POLITECNICO DI TORINO

Facoltà di Ingegneria

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Civile

CONDIZIONAMENTO DI TERRENI ALLUVIONALI PER SCAVO CON TBM DI TIPO EPB

Tesi di Laurea Magistrale

Candidato:

Andrea Carigi

Relatore:

Prof. Daniele Peila

Correlatori:

Ing. Andrea Luciani

Ing. Carmine Todaro

A.A. 2016/2017

ndice dei contenuti

1 Introduzione 10

2 Tecnologia EPB 11

2.1 Storia dello scavo meccanizzato 11

2.2 Slurry shield 14

2.3 Earth Pressure Balance shields (EPBs) 15

2.4 Struttura di una TBM di tipo EPBs 16

3 Condizionamento dei terreni 23

3.1 Agenti condizionanti 23

3.2 Schiumogenia 23

3.2.1 Parametri della schiuma 24

3.3 Test di semivita 25

3.4 Slump test 25

3.4.1 Riferimenti di letteratura 26

3.4.2 Modalità di esecuzione della prova 28

3.4.3 Vantaggi e limiti 29

3.5 Screw Conveyor Device Test 30

4 Caso studio 31

4.1 Proprietà dei terreni in analisi 31

4.1.1 Provenienza dei terreni 31

4.1.2 Procedura di caratterizzazione 31

4.1.3 Caratterizzazione del contenuto d’acqua 32

4.1.4 Caratterizzazione granulometrica 35

4.1.5 Foam Injection Ratio 38

4.1.6 FIR reale 39

4.1.7 Semivita 40
4.1.8 Polimeri 41
4.2 Costituzione delle miscele 41
5 Prove di slump 42
5.1 Campagna di prove 42
5.2 Risultati 43
5.2.1 Produttore A 43
5.2.2 Produttore B 46
6 Prove Tilt Sliding Test (TST) 50
6.1.1 Descrizione della prova 51
6.1.2 Costruzione di un criterio di valutazione 55
6.2 Risultati 63
6.2.1 Prima fase di sperimentazione 63
6.2.2 Confronto dei risultati della prima fase 79
6.2.3 Seconda fase 89
6.3 Interpretazione dei risultati 98
7 Conclusioni 101
8 Bibliografia 103

Indice delle figure

Figura 1- Teredo Navalis, un mollusco noto per le problematiche create a strutture lignee in mare. 11
Figura 2 – Tipologie di condizionamento più diffuse per vari range di granulometrie del terreno (da Peila – Materiale didattico del corso di Tunnelling, A.A. 2016-2017) 16
Figura 3 – Utensili da scavo. 17
Figura 4 – Schema delle pressioni al fronte di scavo 17
Figura 5 – Testa di scavo 18
Figura 6 – Cuscinetto reggispinta 19
Figura 7 – Articolazioni attive 19
Figura 8 – Trasportatore a coclea 20
Figura 9 – Camera iperbarica 21
Figura 10 – Pistoni di spinta 22
Figura 11 – Erettore dei conci 22
Figura 12 – Effetti dei tensioattivi sul terreno 24
Figura 13 – Classificazione dei tensioattivi 24
Figura 14 – Cono di Abrams 25
Figura 15 – Schema di riferimento per la classificazione del risultato del condizionamento 29
Figura 16 – Contenuto d'acqua al variare della posizione della falda 35
Figura 17 – Curve granulometriche dei campioni, frazione passante ai 30 mm 36
Figura 18 – Curva granulometrica del terreno, frazione trattenuta al 30 mm 37
Figura 19 – Curva granulometrica del terreno 38
Figura 20 – Generatore di schiuma e relativa rappresentazione sintetica 40
Figura 21 – Movimento del terreno scavato all'interno della camera di scavo 50
Figura 22 – Attrezzatura per prova TST, vista frontale e dall'alto con quote principali 51
Figura 23 – Attrezzatura per prova TST, vista laterale in configurazione di piano orizzontale e inclinato con quote principali 51
Figura 24 – Attrezzatura per prova TST, vista frontale 52
Figura 25 – Attrezzatura per prova TST, vista laterale 52
Figura 26 – Attrezzatura per prova TST, vista dall'alto 53
Figura 27 – Procedura della prova TST 55
Figura 28 – Grafico interpretativo della prova TST, condizioni di scorrimento omogeneo 56
Figura 29 – Grafico interpretativo della prova TST, comportamento omogeneo con scorrimento rapido a 25° 57

Figura 30 - Grafico interpretativo della prova TST, comportamento omogeneo con scorrimento rapido a 35° 57
Figura 31 – Grafico interpretativo della prova TST, comportamento disomogeneo con scorrimento della pasta che precede il moto dei ciottoli 58
Figura 32 – Grafico interpretativo della prova TST, comportamento disomogeneo con moto dei ciottoli che precede lo scorrimento della pasta 58
Figura 33 – Schema di ricostituzione del Terreno A 59
Figura 34 – Confronto tra curva granulometrica originale e del Terreno A 59
Figura 35 - Schema di ricostituzione del Terreno B 60
Figura 36 - Confronto tra curva granulometrica originale e del Terreno B 60
Figura 37 – Risultati TST01_m15ϕ030_w10_FIR30_p15t00 63
Figura 38 – Risultati TST02_m26ϕ100_w10_FIR30_p15t00 64
Figura 39 – Risultati TST03_m26ϕ100_w12_FIR30_p00t00 65
Figura 40 - Risultati TST04_m26ϕ100_w12_FIR30_p15t00 66
Figura 41 – Risultati TST05_m26ϕ100_w12_FIR30_p15t20 67
Figura 42 - Risultati TST06_m26ϕ100_w10_FIR20_p25t00 68
Figura 43 - Risultati TST07_m26ϕ100_w10_FIR45_p50t00 69
Figura 44 - Risultati TST08_m40ϕ100_w12_FIR00_p00t00 70
Figura 45 - Risultati TST09_m40ϕ100_w12_FIR30_p00t00 71
Figura 46 - Risultati TST10_m26ϕ055_w12_FIR00_p00t00 72
Figura 47 Risultati TST11_m26ϕ055_w12_FIR30_p00t00 73
Figura 48 - Risultati TST12_m26ϕ055_w12_FIR30_p15t00 74
Figura 49 - Risultati TST13_m26ϕ055_w12_FIR30_p30t00 75
Figura 50 - Risultati TST14_m26ϕ055_w12_FIR30_p15t60 76
Figura 51 - Risultati TST15_m26ϕ055_w12_FIR30_p30t60 77
Figura 52 - Risultati TST16_m40ϕ100_w12_FIR30_p15t00 78
Figura 53 – Influenza dell'acqua sulla percentuale di ciottoli in vasca, confronto tra le prove TST2 e TST4 79
Figura 54 - Influenza dell'acqua sullo scorrimento della pasta, confronto tra le prove TST2 e TST4 80
Figura 55 - Influenza del polimero sulla percentuale di ciottoli in vasca, confronto tra le prove TST3 e TST4 80

Figura 56 - Influenza del polimero sullo scorrimento della pasta, confronto tra le prove TST3 e TST4.....81
Figura 57 - Influenza del condizionamento sulla percentuale di ciottoli in vasca, confronto tra le prove TST10, TST11, TST12 e TST13 81
Figura 58 - Influenza del condizionamento sullo scorrimento della pasta, confronto tra le prove TST10, TST11, TST12 e TST13 82
Figura 59 - Influenza del condizionamento sulla percentuale di ciottoli in vasca, confronto tra le prove TST8, TST9 e TST16 82
Figura 60 - Influenza del condizionamento sullo scorrimento della pasta, confronto tra le prove TST8, TST9 e TST16.....83
Figura 61 – Influenza del tempo sulla percentuale di ciottoli in vasca, confronto tra le prove TST4 e TST5.....83
Figura 62 - Influenza del tempo sullo scorrimento della pasta, confronto tra le prove TST4 e TST5 84
Figura 65 - Influenza del tempo sulla percentuale di ciottoli in vasca, confronto tra le prove TST 12 e TST14.....84
Figura 64 - Influenza del tempo sullo scorrimento della pasta, confronto tra le prove TST 12 e TST14.....85
Figura 63 - Influenza del tempo sulla percentuale di ciottoli in vasca, confronto tra le prove TST 13 e TST15.....85
Figura 66 - Influenza del tempo sullo scorrimento della pasta, confronto tra le prove TST13 e TST15.....85
Figura 67 - Influenza della massa del campione sulla percentuale di ciottoli in vasca di raccolta, confronto tra le prove TST3 e TST9.....86
Figura 68 - Influenza della massa del campione sullo scorrimento della pasta, confronto tra le prove TST3 e TST9.....86
Figura 69 - Influenza della massa del campione sulla percentuale di ciottoli in vasca di raccolta, confronto tra le prove TST4 e TST16.....87
Figura 70 - Influenza della massa del campione sullo scorrimento della pasta, confronto tra le prove TST4 e TST16.....87
Figura 71 – Influenza del diametro massimo dei ciottoli sulla percentuale di ciottoli in vasca di raccolta, confronto tra le prove TST3 e TST11 88
Figura 72 – Influenza del diametro massimo dei ciottoli sullo scorrimento della pasta, confronto tra le prove TST3 e TST11.....88

Figura 73 – Influenza del condizionamento sulle quantità di ciottoli e di pasta in vasca di raccolta, confronto tra le prove TST10, TST11, TST12 e TST13 98
Figura 74 - Influenza del condizionamento sulle quantità di ciottoli e di pasta in vasca di raccolta, confronto tra le prove TST8, TST9 e TST16 99
Figura 75 - Influenza del tempo sulle quantità di ciottoli e di pasta in vasca di raccolta, confronto tra le prove TST12 e TST14 99
Figura 76 - Influenza del tempo sulle quantità di ciottoli e di pasta in vasca di raccolta, confronto tra le prove TST13 e TST15 100

Indice delle tabelle

Tabella 1 – Campioni in arrivo 31
Tabella 2 – Caratterizzazione del contenuto d'acqua dei campioni in arrivo 32
Tabella 3 – Caratterizzazione del contenuto d'acqua dopo quartatura 33
Tabella 4 – Parametri del suolo 34
Tabella 5 – Suddivisione per classi di peso, frazione trattenuta al 30 mm 37
Tabella 6 – Semivita delle schiume utilizzate 41
Tabella 7 – Prove di slump con Produttore A 42
Tabella 8 – Prove di slump con Produttore B, schiumogeno 1 43
Tabella 9 – Prove di slump con Produttore B, schiumogeno 2 – La prova 8 B2 è stata eseguita a 20 minuti dall'aggiunta del polimero 43
Tabella 10 – Slump test 1 A 43
Tabella 11 – Slump test 2 A 44
Tabella 12 – Slump test 3 A 44
Tabella 13 – Slump test 4 A 44
Tabella 14 – Slump test 5 A 45
Tabella 15 – Slump test 6 A 45
Tabella 16 – Slump test 7 A 45
Tabella 17 – Slump test 8 A 46
Tabella 18 – Slump test 1 B1 46
Tabella 19 – Slump test 2 B2 47
Tabella 20 – Slump test 3 B2 47
Tabella 21 – Slump test 4 B2 47
Tabella 22 – Slump test 5 B2 48
Tabella 23 – Slump test 6 B2 48
Tabella 24 – Slump test 7 B2 48
Tabella 25 – Slump test 8 B2 49
Tabella 26 - Condizionamento dei campioni nella seconda fase delle prove TST 62
Tabella 27 – Report sintetico prova TST8 89
Tabella 28 – Report sintetico prova TST9 90
Tabella 29 – Report sintetico prova TST10 91
Tabella 30 – Report sintetico prova TST11 92
Tabella 31 – Report sintetico prova TST12 93

Tabella 32 – Report sintetico prova TST13 94
Tabella 33 – Report sintetico prova TST14 95
Tabella 34 – Report sintetico prova TST15 96
Tabella 35 – Report sintetico prova TST16 97

1 Introduzione

Le macchine da scavo EPB (Earth Pressure Balance) vengono utilizzate per lo scavo di gallerie in una grande varietà di tipologie di suolo, grazie alla versatilità fornita dall'uso di agenti condizionanti. Questi modificano le proprietà del suolo scavato rendendolo plastico e permettondone un flusso omogeneo dalla camera di scavo attraverso l'estrattore a coclea. Inoltre, la presenza del materiale in camera di scavo, permette di controllare in modo ottimale la pressione al fronte, previene l'instaurazione di moti di filtrazione, riduce il momento torcente da applicare durante lo scavo e riduce l'usura degli utensili.
Al fine di verificare se un terreno può essere condizionato o meno è vivamente raccomandata l'esecuzione di prove di laboratorio. Questi test sono mirati a determinare quali tipologie e in quali quantità di agenti condizionanti (principalmente schiume e polimeri) permettono di ottenere un risultato ottimale.

Nel presente lavoro di tesi si analizza l'applicabilità della tecnologia EPB per lo scavo di una galleria metropolitana in zona urbana. A tale scopo sono eseguite prove di slump al fine di determinare il condizionamento ottimale.
Altresì si sono analizzate le caratteristiche degli agenti condizionanti con prove di laboratorio di semivita.
Inoltre, il terreno analizzato presenta una problematica specifica costituita dalla presenza di elementi lapidei di dimensione decimetrica che potrebbero sedimentare in camera di scavo e rendere non performante la tipologia di macchina EPB.
Al fine di valutare l'effettiva influenza di questi elementi sull'efficienza dello scavo con EPB, si sviluppa una prova di laboratorio che mira a valutare la qualità delle interazioni tra le masse del terreno condizionato e gli elementi lapidei più grandi.
E si propongono dei criteri di valutazione per la capacità di trasporto del terreno condizionato nei confronti degli elementi più grossolani.

2 Tecnologia EPB

2.1 Storia dello scavo meccanizzato

Il Teredo Navalis, riportato in Figura 1, è un mollusco che probabilmente non può essere considerato il precursore dello scavo meccanizzato, ma molto probabilmente fornì l'ispirazione per questa tecnologia.

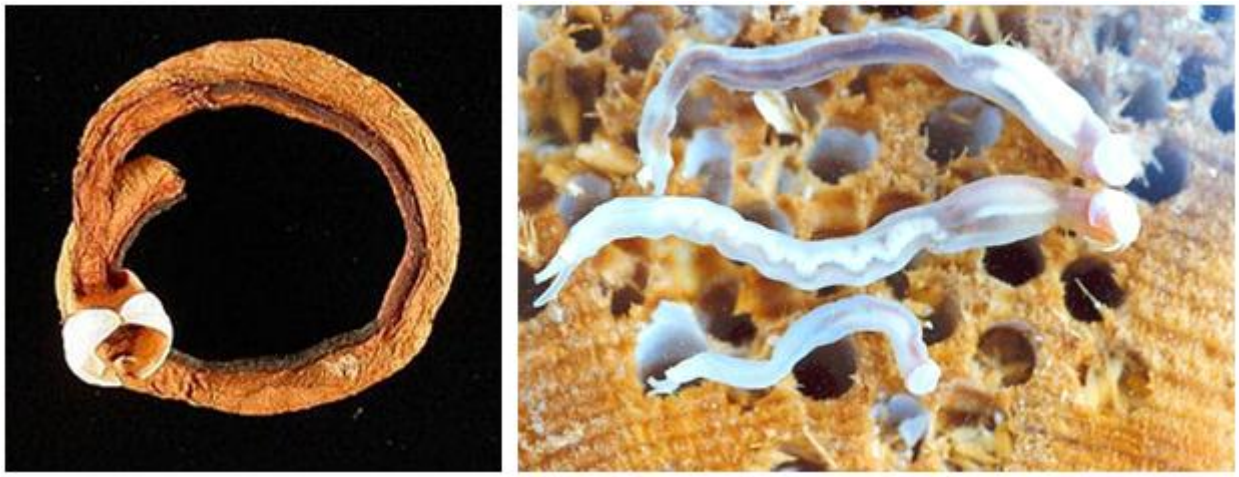


Figura 1- Teredo Navalis, un mollusco noto per le problematiche create a strutture lignee in mare.

Prima del 1800, in area urbana, la costruzione di gallerie era realizzabile solo tramite uno dei seguenti metodi:

- cut and cover;
- scavo con supporto di telai di legno e successivo rivestimento in muratura.

Questi metodi furono utilizzati con successo sia in terreni coesivi sia in terreni non coesivi, anche in presenza di limitate venute d'acqua ma, a causa dell'elevata permeabilità dei rivestimenti, mai sotto falda.
Osservando il Teredo Navalis scavare con le sue mascelle nel legno degli scafi e delle strutture marittime e, contemporaneamente, creare dietro di sé un rivestimento in materiale calcareo risultante dalla digestione, Sir Marc Isambard Brunel trovò l'ispirazione per la tecnologia che permise, per la prima volta, di costruire una galleria di sotto il fiume Tamigi, a Londra.
Nel 1818, Brunel registrò il brevetto della sua invenzione: la macchina da scavo scudata.

La galleria iniziò a essere scavata nel 1825, con una tipologia di scudi che non erano funzionali, i quali furono poi sostituiti con uno scudo rettangolare.
Stack (1982) descrisse lo scudo rettangolare utilizzato per il secondo tentativo di scavo che avvenne negli anni che vanno dal 1835 al 1843: era realizzato in ghisa, composto da 12 compartimenti organizzati su 3 livelli. Ciascun compartimento poteva muoversi in modo indipendente.
Lo scudo era largo 11.43 m, alto 6.78 m e lungo 2.47 m e l'avanzamento era ottenuto tramite una coppia di martinetti a vite ancorati al rivestimento già realizzato nelle sezioni precedenti. I 12 compartimenti venivano fatti avanzare uno alla volta; ogni avanzamento era al massimo di 15 cm. La produzione massima ottenuta con questa tecnologia è stata di 4.3 metri per settimana.
Visti i risultati ottenuti dalla macchina di Brunel, molti inventori proposero suggerimenti per incrementarne la produttività, la sicurezza e l'impermeabilità della macchina. Tra questi contributi sono degni di nota. Nel 1849, S. Dunn per la prima volta brevettò uno scudo in grado di avanzare come un unico pezzo, mentre P. W. Barlow, nel 1864, suggerì di riempire l'intercapedine tra il terreno e il rivestimento con una boiacca cementizia.

Qualche anno dopo, nel 1869, A. E. Beach e J. H. Greathead costruirono e usarono uno scudo equipaggiato con entrambe le tecnologie. Il primo lo realizzò per il Brodway pneumatic railway tunnel a New York e il secondo per il New Thames tunnel in Inghilterra.
In particolare Greathead scavò un nuovo tunnel sotto il Tamigi di lunghezza 402 m utilizzando uno scudo circolare di diametro 2.18 m.
Questo progetto fu realizzato senza troppe difficoltà grazie alla bassa permeabilità delle argille londinesi che evitarono venute d'acqua. Per sostenere lo scavo, per la prima volta furono istallate delle centine di acciaio anziché dei telai di legno. Questa soluzione divenne un modello per la maggior parte degli scudi costruiti in seguito.
I successivi miglioramenti delle macchine da scavo scudate furono mirati a incrementare la stabilità del fronte e a sviluppare un processo più industrializzato.

Nonostante il successo delle applicazioni della macchina scudata di Brunel, il problema del controllo delle venute d'acqua fu risolto con l'introduzione dei primi sistemi ad aria compressa.
Questa tecnica fu utilizzata per la prima volta nella costruzione dell'Antwerp Dock tunnel (1879) e, poi, nell'Hudson river tunnel, New York (1880).
In particolare, il tentativo fallimentare di usare solo un cassone pneumatico e aria compressa per lo scavo sotto l'Hutson portò a combinare le macchine da scavo scudate con la tecnologia ad aria

compressa. Questo rese possibile lo scavo di 1130 m di tunnel entro la metà del 1891 e molti altri tunnel negli anni successivi.
L'utilizzo di questa tecnologia, comunque, era ancora affetta da problemi. I principali erano dovuti alle condizioni di salute degli operai, in quanto questi dovevano muoversi velocemente e frequentemente da aree in pressione ad aree a pressione atmosferica. Inoltre, in gallerie di grandi dimensioni la pressione uniforme dell'aria non contrastava efficacemente la distribuzione lineare di pressione generata dall'acqua.

Solo alla fine degli anni cinquanta del '900 si arrivò a una soluzione che prevedeva l'utilizzo di un mezzo ad alta densità per applicare la pressione al fronte. Questo portò allo sviluppo delle moderne macchine Slurry ed EPB.

Per molto tempo, lo scavo e la rimozione dello smarino erano eseguiti manualmente, rendendo la realizzazione della galleria un processo lento e rischioso. Nel 1876, dopo molti anni di ricerca da parte di molti ingegneri, si individuò una soluzione che rendeva lo scavo un processo industrializzato. Il primo brevetto a riguardo fu registrato da J. Dickinson e G. Brunton nel 1876: questo venne successivamente migliorato dalle idee di F.O. Brown (1886), J.H. Greathead (1887-1889) e J.J. Robins (1893).
La prima macchina da scavo meccanizzata fu utilizzata nel 1896 da J. Price per lo scavo della Central London Railway Line. Secondo Stack (1982), la macchina di Price aveva una testa di scavo costituita da quattro bracci equipaggiati con taglienti e raschiatori per lo scavo e la raccolta del materiale. I raschiatori erano necessari per sollevare il materiale fino a farlo scivolare per gravità nei carrelli in attesa.
Questa successione di miglioramenti portò a ottenere produzioni fino a 55 metri/settimana.

