati, in termini di contenuto d'acqua e densità secca, sono stati sovrapposti alla campana ricavata per il terreno naturale.

- **Terreno naturale**

w (%)	3,3	4,5	5,6	6,9	8,1
γ_d (g/cm^3)	2,61	2,65	2,62	2,58	2,49

Tabella 5.30 - Risultati prova Proctor sul terreno naturale

- **Prodotto A**

Giorni	3	28
w (%)	Prova a rifiuto	4,1
γ_d (g/cm^3)	Prova a rifiuto	2,63

Tabella 5.31 - Risultati prova Proctor con il Prodotto A

- **Prodotto B**

Giorni	3	28
w (%)	Prova a rifiuto	4,0
γ_d (g/cm^3)	Prova a rifiuto	2,63

Tabella 5.32 - Risultati prova Proctor con il Prodotto B

- **Prodotto C**

Giorni	3	28
w (%)	Prova a rifiuto	5,1
γ_d (g/cm^3)	Prova a rifiuto	2,64

Tabella 5.33 - Risultati prova Proctor con il Prodotto *C*

- **Prodotto C+D**

Giorni	3	28
w (%)	Prova a rifiuto	Prova a rifiuto
γ_d (g/cm^3)	Prova a rifiuto	Prova a rifiuto

Tabella 5.34 - Risultati prova Proctor con il Prodotto C+D

- **Prodotto C+E**

Giorni	3	28
w (%)	Prova a rifiuto	Prova a rifiuto
γ_d (g/cm^3)	Prova a rifiuto	Prova a rifiuto

Tabella 5.35 - Risultati prova Proctor con il Prodotto C+E

In *Figura 5.54* sono riassunti i risultati delle prove Proctor modificata eseguite.

Come già spiegato nel *Paragrafo 5.1.5.1,* sui terreni condizionati non si è costruita la curva a campana perché questo avrebbe richiesto la modifica del contenuto di acqua posseduto ai giorni designati per lo svolgimento della prova.

Essendo questo un parametro che condiziona fortemente il comportamento del materiale condizionato, non sarebbe stato corretto intervenire su di esso perché i risultati derivanti non sarebbero stati veritieri delle effettive condizioni, in termini di efficienza nell'essere costipato, del terreno in quel momento.

Ai fini dello studio, infatti, è stato ritenuto sufficiente e più opportuno sovrapporre alla curva del terreno naturale i valori di densità secca ottenuti con i diversi condizionamenti a 3 e 28 giorni, conservando la percentuale di acqua contenuta.

Si è deciso di operare con questa procedura in modo da far risaltare se la densità secca γ_d raggiungesse i valori originali ricavati sul terreno naturale e con quale quantitativo di contenuto d'acqua lo facesse.