A partire dal prototipo di Grethead, l'evoluzione di questo tipo di macchine da scavo si mosse velocemente verso le attuali tipologie di TBM, seguendo due strade principali: una per le macchine da roccia e l'altra per le macchine da terra.
Inizialmente, le macchine da roccia erano esclusivamente aperte, cioè senza scudo e i supporti temporanei erano in sostanza gli stessi utilizzati nello scavo convenzionale. Poi, per fronteggiare più efficacemente le eterogeneità che potevano trovarsi lungo il tracciato, furono aggiunti prima uno scudo singolo (con il quale è necessaria l'installazione del rivestimento a conci per sviluppare la spinta necessaria allo scavo) e successivamente uno scudo doppio (con il quale era possibile proseguire lo scavo anche senza l'installazione del rivestimento).

La scelta tra queste tre tipologie di macchine dipende dalla qualità del terreno lungo il tracciato della galleria.
Le macchine da terra sono sempre dotate di uno scudo. Nel tempo fu migliorato il sistema di stabilizzazione del fronte di scavo, in modo da controllare meglio e ridurre al minimo i rischi di eccessivi cedimenti in superficie e collassi del fronte.

Come già detto, per lo scavo in terra è necessario adottare delle misure atte a stabilizzare il fronte di scavo, in altre parole si deve applicare una pressione al fronte.

2.2 Slurry shield

Successivamente sono state sviluppate le Slurry shield, una nuova tipologia di macchine che permettono di applicare la pressione necessaria tramite una sospensione di bentonite in acqua.
In queste macchine tra il fronte e la testa di scavo è interposto del fango bentonitico al quale è affidato il compito di esercitare la contropressione necessaria alla stabilità. Grazie alle sue proprietà tissotropiche il fango bentonitico si presta molto bene allo scopo.

Il progetto della miscela deve essere eseguito caso per caso, infatti, al variare della granulometria dei terreni attraversati sarà necessaria una concentrazione di bentonite differente per formare uno strato continuo e impermeabile sul fronte tale da impedire la filtrazione del fango nel suolo.
Questo aspetto è di fondamentale importanza in quanto garantisce una pressione regolare nel tempo all'interno della camera di scavo.

Una volta che gli attrezzi da scavo rimuovono il terreno, questo e la bentonite che vi si era accumulata sono inviati tramite delle condutture a un impianto di separazione per il recupero della bentonite.
Questo processo avviene secondo una successione di vagli, centrifughe e separazioni chimiche.
Com'è facile immaginare, la separazione della bentonite dalle frazioni fini del terreno scavato è molto difficile. Inoltre questo processo è costoso, richiede spazio in cantiere ed è molto rumoroso.

Per via dell'elevato peso specifico del fango è difficile eseguire delle rapide regolazioni di pressione pompando il fluido nella o dalla camera di scavo. Per ovviare a questo problema le moderne slurry shield sono dotate di una camera di scavo divisa in due porzioni: quella anteriore è riempita di

fango in modo da applicare la pressione su tutto il fronte di scavo, mentre nella porzione inferiore si introduce dell'aria compressa che permette di regolare agevolmente la pressione esercitata dal fango.

Per questa tipologia di macchine, inoltre, si deve prevedere un frantumatore a mascella per rompere i blocchi che potrebbero ostruire le tubazioni di rimozione del fango.

2.3 Earth Pressure Balance shields (EPBs)

Dagli anni '70 si cominciò a valutare l'idea di utilizzare il terreno scavato per applicare la pressione al fronte. Questo accorgimento permise di rimuovere l'impianto di separazione della bentonite dal layout di cantiere riducendo costi e ingombri.
Da questa idea nascono in Giappone le Earth Pressure Balance shield (EPBs) che, allo stato attuale coprono circa l' 85-90% del mercato delle macchine da scavo TBM.

Vista la difficoltà nel realizzare un fango sufficientemente fluido da essere pompato, in queste macchine il terreno è rimosso dalla camera di scavo tramite un estrattore a coclea.
Per usare questo tipo di macchina in sabbie e ghiaia è necessario provvedere ad un condizionamento del terreno, principalmente realizzato aggiungendo schiuma e/o polimeri.

A differenza di quanto si è visto per le Slurry Shield nel caso delle EPB la camera di scavo è piena di materiale e il controllo della pressione è ottenuto regolando la velocità di estrazione in relazione alla velocità di scavo.
Inoltre, la coclea deve essere sempre piena di materiale in quanto in caso contrario non riuscirebbe a imporre un gradiente di pressione tale da garantire la pressione di esercizio su un lato e quella atmosferica dall'altro lato.

L'utilizzo di agenti condizionanti deve essere studiato caso per caso in modo da garantire un comportamento ottimale del materiale. In Figura 2 è possibile vedere quali sono delle indicazioni di massima al variare della granulometria.

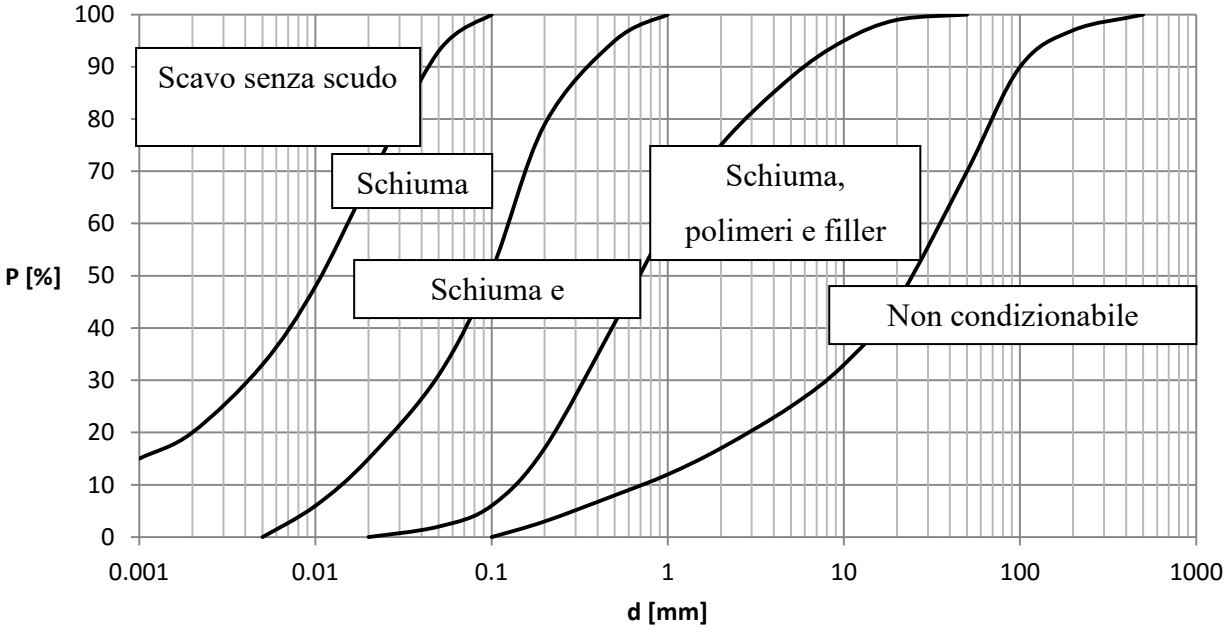


Figura 2 – Tipologie di condizionamento più diffuse per vari range di granulometrie del terreno (da Peila – Materiale didattico del corso di Tunnelling, A.A. 2016-2017)

Nel caso di scavo in argilla è necessario valutare la possibilità che questa aderisca alle parti metalliche della macchina o che formi blocchi tali da creare problemi alle operazioni di scavo e trasporto del terreno. Sarà quindi necessario individuare il rischio di adesione e, se questo dovesse essere elevato, intervenire con agenti disperdenti.

2.4 Struttura di una TBM di tipo EPBs

Le TBM di tipo EPB presentano l'indubbio vantaggio di non richiedere l'immissione in camera di scavo di un mezzo di supporto in quanto convertono il terreno scavato in un fango plastico idoneo a essere impiegato per applicare la pressione necessaria alla stabilizzazione del fronte di scavo.
La testa di scavo, durante la rotazione, preme gli utensili che vi sono installati rimuovendo progressivamente il terreno che si trova nella sezione di scavo.

Secondo la tipologia di materiale da scavare saranno installate diverse tipologie di utensili. Nella scelta degli utensili più indicati si deve tenere conto di aspetti quali la tipologia di terreno, la capacità di spinta della macchina, la resistenza e l'abrasività di eventuali formazioni rocciose attraversate, il contenuto di minerali duri nel terreno, il tasso di usura degli utensili, il tutto nell'ottica di ottimizzare la procedura di scavo.

Una volta che il terreno è stato rimosso dalla sua sede naturale, resta temporaneamente nella camera di scavo dove, miscelato con gli agenti condizionanti, assume una consistenza tale da controbilanciare la spinta del terreno e dell'eventuale acqua di falda, sostenendo il fronte e impedendo fenomeni d'infiltrazione.

Figura 3 – Utensili da scavo.

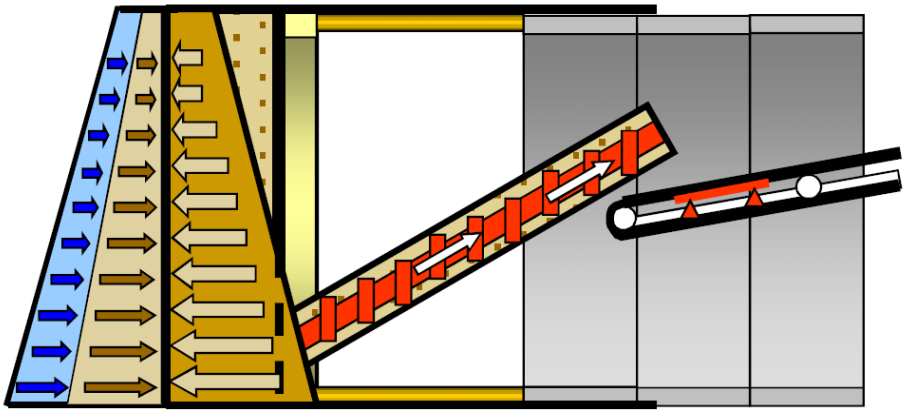


Figura 4 – Schema delle pressioni al fronte di scavo

La regolazione della pressione in camera di scavo è gestita aumentando o diminuendo il volume di terreno asportato tramite la coclea. Raggiunta l'estremità posteriore, il terreno è scaricato su un nastro trasportatore con il quale raggiunge l'area di stoccaggio in cantiere dove si attende che il contenuto di tensioattivi scenda sotto i limiti imposti dalla legge, per poi trasportarlo nell'area di deposito definitiva.

Nel progetto della testa di scavo (Figura 5) si dovranno stabilire le posizioni degli utensili e la percentuale di apertura.

La posizione degli utensili dovrà essere studiata in modo che ciascun tagliente segua una propria traiettoria e che le tracce dell'insieme degli strumenti vada a coprire in modo omogeneo l'intera sezione di scavo.

Come facilmente intuibile, la disposizione degli utensili è vincolata dalla presenza delle aperture sulla testa di scavo: al crescere di queste, infatti, si riduce inevitabilmente il numero massimo di attrezzi installabili.

Inoltre, la scelta di una testa di scavo più chiusa comporta anche altri vantaggi, quali una maggior robustezza della macchina e la riduzione della dimensione massima dei blocchi che possono entrare nella camera retrostante.

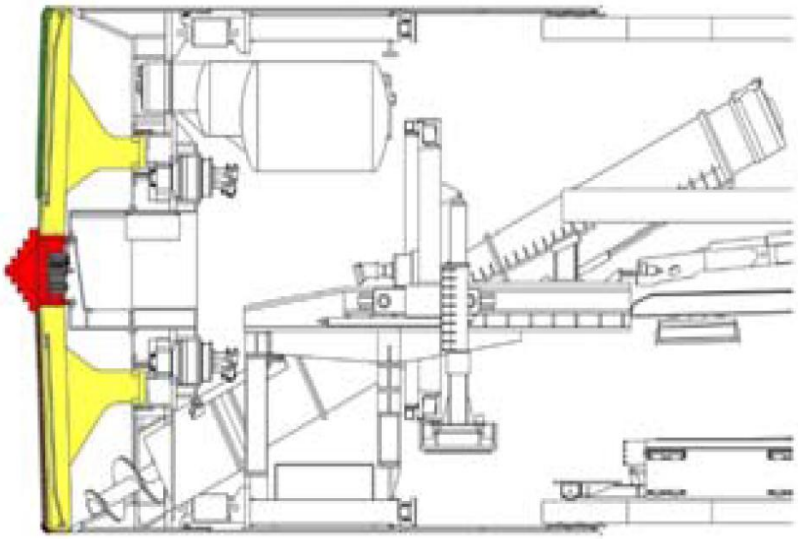


Figura 5 – Testa di scavo

Per sostenere e fornire il movimento rotatorio della testa di scavo si ha il cuscinetto reggispinta (Figura 6) il quale presenta una serie di motori idraulici che lavorano in parallelo trasferendo il moto all'organo di scavo tramite una corona dentata, questo accorgimento permette di ridurre notevolmente l'ingombro degli organi motori. Una caratteristica fondamentale del cuscinetto reggispinta è che il collegamento tra questo e la testa di scavo non è a tenuta stagna ma presenta un continuo trafilamento di grasso dall'interno della macchina verso la camera di scavo. Questo flusso ha lo scopo di impedire l'ingresso di particelle solide, le quali, se dovessero infiltrarsi tra gli ingranaggi, potrebbero portare a guasti molto gravi con possibile fermo macchina.

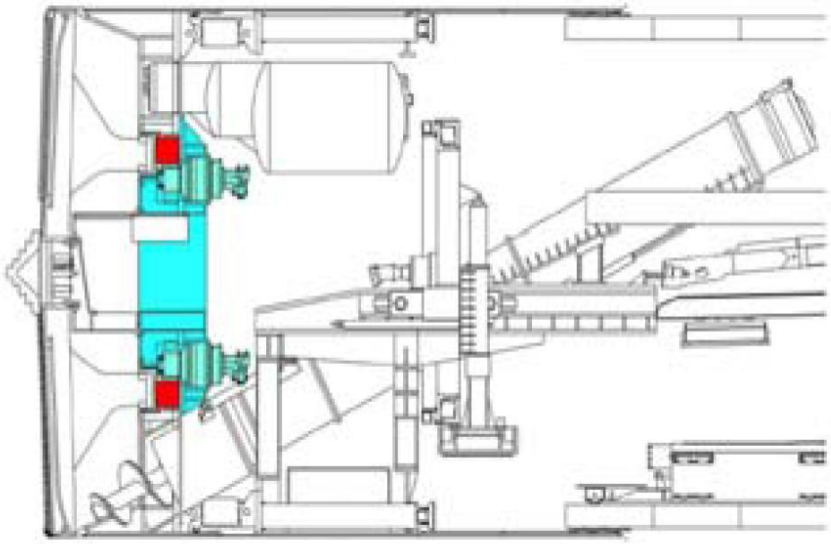


Figura 6 – Cuscinetto reggispinta

La presenza di articolazioni attive (Figura 7) permette di eseguire curve con un raggio molto ridotto, fino a 3-4 volte il diametro della galleria. Questa tipologia di articolazione permette il trasferimento della spinta in modo equo sull'intera circonferenza dell'anello, eliminandone il rischio di deformazione. L'articolazione è disposta tra la sezione frontale e quella posteriore della TBM. In assenza di questa componente, la macchina dovrebbe ricorrere a una spinta maggiore su un lato del rivestimento, portando allo sviluppo di deformazioni dell'anello.

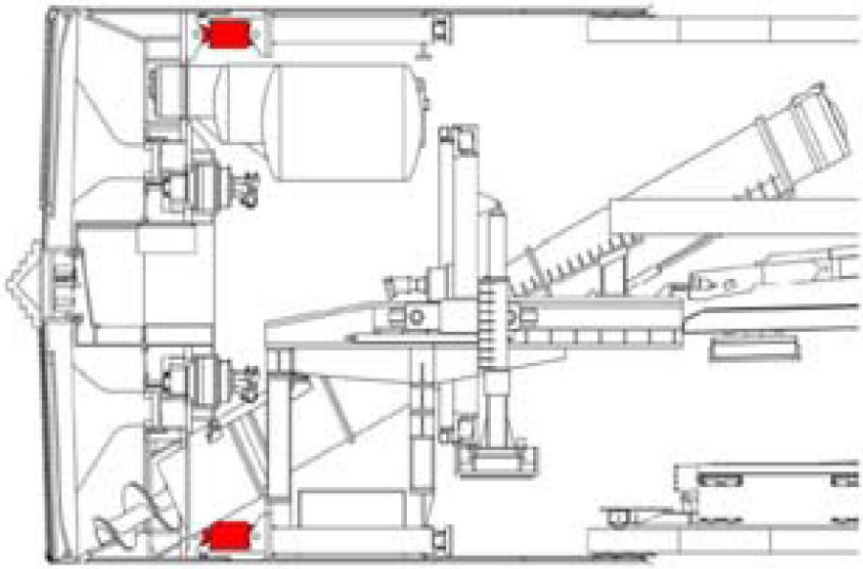


Figura 7 – Articolazioni attive

Durante l'avanzamento della TBM, il terreno entra nella camera di scavo in cui è pressurizzato.
La differenza di pressione tra la camera e la coclea spinge il terreno lungo la vite. In questo processo la pressione del fango si riduce da quella presente in camera di scavo a quella atmosferica.
La profondità della galleria, la tipologia di terreno e la posizione della falda determinano quale deve essere la pressione in camera di scavo per operare in modo efficiente e sicuro.
Per basse pressioni è sufficiente installare un solo trasportatore a coclea, mentre per alte pressioni di progetto è possibile aggiungere un secondo trasportatore per soddisfare le condizioni al contorno imposte in termini di pressione.
Raggiunta l'altra estremità della coclea, il materiale è scaricato su un nastro trasportatore che lo porterà a deposito.
La pressione in camera di scavo può essere regolata dall'operatore facendo variare la velocità di scavo e la velocità di rotazione della coclea. L'incremento di pressione è generato aumentando la prima velocità o diminuendo la seconda, per diminuire la pressione si adotteranno provvedimenti opposti.

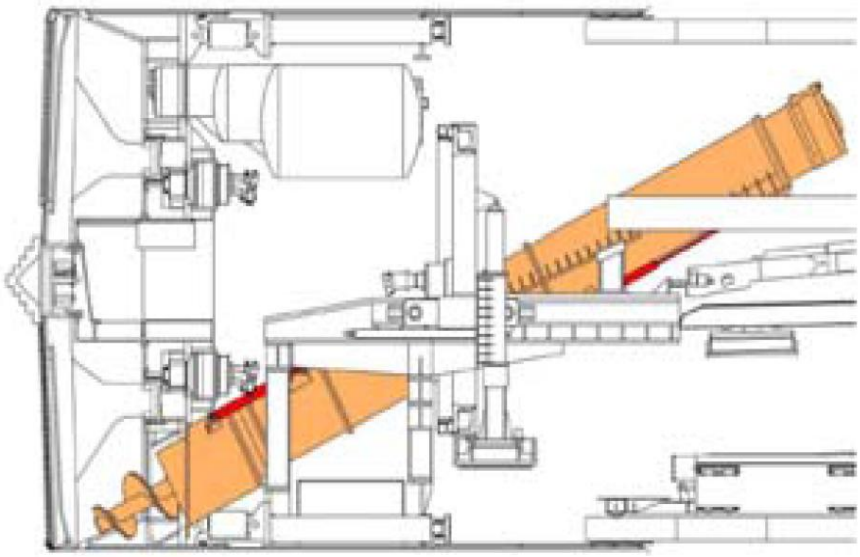


Figura 8 – Trasportatore a coclea

Poiché si deve entrare in camera di scavo in caso di manutenzione o sostituzione degli utensili, e questo ambiente deve essere mantenuto in pressione al fine di evitare l'ingresso dell'acqua, è necessario predisporre una camera iperbarica (Figura 9) che permetta l'acclimatamento del personale alla pressione in camera, in entrata, o alla pressione atmosferica, in uscita. Questa esposizione a un lento gradiente di pressione è fondamentale per evitare rischi alla salute di chi lavora in camera di scavo.

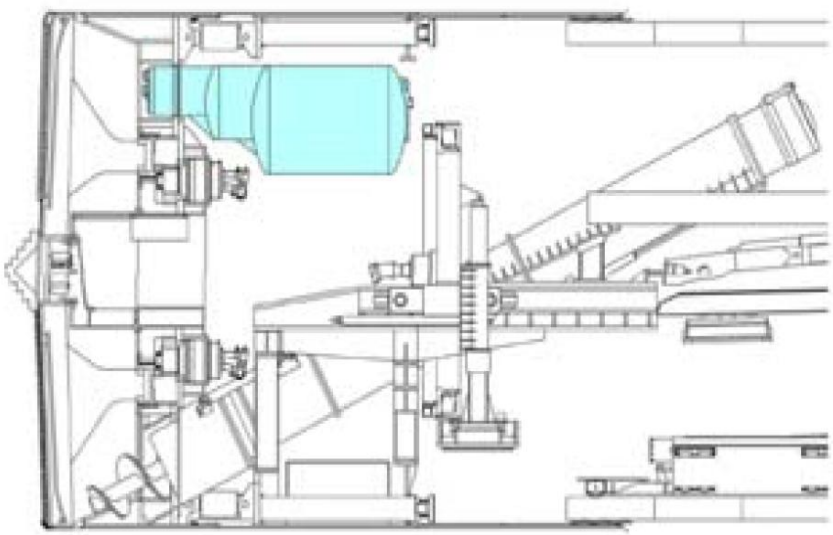


Figura 9 – Camera iperbarica

La spinta necessaria all'avanzamento della TBM è fornita da una serie di pistoni idraulici (Figura 10) disposti sulla circonferenza della macchina, all'interno dello scudo. In fase di avanzamento i pistoni fanno contrasto sull'anello di rivestimento precedentemente installato. Al termine della fase di avanzamento, i pistoni sono ritratti a gruppi in modo che l'erettore dei conci (Figura 11) abbia lo spazio per posizionare gli elementi in calcestruzzo armato che formeranno il rivestimento.

Una volta che il concio è in posizione, i pistoni sono estesi nuovamente al fine di bloccare il concio in posizione fino al termine dell'installazione dell'anello.

L'erettore dei conci è costituito da un braccio idraulico dotato di ventose a vuoto. Questo è posto su guide mobili che ne consentono la rotazione attorno all'asse della macchina e la traslazione in direzione longitudinale, inoltre il sistema di ventose a vuoto può essere allungato e ritratto in direzione radiale grazie a dei bracci telescopici.

Questo sistema permette il posizionamento di precisione di ogni concio secondo una sequenza stabilita.

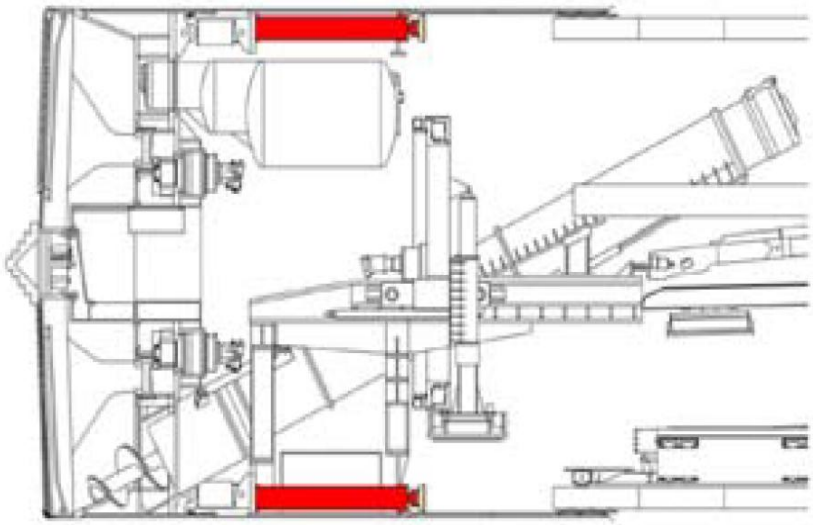


Figura 10 – Pistoni di spinta

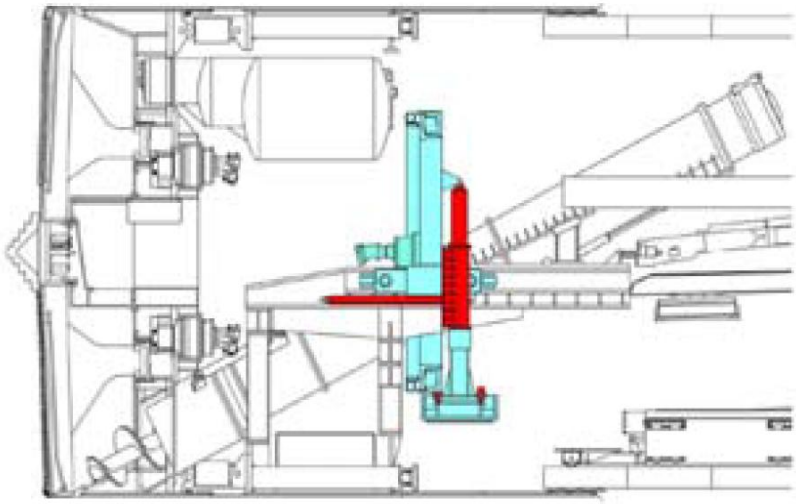


Figura 11 – Erettore dei conci

3 Condizionamento dei terreni

3.1 Agenti condizionanti

La scelta del tipo di schiuma e del tipo di polimeri da utilizzare nello scavo con macchina EPB dipende principalmente dalle caratteristiche del terreno che si intende attraversare e le condizioni geologiche in cui si trova. Si deve tenere conto della tipologia di macchina che si intende utilizzare in quanto, ad esempio, possono variare l'apertura della testa di scavo o il tipo di generatore di schiuma installato.
Gli agenti più importanti sono la schiuma e i polimeri ma possono essere di importanza fondamentale anche gli additivi disperdenti per ridurre l'adesione dell'argilla alla macchina e degli additivi lubrificanti per ridurre l'usura generata dal materiale scavato.

3.2 Schiumogenia

Lo scopo principale della schiuma è di creare una pasta capace di applicare e mantenere una pressione al fronte tale da garantirne la stabilità e l'impermeabilità. Inoltre, gli agenti condizionanti modificano sensibilmente la reologia del terreno rendendone più semplice lo scavo e il trasporto. Sono numerosi i riferimenti in letteratura alla riduzione del momento torcente necessario allo scavo e alla riduzione dell'usura degli utensili da scavo dovuta proprio all'effetto lubrificante degli agenti chimici utilizzati.
Per spiegare al meglio l'effetto che ha la schiuma, si dovrebbe in primo luogo valutare l'effetto della presenza di tensioattivi nel terreno.
Riducendo la tensione superficiale dell'acqua, diminuisce la forza con la quale riesce a legare le particelle per effetti dovuti alla capillarità. Inoltre, il tensioattivo è in grado di invertire la forza elettrostatica presente tra le particelle portando a una repulsione tra queste.
Questi effetti variano in base alla tipologia di tensioattivo utilizzato.

I tensioattivi sono una combinazione di una testa idrofilica e una coda idrofobica. Entrambe le componenti possono essere fatte variare sulla base di parametri quali la lunghezza della coda, la sua struttura o la carica della testa idrofilia, portando alla modifica di proprietà chimiche quali la tensione superficiale, la forza disperdente, la capacità di generare schiuma e la sua stabilità.

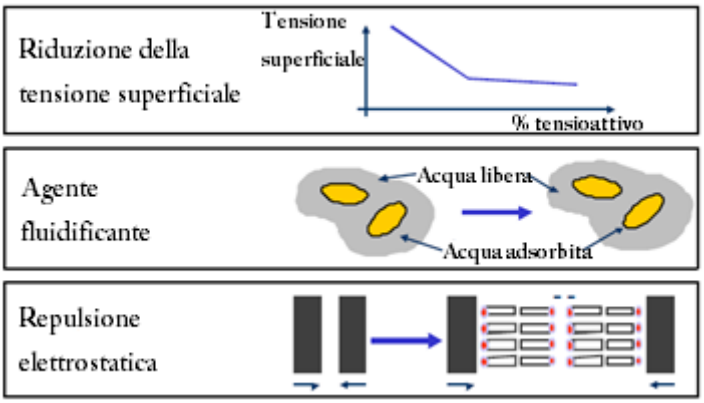


Figura 12 – Effetti dei tensioattivi sul terreno

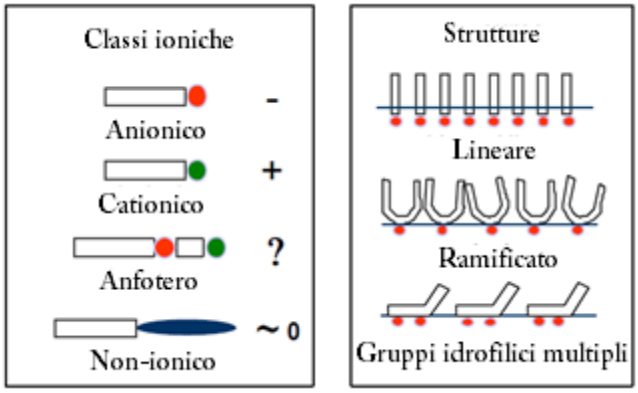


Figura 13 – Classificazione dei tensioattivi

Per ogni tipologia di terreno, secondo le caratteristiche chimiche dei suoi costituenti, è necessario un diverso tipo di tensioattivo al fine di ottimizzarne l'interazione con il suolo da condizionare (Langmaack, 2002).

3.2.1 Parametri della schiuma

I principali parametri che descrivono le proprietà e il comportamento delle schiume utilizzate nel condizionamento dei terreni con EPB sono i seguenti:

- concentrazione dello schiumogeno: esprime la percentuale in peso di tensioattivo all'interno del fluido generatore;
- Foam Expansion Ratio (FER): indica il rapporto tra il volume della schiuma e il volume del liquido generatore dal quale è stata generata;

- Foam Injection Ratio (FIR): rapporto percentuale del volume di schiuma utilizzato sul volume di terreno da condizionare;
- semivita: tempo in cui un campione di schiuma rilascia la metà del proprio liquido generatore.

3.3 Test di semivita

Per la valutazione della semivita di una schiuma si pone un campione di schiuma del peso di 80 g in un imbuto sul cui fondo è installata una pietra porosa precedentemente portata a saturazione.
Al di sotto dell'imbuto, si predispone un recipiente di raccolta posto su di una bilancia. Il valore della semivita della schiuma è dato dal tempo che intercorre tra il contatto tra campione e pietra porosa e l'istante in cui si hanno 40 g di liquido generatore nel recipiente.
Al fine di ottenere un risultato più attendibile, si eseguono tre prove per ciascuna tipologia di schiuma e se ne considera il valore medio.

3.4 Slump test

Al fine di caratterizzare i terreni condizionati in modo semplice e veloce è possibile utilizzare delle prove di slump come descritte dalle norme ASTM143-C ed EN 12350.

Il terreno, una volta miscelato con gli agenti condizionanti secondo le proporzioni desiderate, è versato in un cono di Abrams (Figura 14).

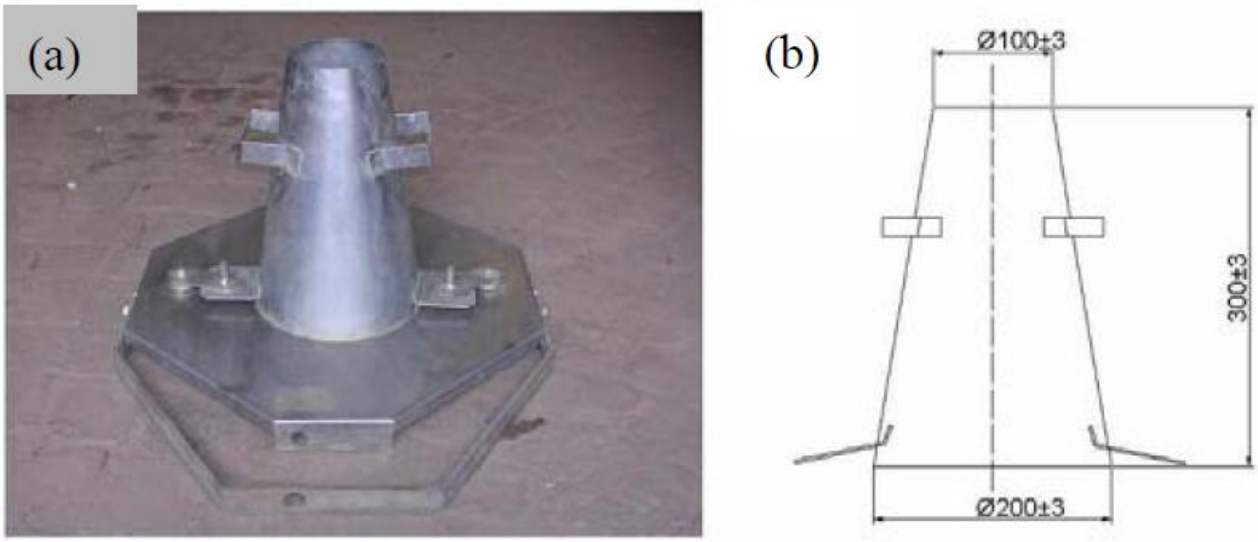


Figura 14 – Cono di Abrams

Dopo un minuto, durante il quale il terreno è lasciato assestare esclusivamente sotto l'azione del proprio peso, il cono è sollevato.
Sulla base dell'abbassamento del terreno e la tipologia di movimento che esibisce la massa, se ne individua il comportamento globale. In questa valutazione si includono anche le eventuali rotture e la segregazione di acqua e schiuma.

Possono essere identificate cinque tipologie di comportamento:

- Il collasso è irregolare e non si forma un materiale "plastico". Questo può essere dovuto 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;
- Il materiale manifesta un comportamento rigido con un valore di slump basso. Questo è un comportamento limite tendenzialmente dovuto a un FIR troppo basso;
- Il materiale è troppo fluido e segrega acqua e/o schiuma per via di una presenza eccessiva di tali componenti;
- Il comportamento è "plastico" e si ha una modesta segregazione di acqua. In questo caso il terreno manifesta un comportamento limite;
- Il materiale è "plastico", non segrega acqua o schiuma e non si hanno rotture della massa. Se queste condizioni si verificano il condizionamento è ottimale (Peila e Oggeri, 2008).

3.4.1 Riferimenti di letteratura

Questo test è stato utilizzato da molti autori per fornire una stima della plasticità del terreno condizionato e del suo comportamento globale.

- Peron & Marcheselli (1994) valutarono il condizionamento ottimale per un terreno alluvionale di un caso di studio per la metropolitana di Milano scavata con tecnologia EPB. La distribuzione granulometrica può essere descritta sinteticamente come segue:
    - d<0.074 mm, 20% di cui meno del 5% risulta essere argilla;
    - 2 mm<d<10 mm, 70%;
    - 10 mm<d<100 mm, 20%.

  Per tenere conto della variabilità granulometrica e di umidità riscontrata lungo il tracciato di progetto furono adottate tre tipologie di condizionamento:

  - FIR 50% e 5% di acqua aggiunta (sopra falda);
  - FIR 80% e 5% di acqua aggiunta (sopra falda);
  - FIR 50% (sotto falda).

- Quebaud et al. (1998) eseguirono le prove su una sabbia fine e una sabbia media le cui curve granulometriche variano tra 0.2 mm e 0.4 mm per la prima e tra 0 mm e 4 mm per la seconda.
  Utilizzando differenti valori di contenuto d'acqua determinarono che per ottenere uno slump di 120 mm, da loro considerato ottimale, era necessario adottare FIR compresi tra 5% e 35%;

- Jancsecz et al. (1999) eseguirono delle prove su dei campioni di ghiaia sabbiosa e di ghiaia sabbiosa con argilla ottenuti provenienti dal cantiere turco del tunnel LRTS di Izmir.
  Per il primo terreno (50% ghiaia e 50% sabbia) si ottennero cadute allo slump da 170 mm a 230 mm per valori di FIR variabili tra 18% e 65% con FER=6 e concentrazione dello schiumogeno al 3%.
  Con il secondo terreno (44% sabbia, 43% ghiaia e 13% argilla) si sono ottenuti i seguenti risultati:
  - slump da 200 mm a 226 mm con FIR variabile tra 18% e 65%, FER=6 e c=1%;
  - slump da 150 mm a 25 mm con FIR variabile tra 8% e 33%, FER=12 e c=1%;
  - slump da 180 mm a 26 mm con FIR variabile tra 8% e 33%, FER 12 e c=3%;

- Williamson et al. (1999) condizionarono una sabbia con FER=8 e FIR=40% ottenendo slump variabili tra 0 mm e 216 mm;

- Leinala et al. (2000), nell'ambito degli scavi del Toronto Sheppard Subway Project, eseguirono delle prove sulle varie tipologie di terreni incontrati. Utilizzando un contenuto d'acqua compreso tra 8% e 11%, per terreni descritti come sabbia e limo, condizionati con FER tra 1 e 6, era necessario un FIR>50% per ottenere una caduta allo slump superiore ai 100 mm;

- Peña (2003) eseguì un confronto tra le prestazioni di diversi agenti condizionanti nei confronti di un terreno la cui curva granulometrica varia tra le dimensioni di 0.002 mm e 2 mm. Utilizzando una concentrazione di schiumogeno compresa tra 1.5% e 2.5%, con un FIR=65% e un contenuto d'acqua del 22%, ottenne cadute comprese tra 100 mm e 150 mm e con FIR=80% la caduta ottenuta variava tra 150 mm e 200 mm;

- Hanamura et al. (2007) condussero una campagna di ricerca sull'effetto scala della strumentazione di prova. Le prove, realizzate con cinque tipologie di terreno (sabbia con ghiaia, ghiaia sabbiosa, ghiaia limosa, sabbia limosa, sabbia con ghiaia e argilla) e con diverse tipologie di polimeri, furono condotte con coni di dimensioni ridotte rispetto quelli standard.

- Vinai et al. (2008) individuarono una stretta correlazione tra contenuto d'acqua e FIR. Eseguendo i test su una sabbia omogenea con varie tipologie di condizionamento (w% e FIR) gli autori individuarono che la combinazione ideale era w=10% e FIR=40%.

3.4.2 Modalità di esecuzione della prova

Viste le dimensioni degli elementi presenti nel terreno, la prova non può essere eseguita su un campione rappresentativo dell'intera curva granulometrica. Si è scelto di eseguire i test sul passante al 30 mm. Dopo la separazione eseguita per la costruzione della curva granulometrica, il terreno è stato miscelato, quartato e suddiviso in campioni da 15 kg e riposto in contenitori a chiusura ermetica al fine di preservarne il contenuto d'acqua.

In una betoniera è stato inserito un campione di terreno al quale è stata aggiunta dell'acqua fino al raggiungimento dell'umidità scelta e la quantità di schiuma desiderata. Nei casi in cui si è utilizzato anche il polimero, questo è stato aggiunto gradualmente al campione durante la miscelazione in betoniera. Una volta che la miscela è ben omogeneizzata, si è riempito il cono di Abrams precedentemente inumidito.

Per determinare la qualità del condizionamento si valuta l'abbassamento e la forma del terreno una volta che il cono è sollevato. In genere sono considerati accettabili degli abbassamenti tra i 150 e i 200 mm.

In modo da standardizzare l'interpretazione della prova è necessario avere un diagramma che fornisca delle condizioni di riferimento con le quali confrontare i risultati ottenuti. Un esempio è riportato in Figura 15.

Per determinare l'esito del test si fa spesso riferimento a:

- tendenza del materiale a formare una matrice dal comportamento plastico;
- tendenza al collasso irregolare;
- tendenza a un'eccessiva segregazione di acqua e schiuma.

Se una o più delle precedenti caratteristiche è riscontrata, il condizionamento è considerato non ottimale.

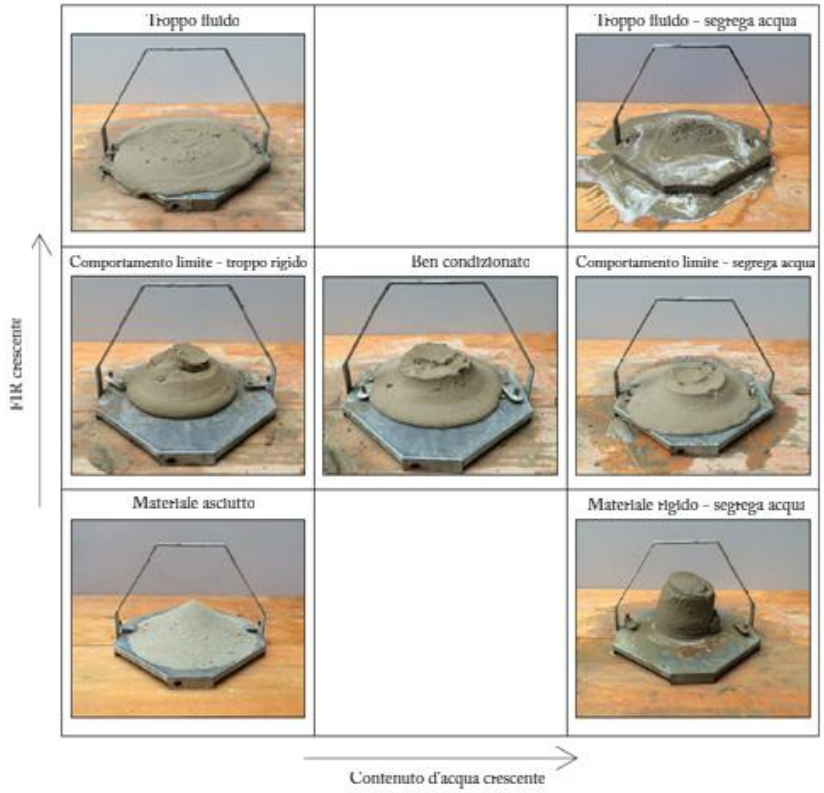


Figura 15 – Schema di riferimento per la classificazione del risultato del condizionamento

3.4.3 Vantaggi e limiti

L'analisi del condizionamento tramite slump test presenta l'indubbio vantaggio di essere molto rapido ed economico. Tale prova, però, presenta dei limiti che non possono essere ignorati. Le dimensioni limitate del cono di Abrams non permettono di includere nella prova le frazioni granulometriche più grossolane del terreno e quindi permette la valutazione del comportamento della sola frazione fine dei campioni.