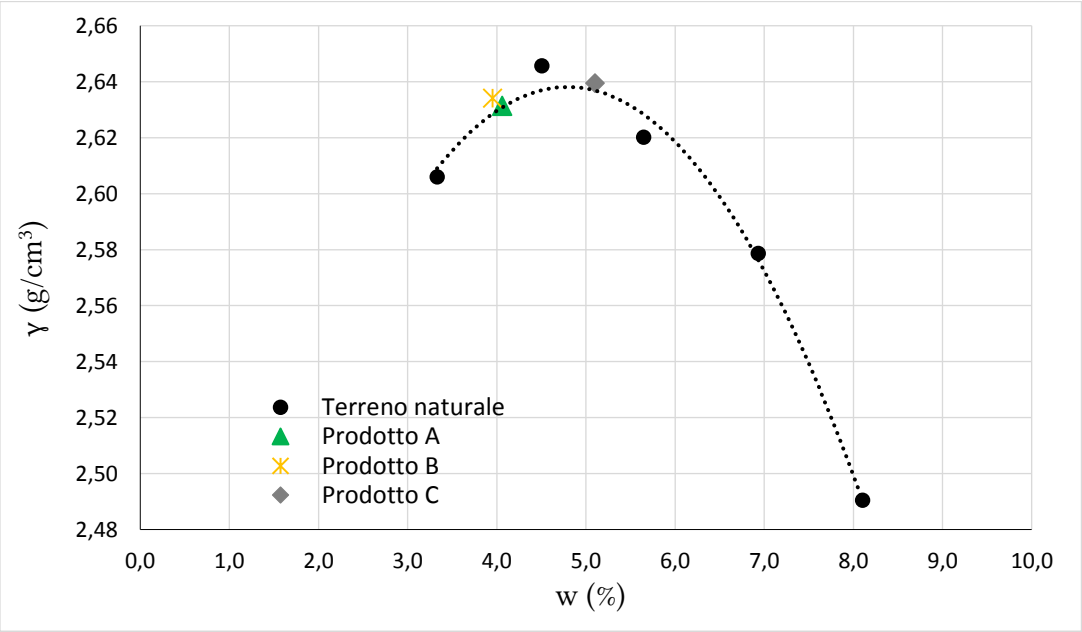


Figura 5.54 - Sintesi dei risultati delle prove Proctor

5.7.1 Commenti sui risultati delle prove Proctor

A tre giorni di maturazione nessuno dei cinque condizionamenti sperimentati permette di eseguire una prova Proctor modificata, ossia il terreno rifluisce attorno al pestello senza produrre effetti di costipamento, infatti non si riscontra un aumento della densità. Una foto di una delle prove andate a rifiuto a tre giorni a titolo di esempio è riportata in *Figura 5.55*:

Figura 5.55 - Esempio di una prova Proctor a rifiuto dopo tre giorni

Come si può notare dalla sagoma creatasi nel terreno, l'effetto delle cadute in successione del pestello non provoca un effetto di addensamento progressivo sul materiale ma bensì solo uno spostamento di questo ai sui lati.

Le prove a 28 giorni eseguite per i Prodotti A, B e C hanno condotto a risultati praticamente coincidenti in termini di densità secca raggiunta con il terreno non condizionato e anche il contenuto di acqua per il quale si è misurato tale valore è molto prossimo all'optimum Proctor (w_{opt}) del materiale al naturale.

Al contrario le prove condotte sui campioni condizionati con i Prodotti C+D ed i Prodotti C+E, vanno a rifiuto non consentendo la compattazione nemmeno dopo 28 giorni di maturazione, come mostrato nell'esempio di *Figura 5.56*:

Figura 5.56 - Esempio di una prova Proctor a rifiuto dopo 28 giorni

Questo è da ricondursi all'aggiunta di materiale fine come la bentonite e il polimero che conferiscono al terreno un comportamento eccessivamente plastico per i scopi di costipamento che vengono valutati attraverso la prova Proctor.

6 Conclusioni

In questo caso studio si sono valutati gli effetti prodotti sulle caratteristiche meccaniche del terreno condizionato, ed in particolare si è valutato come tali caratteristiche si modifichino con il degradarsi del condizionante al passare del tempo a partire dal momento in cui viene applicato nel terreno.

L'obiettivo è stato quello di comprendere se e dopo quanto tempo dal condizionamento il terreno riuscisse a recuperare caratteristiche tali da poter consentire un suo abbancamento per lo stoccaggio oppure un suo successivo riutilizzo come materiale per la costruzione di rilevati ed opere in terra.

Nel presente lavoro di tesi, a questo scopo, è stata condotta presso il "Laboratorio di Gallerie ed Opere in sotterraneo" del Politecnico di Torino una campagna di ricerca costituita da: prove di slump, prove con miscelatore torsionale, prove scissometriche, prove di taglio diretto e prove Proctor.

Tali prove sono state eseguite su campioni di terreno condizionati con i cinque differenti prodotti presi in considerazione da questo studio e sono state effettuate a prestabiliti giorni di distanza dal momento del condizionamento.

I valori ricavati sui terreni condizionati sono stati poi rapportati con quelli ottenuti eseguendo una identica prova sul terreno naturale, avente un contenuto d'acqua uguale a quello presentato dal terreno condizionato nel momento in cui è stato sottoposto alla prova

I risultati hanno evidenziato che il terreno condizionato con i tre tensioattivi denominati Prodotto A, Prodotto B e Prodotto C, e lasciato a riposo senza movimentazione, tende a recuperare i parametri meccanici naturali, a parità di contenuto d'acqua, dopo circa 7 giorni dall'applicazione del condizionamento. Tale risultato viene ulteriormente confermato dalle prove eseguite a 28 giorni dove in particolare i valori di densità secca ottenuti con la prova Proctor sono praticamente coincidenti con la curva costruita per il terreno naturale.

L’unico parametro che si discosta da questo trend di recupero è la coesione determinata tramite prova di taglio diretto che però si ricorda essere stata effettuata su una frazione di terreno vagliata a 4,75 mm come previsto da normativa e che quindi costituisce solo una parte del terreno denominato “Tagliato ai 20 mm” che è stato studiato con le altre prove.