Inoltre, essendo una prova empirica il cui risultato è individuato dal valore di caduta e da osservazioni da parte di chi svolge la prova, l'esito dello studio costituisce un'indicazione riguardo al condizionamento ideale piuttosto che un valore certo e unico.

3.5 Screw Conveyor Device Test

Al fine di valutare la bontà del condizionamento dei terreni rispetto la regolarità di estrazione con la coclea, Vinai et al. (2008) progettarono presso il Politecnico di Torino un'apparecchiatura di laboratorio che simula l'estrazione del materiale condizionato e messo in pressione. Questo strumento è costituito da un serbatoio di altezza 800 mm e diametro interno 600 mm. Una piastra di alluminio connessa a dei pistoni idraulici applica una pressione fino a 2 MPa al terreno condizionato con cui viene riempito il serbatoio.
L'estrattore a coclea è inclinato di 30°, ha lunghezza 1500 mm e diametro interno 168 mm, la cui vite ha passo di 100 mm e diametro dell'asta centrale di 60 mm.

In letteratura diversi autori si sono mossi nella direzione della modellazione in scala di ciò che avviene realmente in camera di scavo:

- come parte del National French Research Programme, nel 2001, fu realizzato un modello di EPB in scala 1:10;
- nel 2000, Bezuijen e Schaminée utilizzarono un estrattore a vite da laboratorio in scala e uno in scala reale per studiare il condizionamento di terreni sabbiosi;
- nel 1996, Yoshikawa eseguì delle prove di estrazione in scala reale su un terreno plastico;
- Mair et al. (2003) e Merritt e Mair (2006) eseguirono delle prove con un estrattore a coclea da laboratorio.

Sicuramente analizzare il problema dell'interazione tra terreno condizionato e ciottoli con apparati di questo tipo fornirebbe dei risultati più aderenti a ciò che si verifica durante le fasi di scavo.
Il problema riscontrato è che se nel terreno sono presenti elementi con dimensioni superiori a pochi centimetri le comuni attrezzature da laboratorio sono troppo piccole per essere utilizzate, mentre i modelli in vera grandezza sono onerosi, sia dal punto di vista economico che dal punto di vista logistico, e pertanto non risultano utilizzabili per le procedure di caratterizzazione normalmente necessarie.

4 Caso studio

4.1 Proprietà dei terreni in analisi

4.1.1 Provenienza dei terreni

I terreni considerati sono dei campioni provenienti di cantieri per lo scavo di una linea metropolitana in area urbana.

Il terreno è stato consegnato in 40 sacchi da 25 kg l'uno, denominati come riportato in Tabella 1.

Campioni	Peso sacco	Numero sacchi	Peso campione	Profondità
[-]	[kg]	[-]	[kg]	[m]
A	25	2	50	19.60 - 19.85
B	25	2	50	20.00 - 20-25
C	25	2	50	20.50 - 20.75
D	25	2	50	21.00 - 21.25
E	25	2	50	21.25 - 21.40
F	25	3	75	21.40 - 21.60
G	25	2	50	21.60 - 21.70
H	25	3	75	21.70 - 21.90
I	25	2	50	21.90 - 22.00
J	25	3	75	22.00 - 22.10
K	25	2	50	22.10 - 22.30
L	25	3	75	22.30 - 22.50
M	25	2	50	22.50 - 22.70
N	25	3	75	22.70 -22.90
O	25	2	50	22.90 - 23.20
P	25	3	75	23.20 - 23.60
Q	25	2	50	23.60 -23.80

Tabella 1 – Campioni in arrivo

I campioni A, B, C e D, sono ritenuti non rappresentativi dello strato nel quale saranno eseguiti gli scavi, per cui non sono stati presi in considerazione nello studio.

Il peso totale dei campioni rappresentativi è pari a 800 kg.

4.1.2 Procedura di caratterizzazione

All'arrivo del terreno sono stati prelevati 8 campioni (uno di terreno non rappresentativo, per completezza) e se n'è valutato il contenuto d'acqua. Al fine di eseguire le prove di condizionamento

si è reso necessario separare il materiale di dimensione superiore ai 30 mm perché incompatibile con la prova di slump. Questa operazione risulta comunque accettabile ai fini dello studio del condizionamento in quanto solo la componente fine del terreno interagisce con gli agenti schiumogeni.

Gli elementi di dimensione superiore ai 30 mm sono stati suddivisi in 7 classi di peso, e successivamente ricondotti a diametri equivalenti.

Il terreno è stato quartato in modo da renderlo omogeneo e suddiviso in campioni da 15 kg l'uno. Dopo la quartatura sono stati prelevati tre campioni per determinare la perdita d'acqua verificatasi durante le procedure di preparazione dei campioni.

Inoltre sono state determinate le densità in mucchio del passante ai 30 mm e del terreno ricostruito.

4.1.3 Caratterizzazione del contenuto d'acqua

Dal terreno sono stati prelevati 7 campioni e, tramite la variazione del peso in seguito ad essiccazione in forno, si è valutato il contenuto d'acqua di ciascun campione rispetto al peso del campione essiccato. Per completezza si è eseguita anche una valutazione del contenuto d'acqua di un campione non rappresentativo (Campione A). Il dettaglio delle analisi è riportato in Tabella 2.

Campione	Tara	Lordo iniziale	Lordo finale	Netto iniziale	Netto finale	Variazione	Contenuto in acqua
	[g]	[g]	[g]	[g]	[g]	[g]	**[%]**
A	13.13	909.41	776.59	896.28	763.46	132.82	**17.40**
C_1	22.91	2922.68	2712.90	2899.77	2689.99	209.78	**7.80**
C_2	521.39	3305.87	3052.32	2784.48	2530.93	253.55	**10.02**
F_1	524.53	4170.15	3944.71	3645.62	3420.18	225.44	**6.59**
F_2	13.51	1685.72	1580.27	1672.21	1566.76	105.45	**6.73**
J_1	50.12	3555.91	3327.27	3505.79	3277.15	228.64	**6.98**
J_2	611.12	3768.11	3540.10	3156.99	2928.98	228.01	**7.78**
N_1	594.31	3661.03	3485.31	3066.72	2891.00	175.72	**6.08**

Tabella 2 – Caratterizzazione del contenuto d'acqua dei campioni in arrivo

Il contenuto d'acqua medio del terreno all'arrivo dei campioni è pari a 7.43%.

In seguito alla quartatura del terreno sono stati prelevati tre campioni e ne è stato valutato il contenuto d'acqua secondo la metodologia esposta in precedenza. I risultati delle analisi sono riportati in Tabella 3.

Campione	Tara	Lordo iniziale	Lordo finale	Netto iniziale	Netto finale	Variazione	Contenuto in acqua
	[g]	[g]	[g]	[g]	[g]	[g]	**[%]**
1	611.87	3722.98	3529.97	3111.11	2918.10	193.01	**6.61**
2	521.52	3293.52	3101.74	2772.00	2580.22	191.78	**7.43**
3	525.22	3191.14	2995.14	2665.92	2469.92	196.00	**7.94**

Tabella 3 – Caratterizzazione del contenuto d'acqua dopo quartatura

Il contenuto d'acqua medio è pari a 7.33%. La variazione del contenuto d'acqua è da ritenersi trascurabile.

Poiché la posizione della falda potrebbe intersecare la sezione di scavo della galleria, si vuole valutare la variazione del contenuto d'acqua in funzione della posizione della falda.

Definendo le seguenti quantità:

- y: posizione della falda rispetto al punto più profondo della sezione di scavo;
- γ_b: peso specifico in mucchio del campione di terreno ricostituito;
- γ_s: peso specifico del secco;
- γ_d: peso specifico apparente del secco;
- γ_w: peso specifico dell'acqua;
- $m_{w,f}$: peso dell'acqua contenuta nel passante ai 30 mm al di sopra della falda;
- $m_{w,g}$: peso dell'acqua contenuta nel trattenuto ai 30 mm al di sopra della falda;
- $w_{n,f}$: contenuto d'acqua valutato sul passante ai 30 mm al di sopra della falda;
- $w_{n,g}$: contenuto d'acqua valutato sul trattenuto ai 30 mm al di sopra della falda;
- $w_{n,f}$: contenuto d'acqua al di sopra della falda;
- w_{max}: contenuto d'acqua in condizione di terreno saturo;
- e: indice dei vuoti;
- R: raggio della sezione di scavo;
- θ: angolo al centro che sottende l'area sotto falda della sezione di scavo;
- A_t: Area totale della sezione di scavo;
- A_s: area sotto falda della sezione di scavo;
- w: contenuto d'acqua valutato sulla sezione.

Si considerano valide le seguenti ipotesi:

- $w_{n,g}$=0 %;

- l'esclusione degli elementi lapidei di dimensione superiore a 100 mm non influisce in modo determinante sul contenuto d'acqua;
- superficie della falda orizzontale;

Il contenuto d'acqua totale viene calcolato come media pesata sull'area di competenza dei contenuti d'acqua $w_{n,g}$ e $w_{n,f}$.

$$w = \frac{(A_t - A_s)w_n + A_s w_{max}}{A_t}$$

L'area A_t è di immediata determinazione perché la sezione è circolare.

$$A_t = \pi R^2$$

L'area A_s è ricavata utilizzando le formule per il calcolo dei segmenti circolari:

$$A_s = \frac{1}{2}R^2(\theta - \sin\theta)$$

dove

$$\theta = 2\cos^{-1}\left(1 - \frac{y}{R}\right)$$

Il contenuto d'acqua in condizioni sature è dato dalla seguente relazione:

$$w_{max} = e\frac{\gamma_w}{\gamma_s}100$$

L'indice dei vuoti è determinato come

$$e = \frac{n}{1-n}$$

e la porosità è data da

$$n = 1 - \frac{\gamma_d}{\gamma_s}$$

Il peso specifico del secco è pari a 2.76 g/cm^3, mentre il peso specifico apparente del secco è determinato sperimentalmente ed è pari a 1.87 g/cm^3.

Dai calcoli risultano le seguenti quantità riportate in Tabella 4.

n [-]	0.322
e [-]	0.476
w_{max} [%]	17.24

Tabella 4 – Parametri del suolo

L'andamento del contenuto d'acqua in funzione del livello di falda y normalizzato rispetto al raggio R è dato dal grafico in Figura 16 – Contenuto d'acqua al variare della posizione della faldaFigura 16.

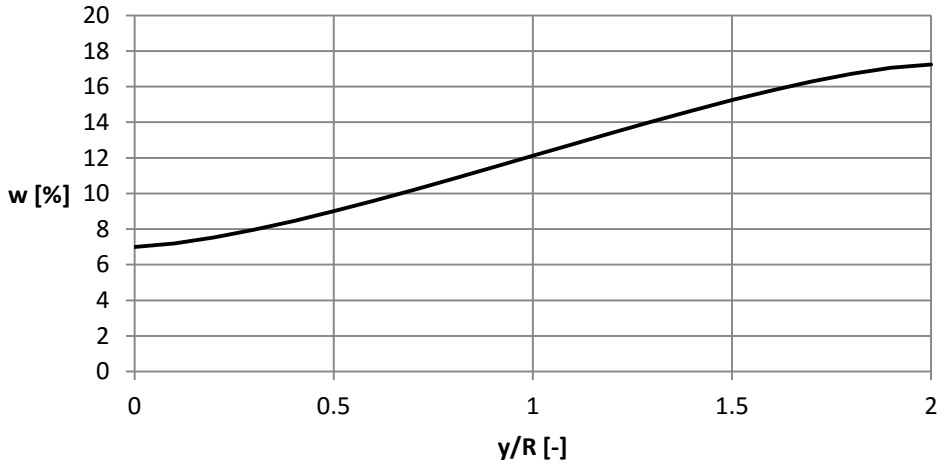


Figura 16 – Contenuto d'acqua al variare della posizione della falda

4.1.4 Caratterizzazione granulometrica

Già a un primo sguardo il terreno si presenta molto ricco in ciottoli. Si è deciso di separare gli elementi di dimensioni superiori ai 30 mm, perché non compatibili con le prove di slump normalmente utilizzate per la determinazione del condizionamento ideale.

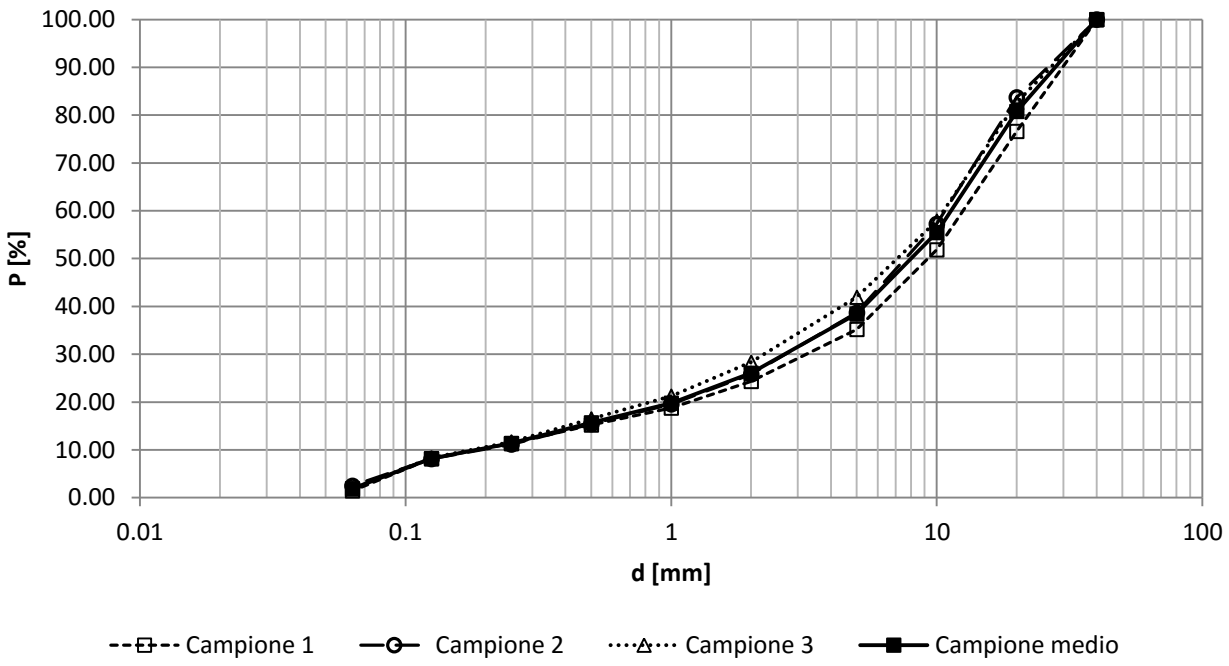


Figura 17 – Curve granulometriche dei campioni, frazione passante ai 30 mm

In seguito all'essiccazione e alla disgregazione dei grani di argilla, si è eseguita un'analisi granulometrica tramite setacciatura per ciascuno dei campioni. Poi è stata calcolata la curva granulometrica media. I risultati ottenuti sono riportati in Figura 17.

Per gli elementi trattenuti al vaglio da 30 mm l'analisi granulometrica è stata fatta suddividendo gli elementi in 7 classi di peso, le quali, sulla base del peso specifico degli elementi, sono state ricondotte a classi di volume e si è determinato il diametro equivalente riconducendo i ciottoli ad elementi sferici.

$$D_{eq} = \sqrt[3]{\frac{6}{\pi} \cdot \frac{W}{\gamma_s}}$$

Dove:

- W rappresenta il limite inferiore di peso della classe in analisi;
- γ_s è il peso secco dei ciottoli.

Dalle operazioni di suddivisione si sono ottenuti i risultati riportati in Tabella 5.

Classe	Limite inferiore	Limite superiore	γ_s	D_{eq}	t	T	T%	P%
	[g]	[g]	[g/cm^3]	[mm]	[g]	[g]	[%]	[%]
0	5000	-	2.76	151	0	0	0	100
1	2500	5000	2.76	120	25852	25852	6.78	93.22
2	2000	2500	2.76	111	13560	39412	10.34	89.66
3	1500	2000	2.76	101	23083	62495	16.39	83.61
4	1000	1500	2.76	88	24731	87226	22.88	77.12
5	500	1000	2.68	71	61363	148589	38.98	61.02
6	250	500	2.8	55	66261	214850	56.36	43.64
7	50	250	2.75	33	166364	381214	100.00	0.00

Tabella 5 – Suddivisione per classi di peso, frazione trattenuta al 30 mm

La curva granulometrica ottenuta è riportata in Figura 18.

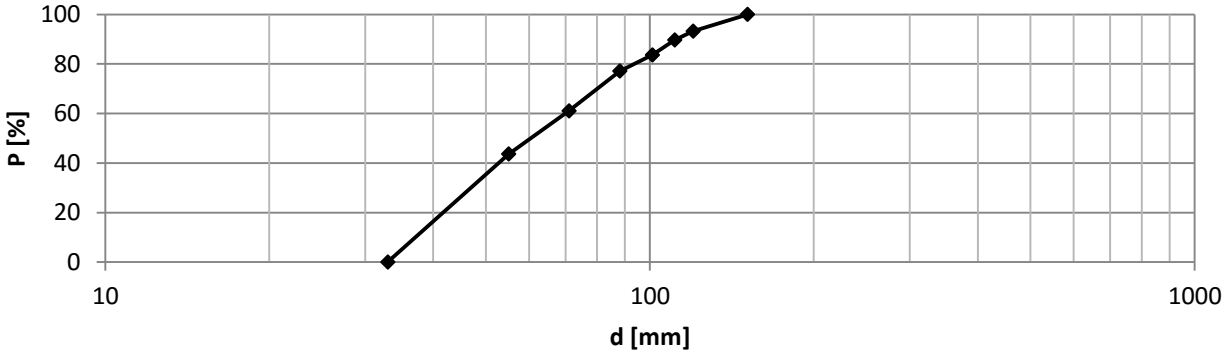


Figura 18 – Curva granulometrica del terreno, frazione trattenuta al 30 mm

Unendo i risultati ottenuti per le due frazioni granulometriche, è stato possibile ottenere la curva granulometrica del terreno in analisi riportata in Figura 19.

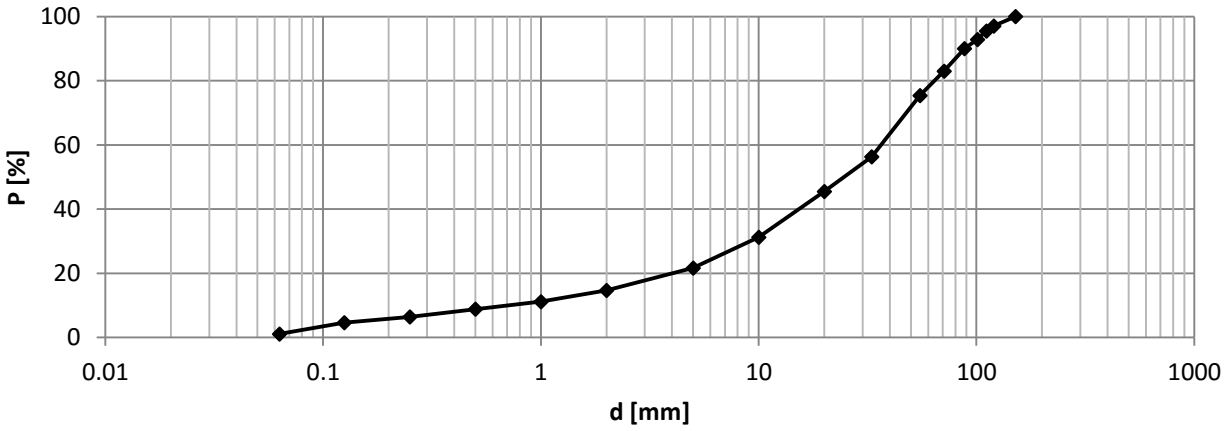


Figura 19 – Curva granulometrica del terreno

4.1.5 Foam Injection Ratio

Il Foam Injection Ratio, FIR, è il rapporto percentuale di schiuma iniettata sul volume di terreno condizionato. Si ricorda che i test sono stati eseguiti sul passante al 30 mm, per cui, i valori riportati nelle tabelle dei risultati fanno riferimento al volume di questa frazione granulometrica del terreno.

4.1.6 FIR reale

Per ricondursi al valore di FIR da utilizzare in macchina si dovrà tenere conto dell'influenza delle classi granulometriche superiori sul volume di terreno scavato. Infatti, a parità di schiuma iniettata, in macchina si avrà un FIR inferiore in quanto il terreno scavato avrà un volume maggiore.
Siano definite le seguenti quantità:

- FIR_f: FIR valutato sul passante utilizzato in laboratorio;
- FIR_t: FIR valutato sul terreno comprensivo di ogni frazione granulometrica;
- V_t: volume di terreno in analisi;
- V_f: volume di terreno passante al setaccio di riferimento;
- m_t: peso del terreno in analisi;
- m_f: peso passante al setaccio di riferimento del terreno in analisi;
- γ_{bf}: peso specifico in mucchio del passante al setaccio di riferimento;
- γ_{bt}: peso specifico in mucchio del terreno in analisi.

Si può partire dalla definizione di FIR

$$FIR_f = \frac{V_{schiuma}}{V_f} = \frac{V_{schiuma}\gamma_{bf}}{m_f}$$

$$V_{schiuma} = \frac{FIR_f m_f}{\gamma_{bf}}$$

$$FIR_t = \frac{V_{schiuma}}{V_t} = \frac{FIR_f m_f}{\gamma_{bf}}\frac{\gamma_{bt}}{m_t}$$

Poiché nel caso specifico

$m_t = 800$ kg;

$m_f = 350$ kg;

$\gamma_{bf} = 1.79$ g/cm^3;

$\gamma_{bt} = 1.87$ g/cm^3;

$$FIR_t = 0.457 \cdot FIR_f$$

4.1.7 Semivita

Per le indagini svolte è stato utilizzato un generatore di schiuma prodotto da Spoilmaster Ltd (GB). Figura 20, il quale consente il controllo indipendente del flusso di acqua e del flusso d'aria. Inoltre è possibile regolare la concentrazione dello schiumogeno. Una volta che i parametri sono impostati, eccetto piccole fluttuazioni, possono essere prodotti campioni di schiuma con un rapporto di espansione definito a priori. In ogni caso, prima di eseguire ciascun test, è stato verificato il FER pesando un volume di schiuma prestabilito.
Gli schiumogeni utilizzati nelle prove in oggetto sono stati forniti da due produttori differenti ai quali, in questa sede, ci si riferirà come "Produttore A" e "Produttore B". Ciascun produttore ha fornito almeno una tipologia di schiumogeno e una di polimero.

Il tensioattivo fornito dal Produttore A è un agente schiumogeno liquido basato su tensioattivi anionici biodegradabili in combinazione con polimero lubrificante di origine naturale, mentre i tensioattivi del Produttore B sono agenti schiumogeni liquidi a base di tensioattivi anionici e non ionici completamente biodegradabili.

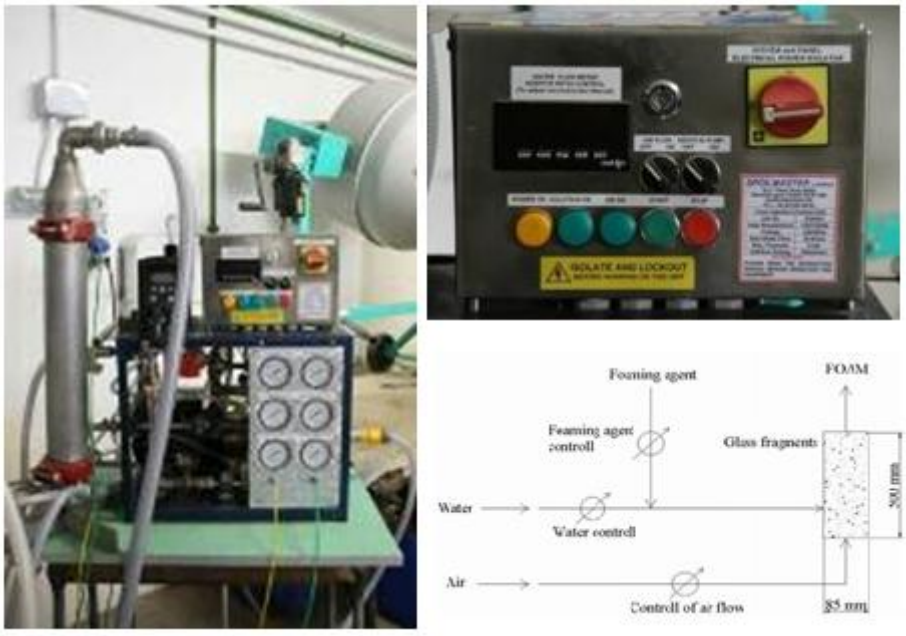


Figura 20 – Generatore di schiuma e relativa rappresentazione sintetica

I test di semivita sono stati eseguiti su tre campioni per ciascun prodotto e si considera rappresentativo il valore medio. I risultati di queste prove sono riassunti in Tabella 6.

Produttore	Prodotto	Concentrazione	FER	$t_{50,1}$	$t_{50,2}$	$t_{50,3}$	t_{50}
		[%]	[-]	[s]	[s]	[s]	**[s]**
A	**1**	1.5	10	184	173	193	**183**
B	**1**	3	10	133	138	137	**136**
B	**2**	3	10	540	479	496	**505**

Tabella 6 – Semivita delle schiume utilizzate

4.1.8 Polimeri

Il polimero fornito dal Produttore A è un polimero sintetico solubile in acqua con proprietà aggreganti e lubrificanti, mentre il polimero del Produttore B contiene una miscela di distillati del petrolio (20.0%-45.0%) e isotridecanoletossilato (<5.0%).

4.2 Costituzione delle miscele

Una volta che le tipologie di agenti condizionanti sono state scelte, si procede con l'inserimento del campione di terreno in un miscelatore e si aggiunge la quantità d'acqua necessaria a portare l'umidità del campione al livello desiderato. La betoniera deve essere precedentemente inumidita per evitare che questa trattenga sulla sua superficie parte dell'acqua destinata al condizionamento del terreno. Una volta che l'impasto si è omogeneizzato, è aggiunta la schiuma scelta secondo il FIR scelto e il polimero secondo la concentrazione desiderata. Nei resoconti dei condizionamenti dei terreni riportati in Tabella 7, Tabella 8, Tabella 9, **Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.** e **Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.** il contenuto d'acqua e la quantità di schiuma sono calcolati rispetto alla porzione di terreno passante ai 30 mm, mentre la concentrazione di polimero è espressa rispetto alla quantità di acqua totale presente nella miscela.

5 Prove di slump

5.1 Campagna di prove

In seguito a prove preliminari si è scelto di portare il terreno da un contenuto d'acqua pari al 7% a valori di circa 10-12% perché per valori inferiori al 2.5% di acqua aggiunta il terreno tende ad avere un comportamento troppo plastico, per valori superiori al 5% di acqua aggiunta si ottiene un completo dilavamento degli elementi lapidei presenti nel campione.

Per quello che riguarda la concentrazione dello schiumogeno nel liquido generatore, su indicazione dei produttori presenti durante le analisi, si è utilizzato c=1.5% e c=1.3% per il Produttore A e c=3% per il Produttore B.

Il FER è stato fissato pari a 10 con esclusione delle prove eseguite con concentrazione dello schiumogeno all'1.3% per la quale si è utilizzato un FER=7.
Durante le prove con il Produttore A si è deciso di utilizzare valori di FIR pari a 20%, 30% e 45%, mentre con il Produttore B si è deciso di utilizzare solo FIR al 20% e 45%.

I polimeri utilizzati sono di tipo aggregante e le concentrazioni utilizzate arrivano fino allo 0.025% in peso su peso per il Produttore A e fino allo 0.050% per il Produttore B.

Il resoconto dei condizionamenti utilizzati è riportato in Tabella 7, Tabella 8 e Tabella 9.

Prova	w_{add} [%]	w_{tot} [%]	Concentrazione schiumogeno [%]	FER	FIR	Polimero	Concentrazione polimero [%]
1 A	5	12	1.5	10	30	No	-
2 A	5	12	1.5	10	30	Sì	0.012
3 A	2.5	9.5	1.5	10	30	No	-
4 A	5	12	1.5	10	20	No	-
5 A	5	12	1.5	10	30	Sì	0.014
6 A	2.5	9.5	1.3	7	30	No	-
7 A	2.5	9.5	1.3	7	20	No	-
8 A	3	10	1.5	10	45	Sì	0.25

Tabella 7 – Prove di slump con Produttore A

Prova	w_{add} [%]	w_{tot} [%]	Concentrazione schiumogeno [%]	FER	FIR	Polimero	Concentrazione polimero [%]
1 B1	3	10	3	10	20	No	-

Tabella 8 – Prove di slump con Produttore B, schiumogeno 1

Prova	w_{add} [%]	w_{tot} [%]	Concentrazione schiumogeno [%]	FER	FIR	Polimero	Concentrazione polimero [%]
2 B2	3	10	3	10	20	No	-
3 B2	5	12	3	10	20	No	-
4 B2	3	10	3	10	20	Sì	0.025
5 B2	3	10	3	10	45	No	-
6 B2	3	10	3	10	45	Sì	0.025
7 B2	3	10	3	10	45	Sì	0.050
8 B2	3	10	3	10	45	Sì	0.050

Tabella 9 – Prove di slump con Produttore B, schiumogeno 2 – La prova 8 B2 è stata eseguita a 20 minuti dall'aggiunta del polimero

5.2 Risultati

5.2.1 Produttore A

Si riporta nelle tabelle successive (Tabella 10 - Tabella 25) i risultati delle prove organizzati in modo sintetico e accompagnati dalle foto del materiale condizionato.

Test 1 A		**Note**	**Foto**
Peso del campione (kg)	15	Segregano un po' di acqua e schiuma	
Acqua aggiunta (%)	5		
Acqua aggiunta (l)	0.75		
Concentrazione dello schiumogeno (%)	1.5		
FER	10		
FIR (%)	30		
Polimero (%)	-		
Polimero aggiunto (g)	-		
Slump (cm)	***22***		

Tabella 10 – Slump test 1 A

Test 2 A		Note	Foto
Peso del campione (kg)	15	Ben condizionato	
Acqua aggiunta (%)	3		
Acqua aggiunta (l)	0.45		
Concentrazione dello schiumogeno (%)	1.5		
FER	10		
FIR (%)	30		
Concentrazione del polimero (%)	-		
Polimero aggiunto (g)			
Slump (cm)	***17***		

Tabella 11 – Slump test 2 A

Test 3 A		Note	Foto
Peso del campione (kg)	15	Ben condizionato, più fluido rispetto al test 2 A	
Acqua aggiunta (%)	5		
Acqua aggiunta (l)	0.75		
Concentrazione dello schiumogeno (%)	1.5		
FER	10		
FIR (%)	20		
Concentrazione del polimero (%)	-		
Polimero aggiunto (g)			
Slump (cm)	***21***		

Tabella 12 – Slump test 3 A

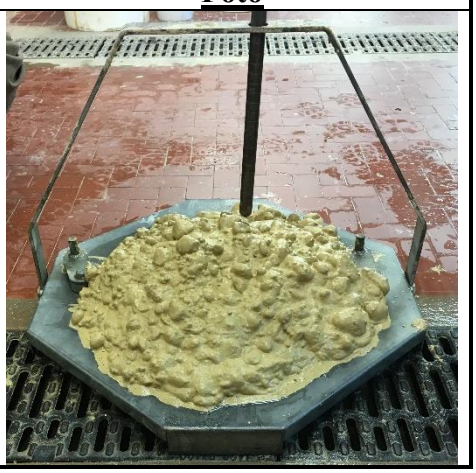
Test 4 A		Note	Foto
Peso del campione (kg)	15	Troppo fluido	
Acqua aggiunta (%)	3		
Acqua aggiunta (l)	0.450		
Concentrazione dello schiumogeno (%)	1.3		
FER	7		
FIR (%)	30		
Concentrazione del polimero (%)			
Polimero aggiunto (g)			
Slump (cm)	***22***		

Tabella 13 – Slump test 4 A

Test 5 A		Note	Foto
Peso del campione (kg)	15	Borderline	
Acqua aggiunta (%)	5		
Acqua aggiunta (l)	0.750		
Concentrazione dello schiumogeno (%)	1.3		
FER	7		
FIR (%)	20		
Concentrazione del polimero (%)	-		
Polimero aggiunto (g)			
Slump (cm)	***19***		

Tabella 14 – Slump test 5 A

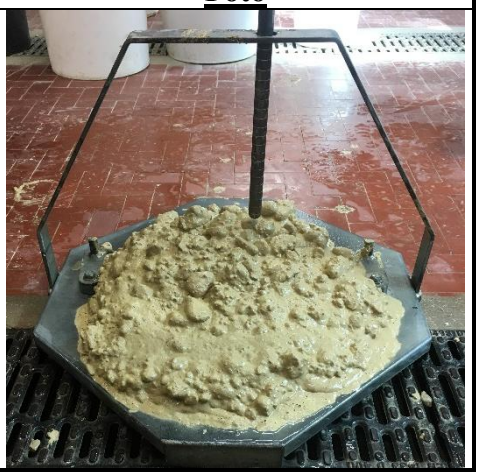
Test 6 A		Note	Foto
Peso del campione (kg)	15	Segrega un po' di acqua	
Acqua aggiunta (%)	5		
Acqua aggiunta (l)	0.75		
Concentrazione dello schiumogeno (%)	1.5		
FER	10		
FIR (%)	30		
Concentrazione del polimero (%)	0.012		
Polimero aggiunto (g)	1.8		
Slump (cm)	***21***		

Tabella 15 – Slump test 6 A

Test 7 A		Note	Foto
Peso del campione (kg)	15	Ben condizionato	
Acqua aggiunta (%)	5		
Acqua aggiunta(l)	0.75		
Concentrazione dello schiumogeno (%)	1.5		
FER	10		
FIR (%)	30		
Concentrazione del polimero (%)	0.014		
Polimero aggiunto (g)	2.5		
Slump (cm)	***18***		

Tabella 16 – Slump test 7 A

Test 8 A		Note	Foto
Peso del campione (kg)	15	Borderline	
Acqua aggiunta (%)	3		
Acqua aggiunta(l)	0.45		
Concentrazione dello schiumogeno (%)	1.5		
FER	10		
FIR (%)	45		
Concentrazione del polimero (%)	0.025		
Polimero aggiunto (g)	3.75		
Slump (cm)	***19***		

Tabella 17 – Slump test 8 A

5.2.2 Produttore B

Prodotto 1

Test 1 B1		Note	Foto
Peso del campione (kg)	15	Ben condizionato	
Acqua aggiunta (%)	3		
Acqua aggiunta (l)	0.45		
Concentrazione dello schiumogeno (%)	3		
FER	10		
FIR (%)	20		
Concentrazione del polimero (%)	-		
Polimero aggiunto (g)	-		
Slump (cm)	***19***		

Tabella 18 – Slump test 1 B1

Prodotto 2

Test 2 B2		Note	Foto
Peso del campione (kg)	15	Rigido	
Acqua aggiunta (%)	3		
Acqua aggiunta(l)	0.45		
Concentrazione dello schiumogeno (%)	3		
FER	10		
FIR (%)	20		
Concentrazione del polimero (%)	-		
Polimero aggiunto (g)	-		
Slump (cm)	***17***		

Tabella 19 – Slump test 2 B2

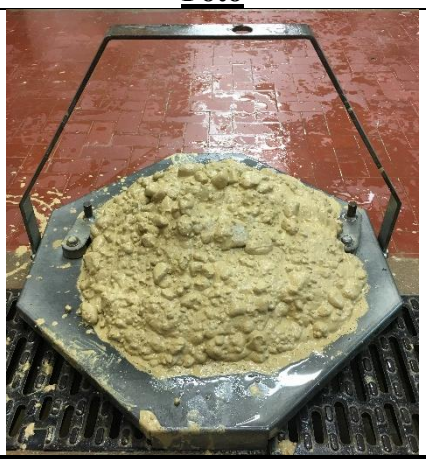
Test 3 B2		Note	Foto
Peso del campione (kg)	15	Segregano acqua e schiuma	
Acqua aggiunta (%)	5		
Acqua aggiunta(l)	0.75		
Concentrazione dello schiumogeno (%)	3		
FER	10		
FIR (%)	20		
Concentrazione del polimero (%)	-		
Polimero aggiunto (g)	-		
Slump (cm)	***20***		

Tabella 20 – Slump test 3 B2

Test 4 B2		Note	Foto
Peso del campione (kg)	15	Troppo fluido, segregano acqua e schiuma	
Acqua aggiunta (%)	3		
Acqua aggiunta(l)	0.45		
Concentrazione dello schiumogeno (%)	3		
FER	10		
FIR (%)	45		
Concentrazione del polimero (%)	-		
Polimero aggiunto (g)	-		
Slump (cm)	***20***		

Tabella 21 – Slump test 4 B2

Test 5 B2		Note	Foto
Peso del campione (kg)	15	Ben condizionato	
Acqua aggiunta (%)	3		
Acqua aggiunta(l)	0.45		
Concentrazione dello schiumogeno (%)	3		
FER	10		
FIR (%)	20		
Concentrazione del polimero (%)	0.025		
Polimero aggiunto (g)	3.75		
Slump (cm)	***18***		

Tabella 22 – Slump test 5 B2

Test 6 B2		Note	Foto
Peso del campione (kg)	15	Segrega un po' di acqua	
Acqua aggiunta (%)	3		
Acqua aggiunta(l)	0.45		
Concentrazione dello schiumogeno (%)	3		
FER	10		
FIR (%)	45		
Concentrazione del polimero (%)	0.025		
Polimero aggiunto (g)	3.75		
Slump (cm)	***20***		

Tabella 23 – Slump test 6 B2

Test 7 B2		Note	Foto
Peso del campione (kg)	15	Ben condizionato, troppo fluido	
Acqua aggiunta (%)	3		
Acqua aggiunta(l)	0.45		
Concentrazione dello schiumogeno (%)	3		
FER	10		
FIR (%)	45		
Concentrazione del polimero (%)	0.050		
Polimero aggiunto (g)	7.5		
Slump (cm)	***20***		

Tabella 24 – Slump test 7 B2

Test 8 B2		**Note**	**Foto**
Peso del campione (kg)	15	Slump effettuato dopo 20 minuti. Più rigido rispetto alla prova 7 B2 ma ancora ben condizionato	
Acqua aggiunta (%)	3		
Acqua aggiunta(l)	0.45		
Concentrazione dello schiumogeno (%)	3		
FER	10		
FIR (%)	45		
Concentrazione del polimero (%)	0.050		
Polimero aggiunto (g)	7.5		
Slump (cm)	***15***		

Tabella 25 – Slump test 8 B2

6 Prove Tilt Sliding Test (TST)

Individuato il condizionamento ottimale al fine di garantire la stabilità del fronte e la sua impermeabilizzazione, è importante nello scavo in terreni con alta percentuale di materiale grossolano verificare che il terreno condizionato garantisca anche un efficace mezzo di trasporto per i ciottoli presenti nel terreno alluvionale in esame in modo da evitare la separazione gravimetrica del materiale con conseguenti difficoltà di estrazione da un lato e di controllo di permeabilità dall'altro.

Non essendo disponibile una prova di laboratorio in grado di evidenziare la qualità dell'interazione tra il materiale condizionato e le frazioni granulometriche di dimensioni maggiori si è sviluppata una nuova procedura per fornire indicazioni a riguardo e proporre un indice interpretativo.

Poiché in macchina di scavo si hanno delle condizioni di movimento del terreno, si è sviluppato una prova che realizzi una situazione dinamica.

In particolare, si è cercato di analizzare il moto delle due classi granulometriche (passante al 30 mm e trattenuto al 30 mm) e il loro moto relativo. Le condizioni di moto richieste per la prova sono state realizzate disponendo il materiale su un piano inclinabile e facendo scivolare il terreno sotto l'azione del proprio peso a diversi angoli di inclinazione.

Poiché l'intento è di sviluppare una prova che possa analizzare una variabilità di terreni, i quali avranno diversi angoli di attrito interno, si è ritenuto di dover abbandonare l'ipotesi di angolo fisso perché per terreni particolari si potrebbe avere assenza di moto o un flusso non controllato e difficilmente analizzabile.