Per quanto concerne invece i restanti Prodotto D e Prodotto E, i quali sono rispettivamente uno slurry bentonitico e uno slurry polimerico, entrambi utilizzati nel condizionamento assieme al tensioattivo Prodotto C, i risultati hanno evidenziato che solo dopo 28 giorni, e tra l’altro solo parzialmente, si presentano caratteristiche simili a quelle naturali.

Infatti si sono ricavati risultati simili a quelli del terreno naturale solamente per quanto riguarda la resistenza scissometrica, la coppia torcente misurata con il miscelatore torsionale eseguita per questi due condizionamenti sul terreno denominato “Grossolano”, l’angolo d’attrito per il condizionamento con i Prodotti C+E e la coesione per il terreno condizionato con i Prodotti C+D, questi ultimi due calcolati dalle prove di taglio diretto eseguite anche in questo caso sulla frazione granulometrica passante al setaccio da 4,75 mm

Invece non è stato possibile compattare il terreno per l’esecuzione della prova Proctor né a 3 giorni né a 28 giorni e anche il risultato della prova di slump a 28 giorni fornisce un confronto visivo che risalta una certa differenza tra la consistenza del terreno naturale e quella dei terreni condizionati.

Bibliografia

A.F.T.E.S. (2000). “New recomendation of choosing mechanized tunneling techniques”

ASTM (2006). Standard test method for permeability of granular soils (constant head). ASTM D2434-06, ASTM International, West Conshohocken, PA, USA.

ASTM D698 (2007). Standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil, ASTM International, West Conshohocken, PA, USA

ASTM D2216 (2010). Standard Test Methods for Laboratory Determination of Water (Moisture) Content of Soil and Rock by Mass

ASTM (2011). Standard test method for direct shear test of soils under consolidated drained conditions. ASTM D3080-11, ASTM International, West Conshohocken, PA, USA.

ASTM (2015a). Standard test method for slump of hydraulic-cement concrete. ASTM C143-15a, ASTM International, West Conshohocken, PA, USA.

ASTM(2015b). Standard test method for field vane shear test insaturated fine-grained soils. ASTM D2573-15, ASTM International, West Conshohocken, PA, USA.

ASTM (2016). Standard test methods for laboratory miniature vane shear test for saturated fine-grained clayey soil. ASTM D4648-16, ASTM International, West Conshohocken, PA, USA.

Baglieri, O. (2016). Appunti dal corso di “Costruzione di Strade, Ferrovie Ferrovie ed Aeroporti”, Politecnico di Torino.

Barbero,M.,Peila,D.,Picchio,A.,Chieregato,A.,Bozza,F.,andMignelli,C.(2012). Procedura sperimentale per la valutazione dell’effetto del condizionamento del terreno sull’abrasione degli utensili nello scavo con EPB. Geoingegneria Ambientale e Mineraria, 135(1):13–19.

Bjerrum, L. (1973). Problems of soil mechanics & construction on soft clays. Proceedings, 8th International Conference on Soil Mechanics & Foundation Engineering, Vol. 3, Session 4, Moscow, 111-159.

Borio, L. (2010). Soil conditioning for cohesionless soils. PhD thesis, Politecnico di Torino.

Borio L., Peila D. (2011) – “Laboratory test for EPB tunnelling assessment: results of test campaign on two different granular soils”. Gospodarka Surowcami Mineralnymi, 27:85-100.

EFNARC, “Specification and guidelines for the use of specialist products for Mechanised Tunnelling (TBM) in Soft Ground and Hard Rock”, 2005.

Fratta,D.,Aguettant,J.,andRoussel-Smith,L.(2007).IntroductiontoSoilMechanics Laboratory Testing. CRC Press, London.

Guglielmetti, V., Grasso, P., Mahtab, A., Xu, S., 2008. Mechanized Tunnelling in Urban Areas: Design methodology and construction control. CRC Press.

Herrenknecht, M.,Thewes, M.,and Budach,C.(2011). The development of earth pressure shields: from the beginning to the present/Entwicklung der Erddruckschilde: Von den Anfängen bis zur Gegenwart. Geomechanics and Tunnelling, 4(1):11–35.

E. Hoek, Vancouver, BC, Canada; Babendererde, Babendererde Engineers LLC, Kent, WA; P.G. Marinos, National Technical University of Athens, Athens, Greece; and A.S. Cardoso, Universidade do Porto, Porto, Portugal. (2005) “EPB-TBM Face Support Control in the Metro do Porto, Portugal” Project Proceedings Rapid Excavation & Tunneling Conference, Seattle.

Karimpour Fard, M., Jamshidi Chenari, R., Soheili, F. (2015). “Shear Strength Characteristics of Sand Mixed with Eps Beads Using Large Direct Shear Apparatus”, Electronic Journal of Geotechnical Engineering.

Kawasaki (2009),“Tunnel Boring Machines (Shield & TBM)”

Kupferroth, F., Ellenberger, P., and Bo Anders, K. (2001). The use of foams and polymers in earth pressure balanced TBMs. Degussa Construction Chemicals Underground Construction Group, Switzerland.

Langmaack L. (2000),“Advanced technology of soil conditioning in EPB shield tunneling”, TBM Project Manager, MBT International, Zurich (CH)

Bernhard Maidl, Martin Herrenknecht, Ulrich Maidl, Gerhard Wehrmeyer, David S. Sturge.(2012) ”Mechanised Shield Tunnelling”, 2nd Edition-ISBN: 978-3-433-02995-4

Martinelli, D., Peila, D., and Campa, E. (2015). Feasibility study of tar sands conditioning for earth pressure balance tunnelling. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 7(6):684–690.

Martinelli, D. (2016). “Mechanical behaviour of conditioned material for EPBS tunnelling” PhD thesis, Politecnico di Torino

Martinelli D., Todaro C., Luciani A., Peila L., Carigi A., Peila D. (2018)- “Moderno approccio per lo studio del condizionamento dei terreni granulari non coesivi per lo scavo con macchine EPB”. Gallerie e grandi opere sotterranee, n. 128 – dicembre 2018.

Merritt, A., Jefferis, S., Storry, R., and Brais, L. (2013). Soil conditioning laboratory trials for the Port of Miami Tunnel, Miami, Florida, USA. In Anagnostou, G. and Ehrbar, H., editors, World Tunnel Congress 2013. Geneva CH, pages 1328–1335. Taylor&Francis, London.

Messerklinger, S., Zumsteg, R., and Puzrin, A. (2011). A new pressurized vane shear apparatus. Geotechnical Testing Journal, 34(2):1.

Milligan, G. (2000). State-of-the-art review: Lubrification and Soil Conditioning. Technical report, Geotechnical Consulting Group.

Oñate Salazar, C. G., Martinelli, D., Todaro, C., and Peila, D. (2016). Study of wear in conditioned granular soil by using a new test device. In World Tunnel Congress 2016, San Francisco, USA, 25–27 April 2016.

Orabi, A. IUST 2 Das, B., M. (2014), " Principles of geotechnical Engineering " Eighth Edition, CENGAGE Learning, ISBN-13: 978-0-495-41130-7

Peila D., Vinai R., Oggeri C. "Soil conditioning of sand for EPB applications: A laboratory research", 2008, Tunnelling and Undergroung Space Technology 23 (2008) 308-317;

Peila, D., Oggeri, C., and Borio, L. (2009). Using the slump test to assess the behavior of conditioned soil for EPB tunneling. Environmental & Engineering Geoscience.

Peila, D., Borio,L., Pelizza, S.(2011). The behaviour of a two-component backfilling grout used in a Tunnel-Boring Machine. ACTA GEOTECHNICA SLOVENICA.

Peila, D. (2018). Appunti dal corso di "Tunneling", Politecnico di Torino.

Salahudeen, A.D., Ijimdiya, T., Oshioname Eberemu, A., Osinubi, K.J. (2018). "Artificial Neural Networks Prediction of Compaction Characteristics of Black Cotton Soil Stabilized with Cement Kiln Dust"

Thewes, M. (2009): Bentonite slurry shield machines In: de Pérez Ágreda, Eduardo Alonso; de Álvarez Toledo, Marcos Arroyo (Eds.): Operación y mantenimiento de escudos: presente y futuro. Barcelona, Universitat politécnica de Catalunya, 2009.

Vinai, R., Peila D., Oggeri, C., (2007) – "Screw conveyor device for laboratory tests on conditioned soil for EPB tunneling operations". Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 133(12): 1622-1625.

Vinai, R., Borio, L., Peila, D., Oggeri, C., and Pelizza, S. (2008). Soil conditioning for EPB Tunnelling. T & T international, 12.

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