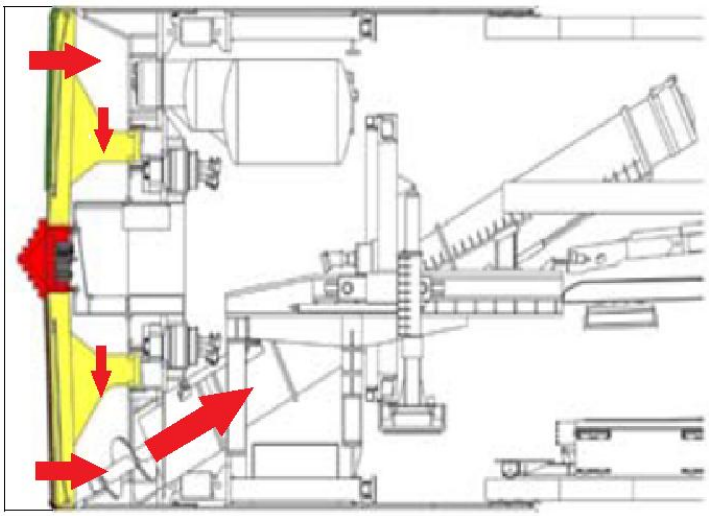


Figura 21 – Movimento del terreno scavato all'interno della camera di scavo

6.1.1 Descrizione della prova

Una volta determinato che il piano dovesse avere un'inclinazione variabile si è costruito un prototipo dell'attrezzatura necessaria (Figura 22 - Figura 26). Il prototipo realizzato è costituito da un piano rigido in legno di larghezza 800 mm, lunghezza 1500 mm sul quale sono state disposte delle sponde di legno di altezza 100 mm. L'area individuata in questo modo è stata rivestita con una lamiera di acciaio al fine di ridurre l'attrito tra terreno e attrezzatura di prova e facilitare la pulizia dell'attrezzatura.

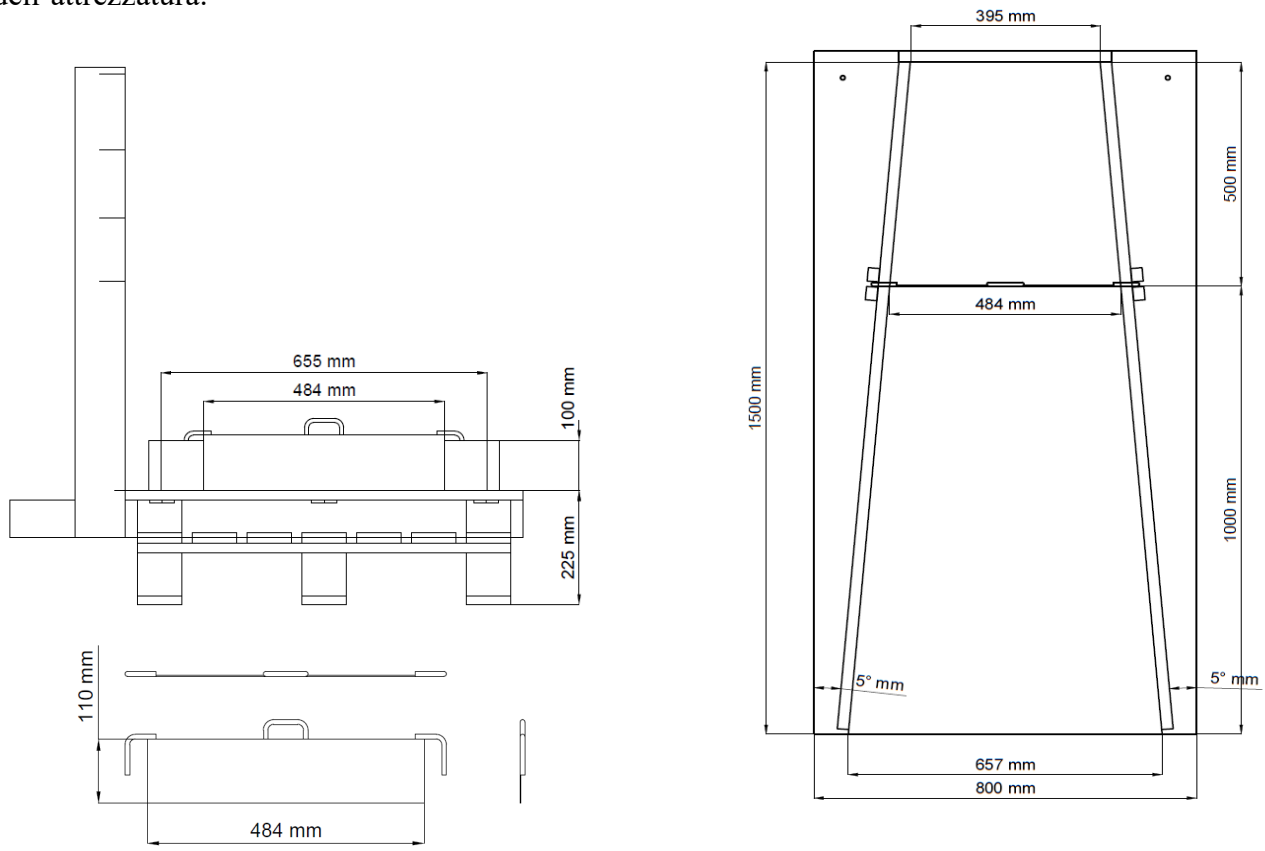


Figura 22 – Attrezzatura per prova TST, vista frontale e dall'alto con quote principali

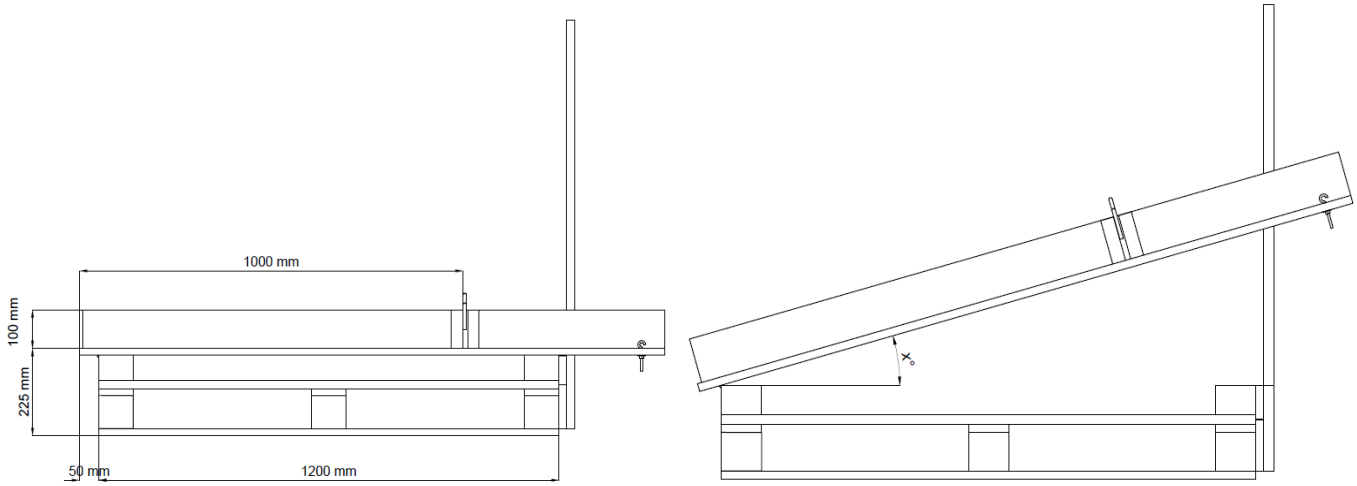


Figura 23 – Attrezzatura per prova TST, vista laterale in configurazione di piano orizzontale e inclinato con quote principali

A 1000 mm dalla fine del piano inclinato è stata predisposta una sponda trasversale in acciaio per il contenimento del campione durante la fase di sollevamento a 20°.

L'alloggiamento per il campione ha un volume pari a 21880 cm^3. Le sponde sono state installate in modo da divergere con un angolo di 5° in modo da permettere una libera espansione laterale del flusso ed evitare così delle interazioni che possano rendere più complessa l'interpretazione dei risultati. La struttura così realizzata è stata incernierata a 50 mm dalla base su un elemento di altezza 207 mm, in modo da avere una parte dello scivolo aggettante sulla vasca di raccolta del materiale. Questa altezza è stata scelta in funzione delle dimensioni della vasca di raccolta disponibile in laboratorio e una sua variazione non comporta effetti sull'esito della prova. Il sollevamento del piano è stato realizzato ancorando una puleggia a un punto fisso e a questa si è collegata una catena imbullonata in testa allo scivolo. Per il controllo dell'inclinazione raggiunta si è installata un'asta graduata sul lato sinistro del piano, in modo da controllare in modo semplice questo parametro. Come si può vedere in Figura 24 sulle sponde sono stati tracciati dei riferimenti ogni 50 mm misurati lungo la direzione di massima pendenza al fine di controllare, durante l'esecuzione della prova, l'evoluzione dello scorrimento.

Figura 24 – Attrezzatura per prova TST, vista frontale

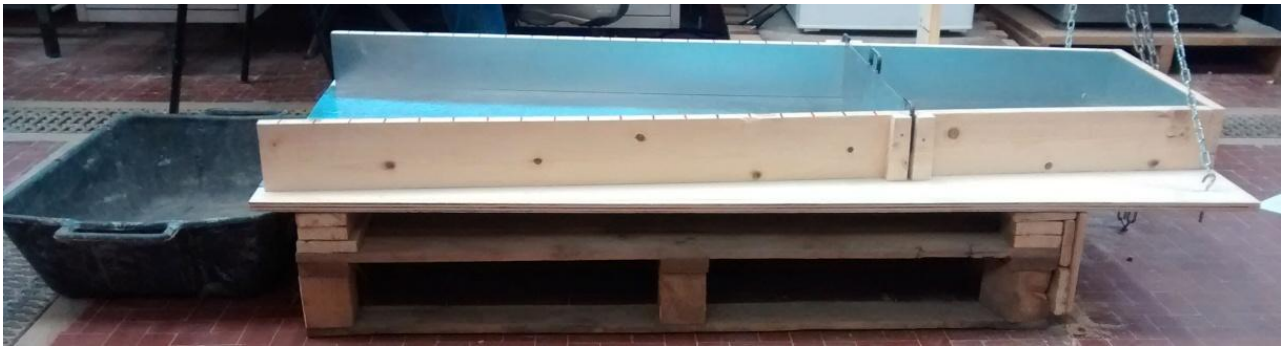


Figura 25 – Attrezzatura per prova TST, vista laterale

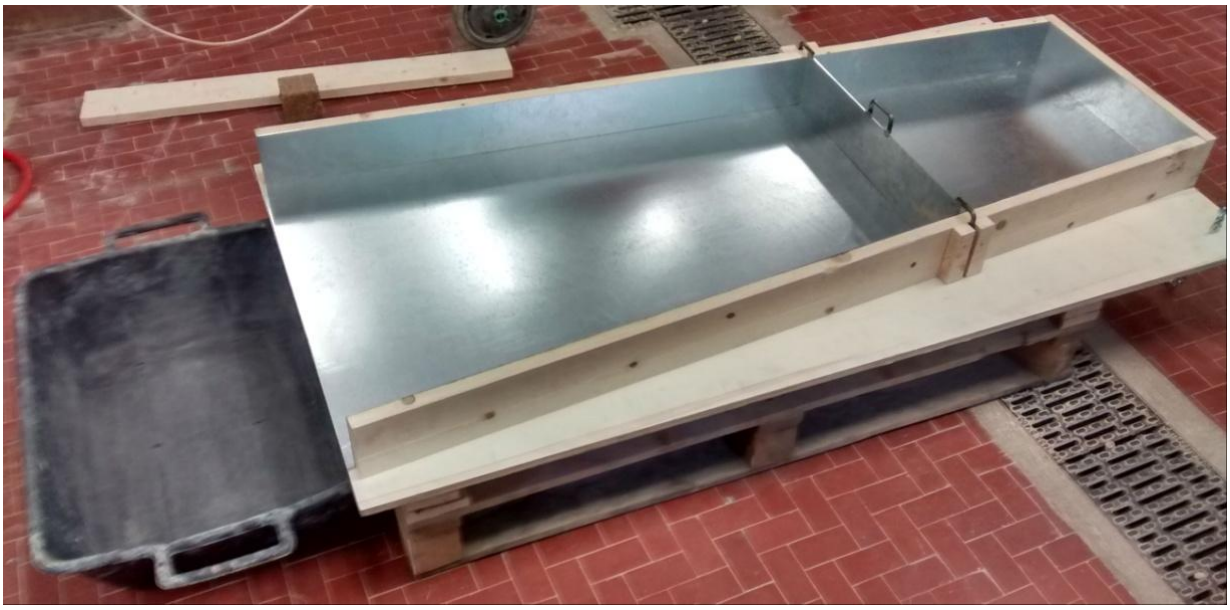


Figura 26 – Attrezzatura per prova TST, vista dall'alto

Lo schema di prova è il seguente:

1. Inserimento del campione ricostituito e condizionato nell'apposito alloggiamento;
2. Rotazione del piano ad un'inclinazione di 20°;
3. Rimozione della sponda trasversale;
4. Attesa dell'arresto del materiale e misura dello scorrimento s_0, del peso del terreno in vasca di raccolta t_0, del peso dei ciottoli in vasca di raccolta c_0 e il loro numero n_0;
5. Rimozione del materiale dalla vasca di raccolta;
6. Rotazione del piano a un'inclinazione a 25° con velocità di circa 0.5°/s;
7. Attesa dell'arresto del materiale e misura dello scorrimento s_1, del peso del terreno in vasca di raccolta t_1, del peso dei ciottoli in vasca di raccolta c_1 e il loro numero n_1;
8. Rimozione del materiale dalla vasca di raccolta;
9. Rotazione del piano a un'inclinazione a 30° con velocità di circa 0.5°/s;
10. Attesa dell'arresto del materiale e misura dello scorrimento s_2, del peso del terreno in vasca di raccolta t_2, del peso dei ciottoli in vasca di raccolta c_2 e il loro numero n_2;
11. Rimozione del materiale dalla vasca di raccolta;
12. Rotazione del piano a un'inclinazione a 35° con velocità di circa 0.5°/s;
13. Attesa dell'arresto del materiale e misurare dello scorrimento s_3, del peso del terreno in vasca di raccolta t_3, del peso dei ciottoli in vasca di raccolta c_3 e il loro numero n_3;
14. Misura del peso del terreno sul piano t_4, del peso dei ciottoli sul piano c_4 e il loro numero n_4.
15. Calcolo delle seguenti quantità, per k=0, 1, 2, 3:

Nel seguito sono riportate le formulazioni relative agli indici utilizzati nell'interpretazione:

a. $\%C_k = \frac{\sum_i^k c_i}{\sum_i^4 c_i} \cdot 100$

b. $\%F_k = \frac{\sum_i^k t_i}{\sum_i^4 t_i} \cdot 100$

c. $\%N_k = \frac{\sum_i^k n_i}{\sum_i^4 n_i} \cdot 100$

dove c_i rappresenta la massa di ciottoli caduti in vasca di raccolta nell'i-esima fase, t_i rappresenta la massa della pasta caduta in vasca di raccolta nell'i-esima fase e n_i rappresenta il numero di ciottoli caduti in vasca nell'i-esima fase. L'indice i=0 si riferisce all'inclinazione di 20°, i=1 si riferisce all'inclinazione di 25°, i=2 si riferisce all'inclinazione di 30°, i=3 si riferisce all'inclinazione di 35°. L'indice i=4, invece, si riferisce alle quantità rimaste sullo scivolo a un'inclinazione di 35°.

Quindi le formulazioni indicano il rapporto percentuale tra la massa cumulata in vasca di raccolta sulla massa totale, di ciottoli o di pasta e il rapporto percentuale tra il numero cumulato di ciottoli in vasca di raccolta sul numero totale di ciottoli

In Figura 27 si riporta una rappresentazione schematica delle varie fasi della prova.

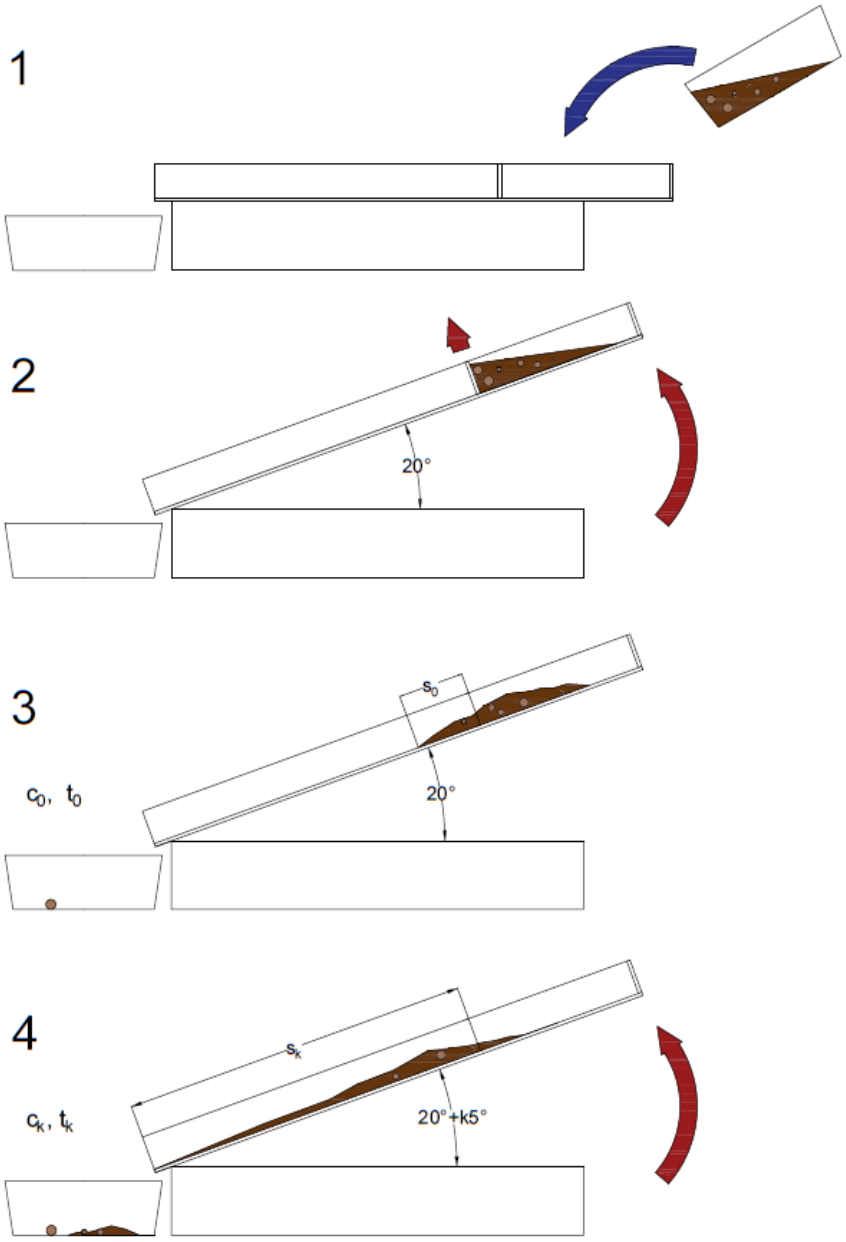


Figura 27 – Procedura della prova TST

6.1.2 Costruzione di un criterio di valutazione

Durante la campagna di indagine durante la procedura sono state fatte una serie di misure ritenute idonee a caratterizzare il comportamento dell'insieme di pasta e ciottoli.

In una prima fase ci si è limitati a registrare lo scorrimento della pasta e il numero di elementi lapidei recuperati in vasca di raccolta a ogni incremento di inclinazione.

Durante seconda fase, viste le correlazioni individuate, sono state eseguite misure più elaborate in modo da poter eseguire delle valutazioni ponderali sulla distribuzione delle masse delle due componenti in ogni fase della prova. In particolare oltre alle misure già prese anche nella prima fase, ad ogni step si è determinato il peso degli elementi lapidei e di terreno caduti in vasca di raccolta per determinare un criterio di comportamento del materiale.
Un terreno con comportamento omogeneo si avrà in vasca di raccolta una composizione granulometrica coincidente con quella del campione originale a ogni incremento di inclinazione. Al contrario, il comportamento è tanto più disomogeneo quanto più la composizione granulometrica del terreno in vasca di raccolta si discosta da quella del campione originale.
La valutazione della percentuale in peso di ciottoli ottenuti in vasca di raccolta rispetto il totale dei ciottoli %C e della percentuale di terreno in peso ottenuti in vasca di raccolta rispetto il totale, %F, sono indice del comportamento della pasta.

Andando a valutare la percentuale in peso di ciottoli ottenuti in vasca di raccolta rispetto al totale dei ciottoli e la percentuale di terreno in peso rispetto il totale del terreno e disponendole su due grafici in funzione dell'inclinazione si può rappresentare l'evoluzione della prova. In Figura 28 - Figura 32 si riportano i grafici corrispondenti a dei comportamenti limite.
In Figura 28 si può osservare che l'incremento della percentuale di ciottoli in vasca di raccolta e l'incremento della percentuale di pasta in vasca di raccolta avvengono in modo proporzionato tra loro e a un ritmo costante durante la prova. Questo comportamento è indice di un sistema a carattere viscoso in cui ciottoli e pasta si muovono in modo omogeneo.

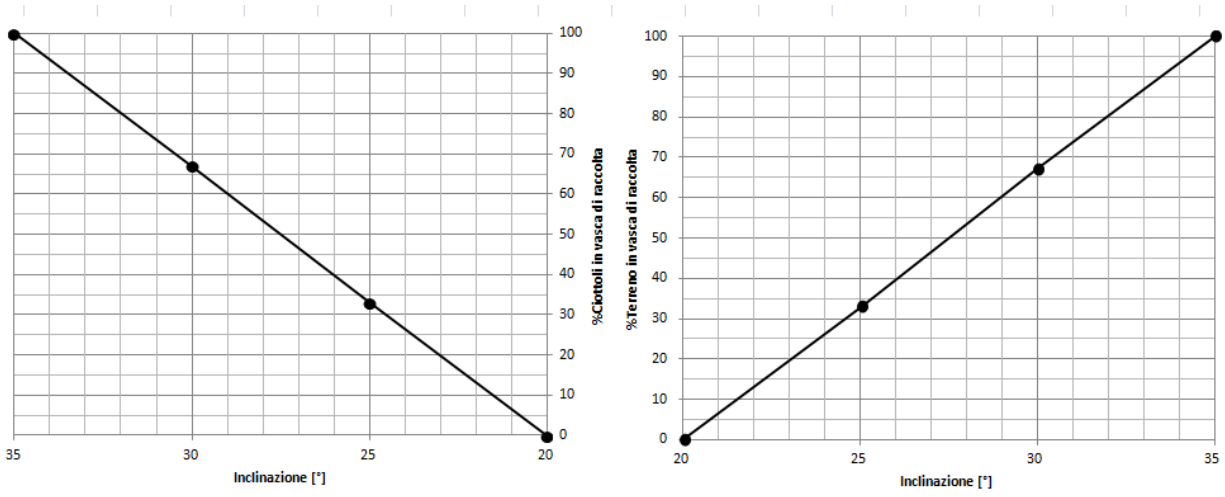


Figura 28 – Grafico interpretativo della prova TST, condizioni di scorrimento omogeneo

Il diagramma riportato in Figura 29 l'incremento della percentuale di ciottoli in vasca di raccolta e l'incremento della percentuale di pasta in vasca di raccolta avvengono in modo proporzionato e si

concentrano nella prima fase della prova. Questo comportamento è indice di un comportamento in cui i ciottoli e la pasta si muovono in modo omogeneo.

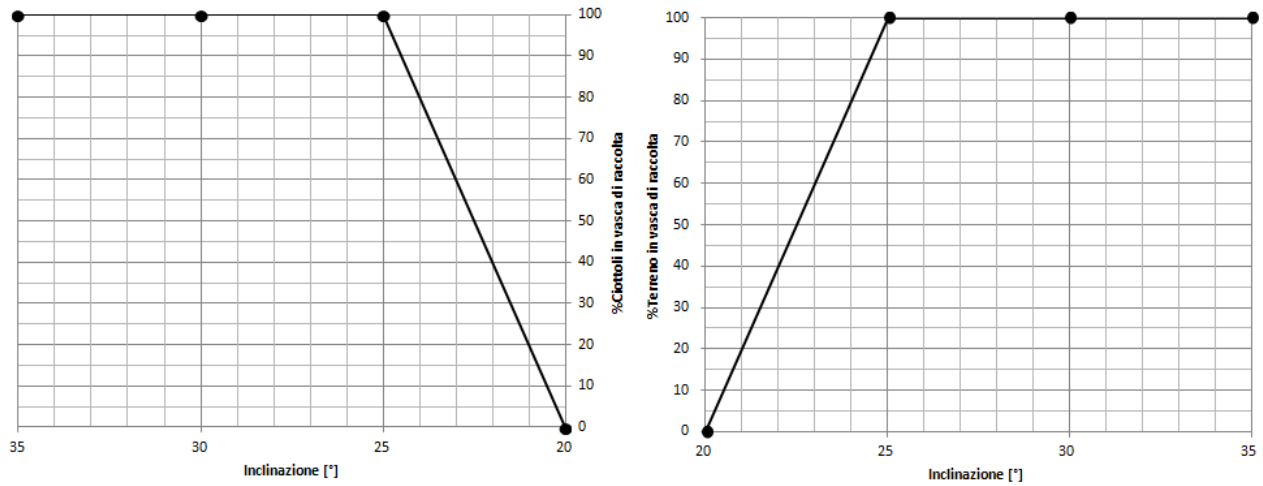


Figura 29 – Grafico interpretativo della prova TST, comportamento omogeneo con scorrimento rapido a 25°

Il diagramma riportato in Figura 30 l'incremento della percentuale di ciottoli in vasca di raccolta e l'incremento della percentuale di pasta in vasca di raccolta avvengono in modo proporzionato e si concentrano nell'ultima fase della prova. Questo comportamento è indice di un comportamento in cui i ciottoli e la pasta si muovono in modo omogeneo.

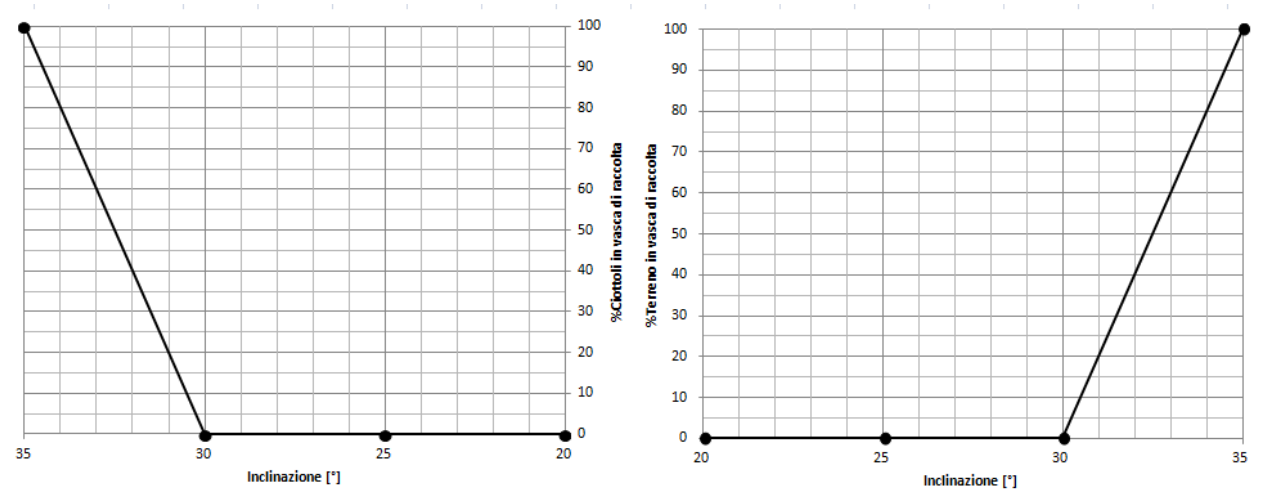


Figura 30 - Grafico interpretativo della prova TST, comportamento omogeneo con scorrimento rapido a 35°

Il diagramma riportato in Figura 31 e Figura 32 l'incremento della percentuale di ciottoli in vasca di raccolta e l'incremento della percentuale di pasta in vasca di raccolta avvengono in modo non proporzionato. Questo comportamento è indice di un comportamento in cui i ciottoli e la pasta si muovono in modo non omogeneo.

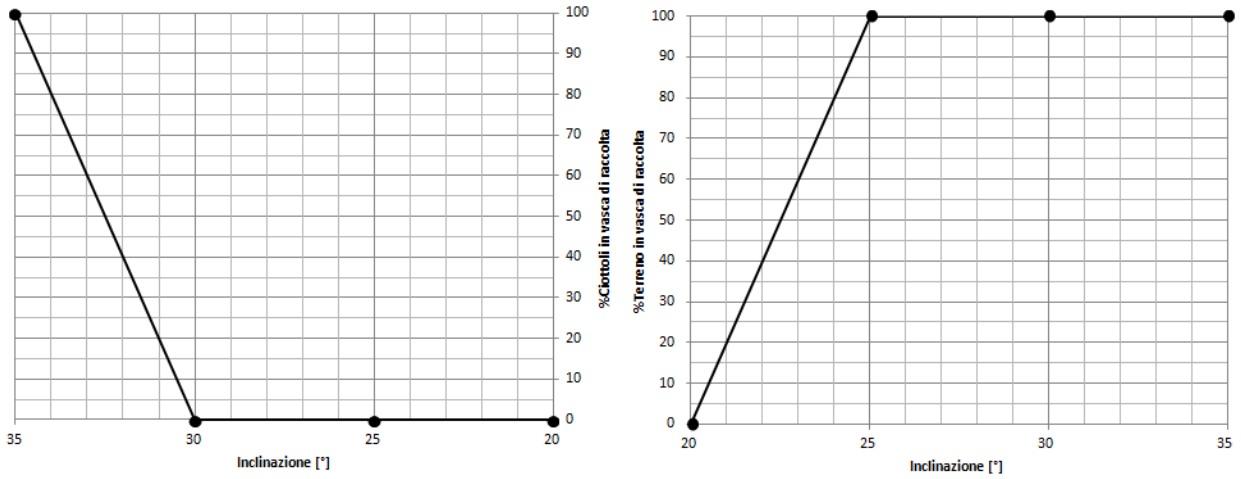


Figura 31 – Grafico interpretativo della prova TST, comportamento disomogeneo con scorrimento della pasta che precede il moto dei ciottoli

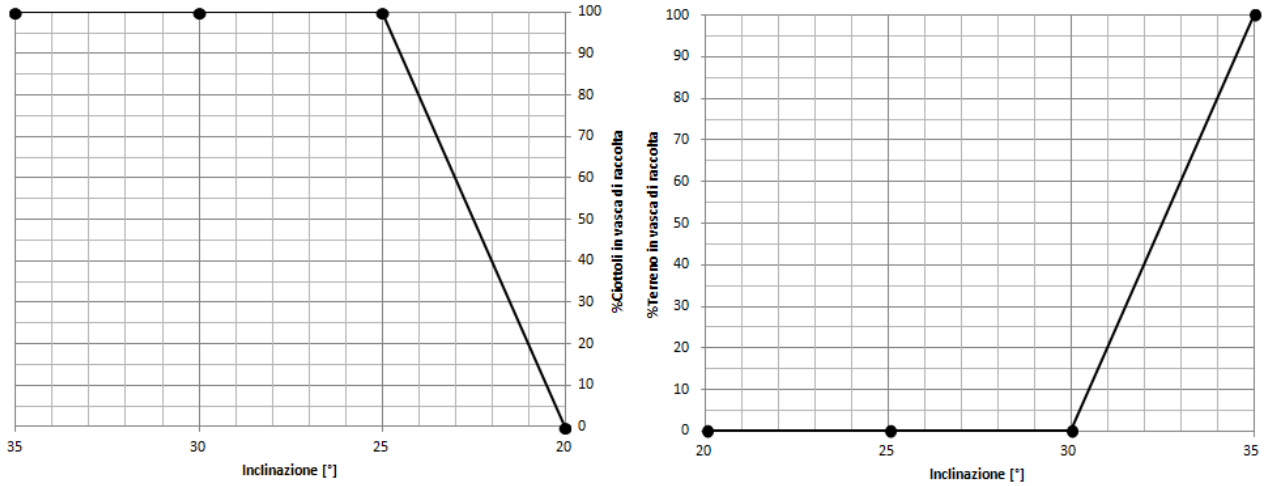


Figura 32 – Grafico interpretativo della prova TST, comportamento disomogeneo con moto dei ciottoli che precede lo scorrimento della pasta

Al fine di tarare e verificare il comportamento della prova è stata eseguita una campagna sperimentale sui terreni già studiati nel Capitolo 4.

Le prove TST sono state condotte su due tipologie di terreno. La prima, d'ora in poi denominata "Terreno A" è stato ricostituito secondo le proporzioni granulometriche originali eliminando gli elementi di dimensione superiore ai 100 mm, la seconda tipologia, d'ora in poi denominata, "Terreno B" è stato ricostituito secondo le stesse modalità del "Terreno A" ma eseguendo il taglio a 55 mm di diametro.

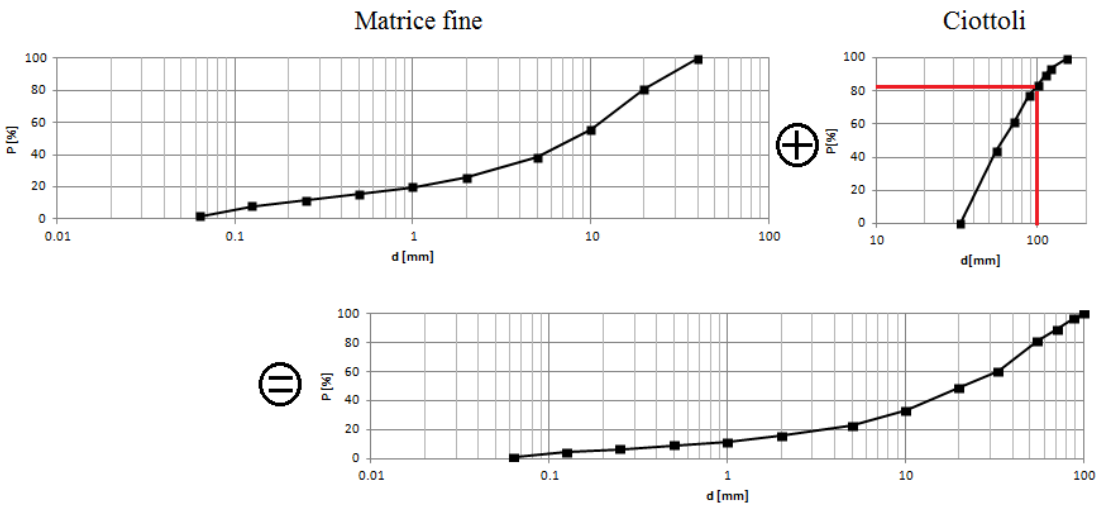


Figura 33 – Schema di ricostituzione del Terreno A

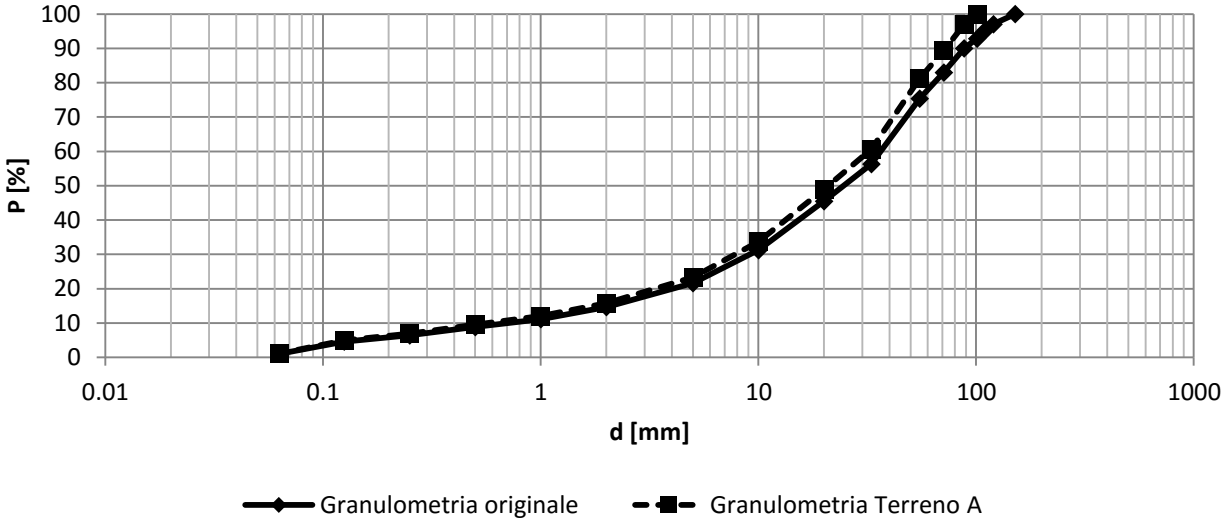


Figura 34 – Confronto tra curva granulometrica originale e del Terreno A

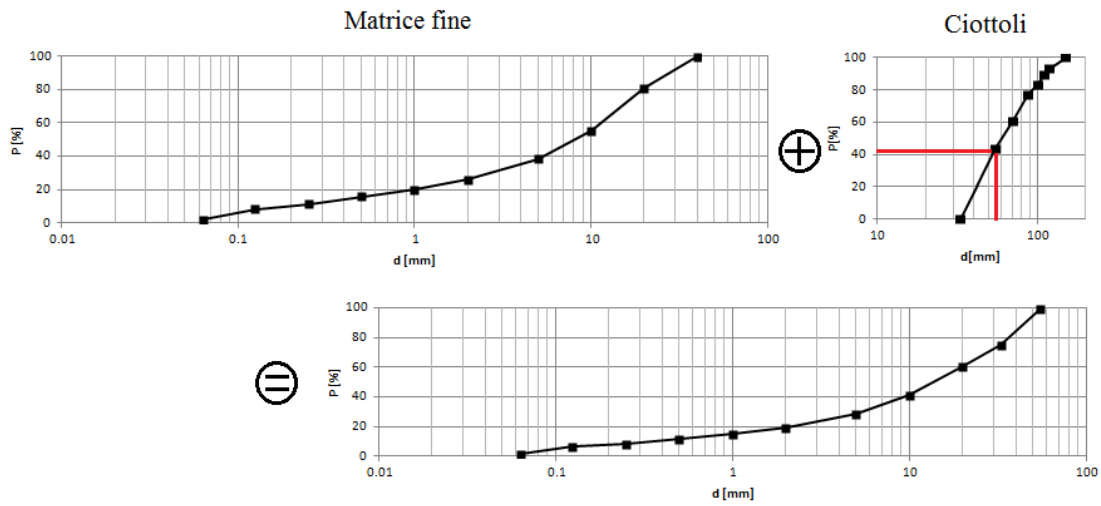


Figura 35 - Schema di ricostituzione del Terreno B

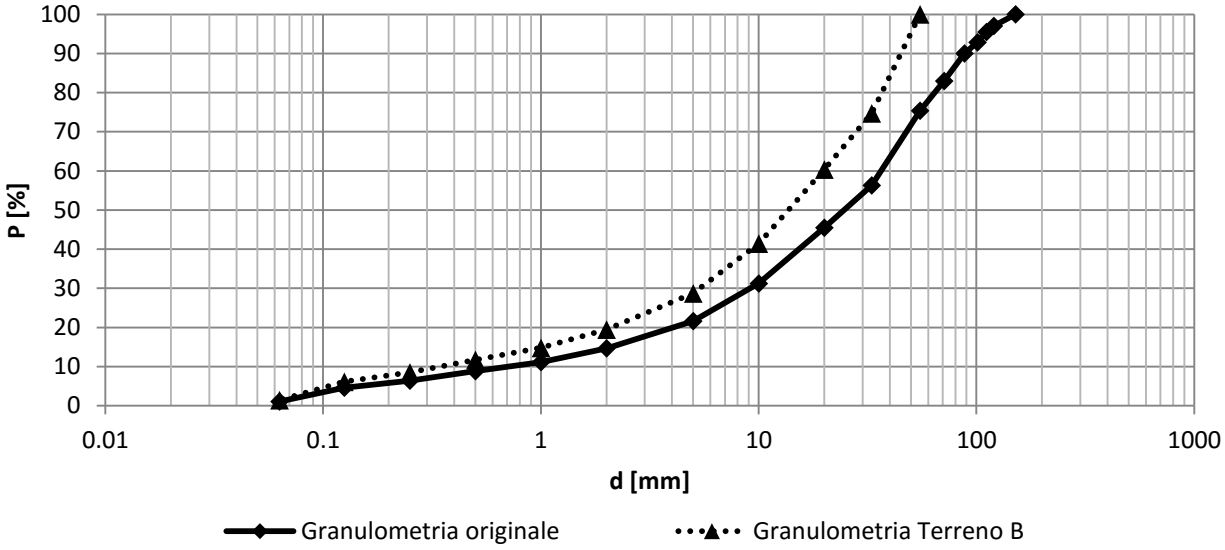


Figura 36 - Confronto tra curva granulometrica originale e del Terreno B

Si riportano in

Tabella 26 i dati dei campioni e dei relativi condizionamenti eseguiti per ogni prova.

Al fine di una più facile interpretazione dei risultati delle prove, nel seguito ogni prova sarà contraddistinta da un codice strutturato come segue:

TSTHH_mJJφKKK_wWW_FIRXX_pYYtZZ

dove:

- TSTHH indica il nome della prova;
- mJJ indica la massa del campione espressa in kg;
- φKKK indica il diametro massimo, espresso in mm, dei ciottoli;
- wWW indica il contenuto d'acqua totale percentuale;

- FIRXX indica il quantitativo percentuale volume su volume di schiuma immessa per il condizionamento;
- pYY indica il quantitativo di polimero immesso espresso in grammi per 100 kg di terreno condizionato;
- tZZ indica il tempo intercorso tra l'aggiunta del polimero e l'esecuzione della prova espresso in minuti.

Le dimensioni dei campioni utilizzate sono 15 kg, 26 kg e 40 kg. La scelta di queste dimensioni deriva dalla massa minima che può essere condizionata efficacemente con l'attrezzatura disponibile in laboratorio, cioè 15 kg. A partire da 15 kg di fine, ricostruendo il terreno secondo le proporzioni originali tra passante ai 30 mm e trattenuto ai 30 mm si ottengono campioni da 26 kg. I campioni da 40 kg sono stati ottenuti incrementando la massa del campione passante ai 30 mm a 24 kg.

Nel codice non è presente il FER in quanto, in questa campagna di prove, è stato posto pari a 10 per tutte le prove.

Codice prova	Prova	M_{fine} [kg]	$M_{campione}$ [kg]	D_{max} [mm]	w_n [%]	w_{add} [%]	w_{tot} [%]	c_s [%]	FER [-]	FIR [%]	FIR [%]	c_{poly} [%]	t [min]	t [min]	Fase di sperimentazione
TST01_m15ϕ030_w10_FIR30_p15t00	01	15	15	30	7	3	10	1.5	10	30	30	0.015	-	00	1
TST02_m26ϕ100_w10_FIR30_p15t00	02	15	27	100	7	3	10	1.5	10	30	30	0.015	-	00	1
TST03_m26ϕ100_w12_FIR30_p00t00	03	15	27	100	7	5	12	1.5	10	30	30	-	-	00	1
TST04_m26ϕ100_w12_FIR30_p15t00	04	15	27	100	7	5	12	1.5	10	30	30	0.015	-	00	1
TST05_m26ϕ100_w12_FIR30_p15t20	05	15	27	100	7	5	12	1.5	10	30	30	0.015	20	20	1
TST06_m26ϕ100_w10_FIR20_p25t00	06	15	27	100	7	3	10	3	10	20	20	0.025	-	00	2
TST07_m26ϕ100_w10_FIR45_p50t00	07	15	27	100	7	3	10	3	10	45	45	0.050	-	00	2
TST08_m40ϕ100_w12_FIR00_p00t00	08	23	40	100	7	5	12	-	-	-	-	-	-	00	2
TST09_m40ϕ100_w12_FIR30_p00t00	09	23	40	100	7	5	12	1.5	10	30	30	-	-	00	2
TST10_m26ϕ055_w12_FIR00_p00t00	10	15	27	55	7	5	12	-	-	-	-	-	-	00	2
TST11_m26ϕ055_w12_FIR30_p00t00	11	15	27	55	7	5	12	1.5	10	30	30	-	-	00	2
TST12_m26ϕ055_w12_FIR30_p15t00	12	15	27	55	7	5	12	1.5	10	30	30	0.015		00	2
TST13_m26ϕ055_w12_FIR30_p30t00	13	15	27	55	7	5	12	1.5	10	30	30	0.030		00	2
TST14_m26ϕ055_w12_FIR30_p15t60	14	15	27	55	7	5	12	1.5	10	30	30	0.015	60	60	2
TST15_m26ϕ055_w12_FIR30_p30t60	15	15	27	55	7	5	12	1.5	10	30	30	0.030	60	60	2
TST16_m40ϕ100_w12_FIR30_p15t00	16	23	40	100	7	5	12	1.5	10	30	30	0.015	-	00	2

M_{fine}: massa del passante al 30 mm presente nel campione; $M_{campione}$: massa totale del campione; D_{max}: diametro massimo dei ciottoli nel campione; w_n: contenuto d'acqua naturale del campione; w_{add}: quantità di acqua aggiunta durante il condizionamento; w_{tot}: contenuto d'acqua totale; c_s: concentrazione dello schiumogeno; FER: Foam Expansion Ratio; FIR: Foam Injection Ratio; c_{poly}: concentrazione del polimero in peso su peso del fine; t:tempo intercorso tra l'aggiunta del polimero e l'esecuzione della prova.

Tabella 26 - Condizionamento dei campioni nella seconda fase delle prove TST

6.2 Risultati

Come anticipato al capitolo 6.1.2 durante la prima fase di sperimentazione si sono raccolti solamente i dati riguardando lo scorrimento e il numero di ciottoli in vasca di raccolta. Questi dati sono disponibili anche per le prove eseguite in seconda fase quindi, nella sezione riguardante la prima fase di sperimentazione saranno analizzati i risultati ottenuti in termini di scorrimento e numero di ciottoli in vasca di raccolta, mentre nella sezione riguardante la seconda fase di sperimentazione si commenteranno i risultati ottenuti in termini di peso della pasta e peso dei ciottoli in vasca di raccolta. Durante la seconda fase, è stato predisposto un sistema per l'acquisizione video delle prove per eseguire un esame visivo più accurato.
Tale sistema è stato realizzato ponendo una videocamera su un treppiede a 1.50 m dal fondo dello scivolo in modo da riprendere tutto lo scivolo e tutta la vasca di raccolta in ogni istante della prova.

6.2.1 Prima fase di sperimentazione

Prova TST1

La prova TST1 è stata eseguita senza ciottoli per valutare il comportamento della sola pasta. Il campione ha una massa di 15 kg. Il condizionamento utilizzato fornisce una caduta allo slump di 18 cm e il comportamento è adeguato ai fini dell'utilizzo in macchina secondo gli schemi interpretativi proposti da Peila et al. (2007). Si è misurato lo scorrimento verificando che il raggiungimento del fondo avvenisse all'interno del range di inclinazione scelto per la prova, cioè tra 20° e 35°.

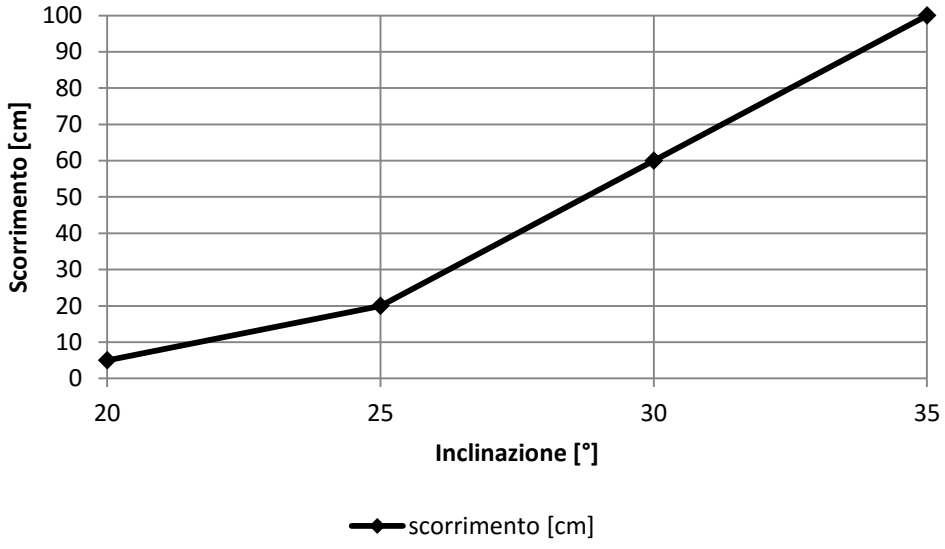


Figura 37 – Risultati ***TST01_m15φ030_w10_FIR30_p15t00***

Prova TST2

Utilizzando la stessa tipologia di condizionamento della prova TST1, si è eseguita una prova con un campione ricostituito con ciottoli, tipologia di terreno A. Il campione ha massa totale di 26 kg.

Per effetto della presenza di ciottoli, si è osservato, rispetto a quello registrato per la prova TST1, un incremento dello scorrimento (incremento del 75% a 25°).
La curva dei ciottoli in vasca di raccolta mostra uno sviluppo regolare al variare dell'inclinazione del piano.

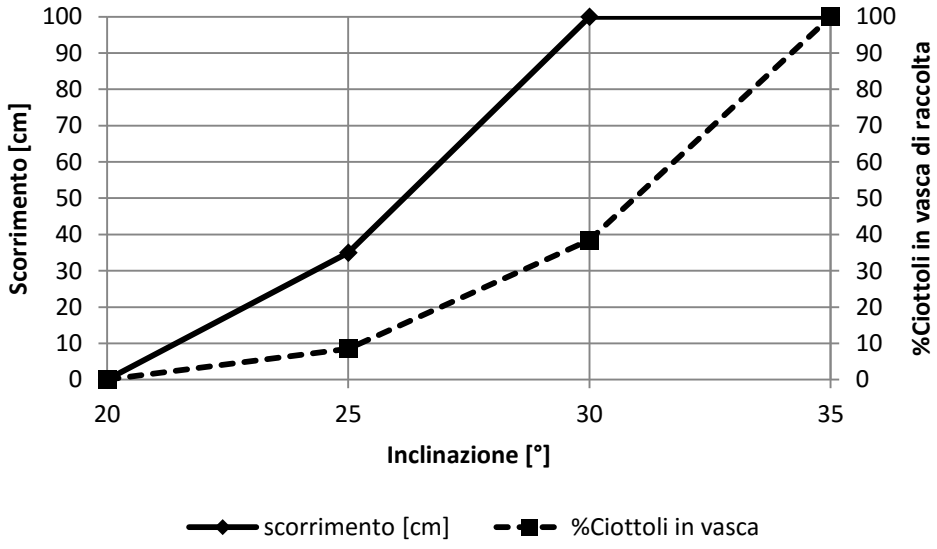


Figura 38 – Risultati ***TST02_m26φ100_w10_FIR30_p15t00***

Prova TST3

La prova TST3 è stata condotta su un campione di terreno A da 26 kg.
Il condizionamento, è stato realizzato con un contenuto d'acqua superiore a quello delle prove precedenti e senza utilizzare polimeri aggreganti.

Si è osservato un notevole aumento dello scorrimento in ogni fase accompagnato da un incremento di ciottoli in vasca di raccolta altrettanto importante.

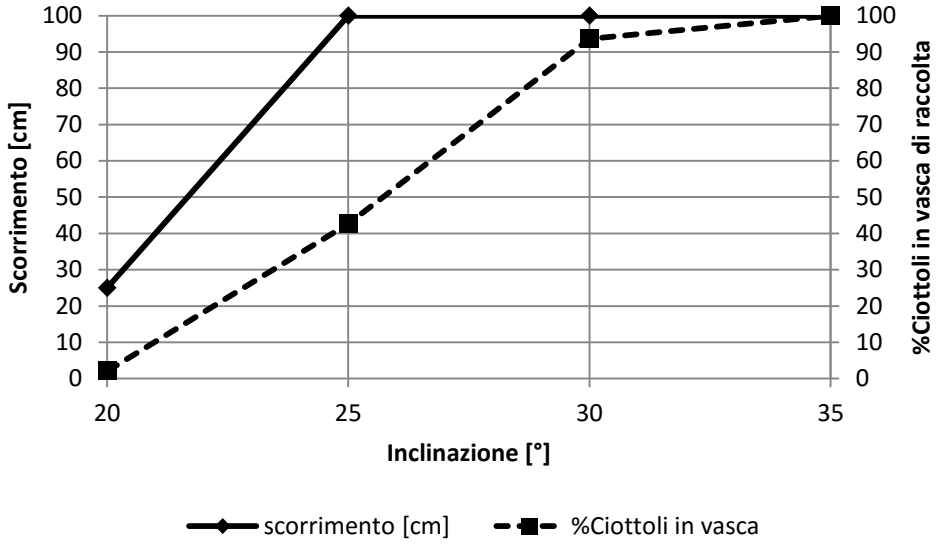


Figura 39 – Risultati ***TST03_m26φ100_w12_FIR30_p00t00***

Prova TST4

La prova TST4 è stata eseguita su un campione da 26 kg di terreno A condizionato con 12% di contenuto d'acqua totale, FER 10, FIR 30 e 0.015% di polimero aggregante.

Si osserva uno scorrimento regolare con raggiungimento del fondo scala a 30°. La curva dei ciottoli in vasca di raccolta mostra un andamento regolare e non evidenzia fenomeni di scivolamento in massa accentuati.

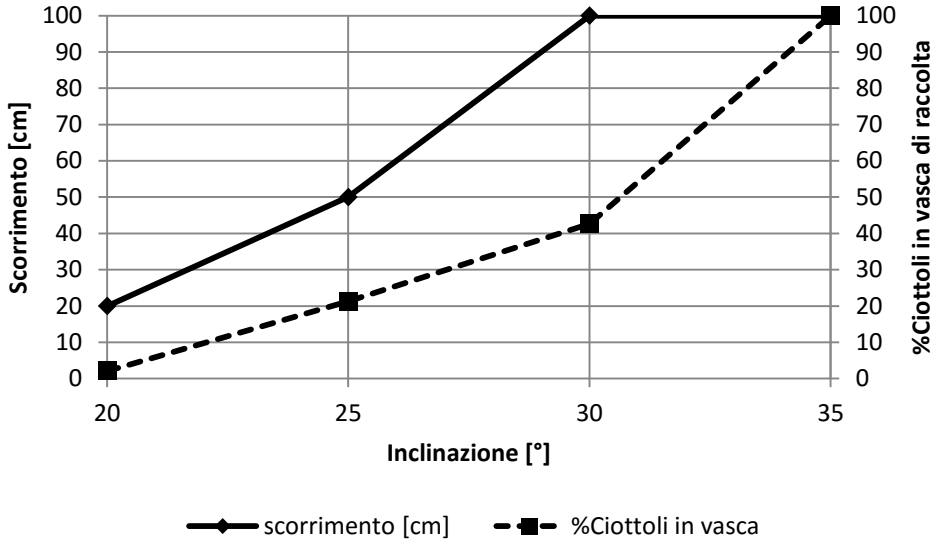


Figura 40 - Risultati ***TST04_m26φ100_w12_FIR30_p15t00***

Prova TST5

Al fine di valutare l'influenza del tempo intercorso tra il condizionamento e l'esecuzione della prova, si è fatto un test utilizzando la stessa tipologia di campione e di condizionamento utilizzato in prova TST4 e si è lasciato trascorrere un lasso di tempo pari a 20 minuti prima di disporre il terreno condizionato sull'attrezzatura di prova.

Dai risultati riportati in Figura 41 si osserva uno sviluppo continuo di entrambe le quantità misurate.

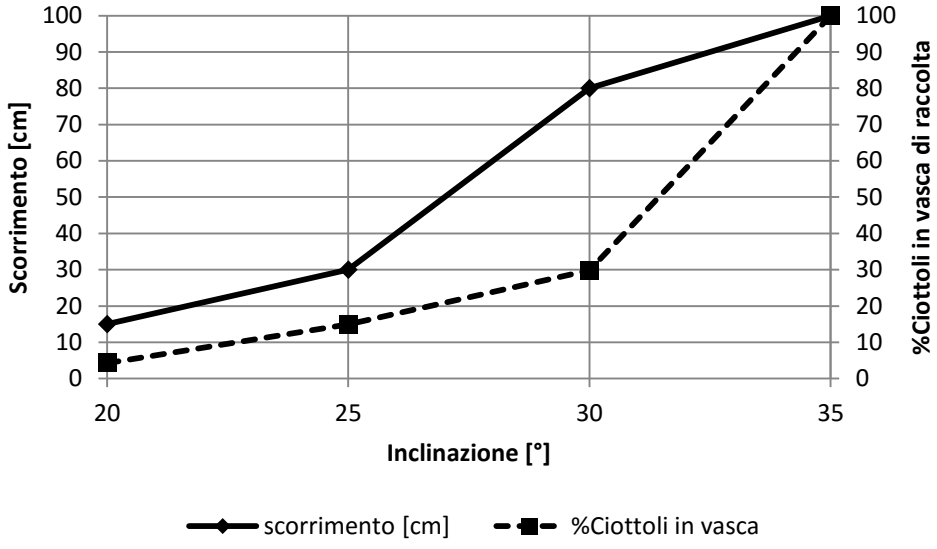


Figura 41 – Risultati ***TST05_m26φ100_w12_FIR30_p15t20***

TST6

La prova TST6 è stata eseguita su terreno di tipo A con campione da 26 kg. Il condizionamento è stato realizzato con il 10% di contenuto d'acqua totale, FER 10, FIR 20 e polimero aggregante in concentrazione del 0.025% su peso del fine.

Si osserva un repentino aumento dello scorrimento della pasta tra 30° e 35°, mentre l'incremento dei ciottoli in vasca di raccolta ha un andamento molto regolare. Quest'ultimo valore non supera il 60%, quindi l'effetto di controllo della pasta sui ciottoli è stato tanto elevato da impedire lo scivolamento del 40% dei ciottoli.

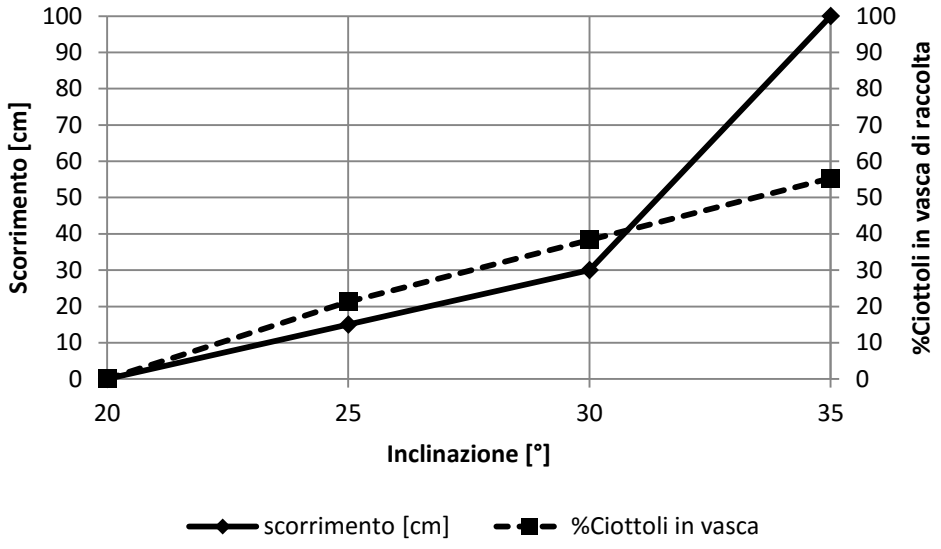


Figura 42 - Risultati ***TST06_m26φ100_w10_FIR20_p25t00***

TST7

La prova TST7 è stata eseguita su terreno di tipo A con campione da 26 kg. Il condizionamento è stato realizzato con il 10% di contenuto d'acqua totale, FER 10, FIR 45 e polimero aggregante in concentrazione del 0.050% su peso del fine.

Si osserva uno sviluppo regolare di scorrimento della pasta e dello scivolamento dei ciottoli. Quest'ultimo valore è pari a 61.7% a 35°, quindi l'effetto di controllo della pasta sui ciottoli è stato tanto elevato da impedire lo scivolamento quasi del 40% dei ciottoli.

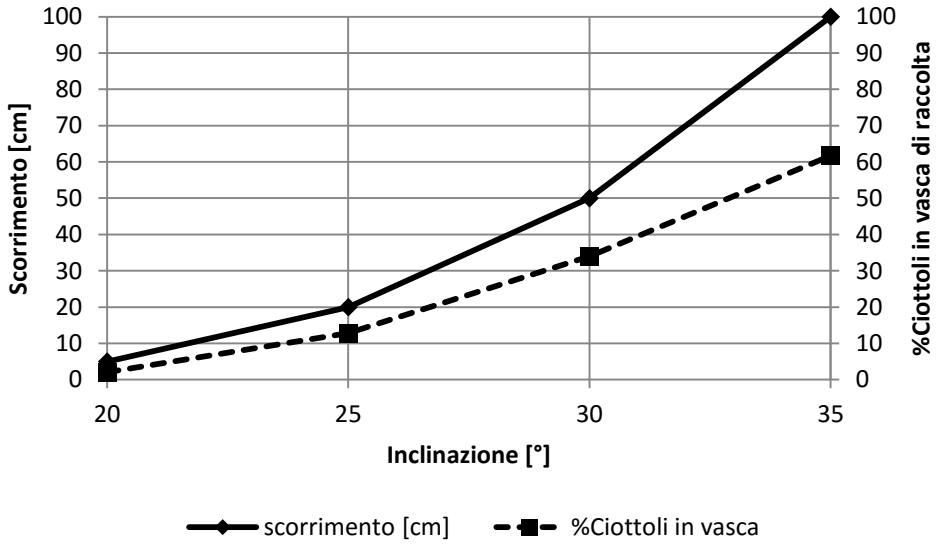


Figura 43 - Risultati ***TST07_m26φ100_w10_FIR45_p50t00***

TST8

La prova TST8 è stata eseguita su terreno di tipo A con campione da 40 kg. Il condizionamento è stato realizzato con il 12% di contenuto d'acqua totale, senza aggiungere schiuma e polimero aggregante.

Si osserva uno sviluppo repentino dello scorrimento della pasta tra i 20° e 25°. In modo analogo, si regista che il 67% dei ciottoli arriva in vasca di raccolta nell'intervallo tra 25° e 30°.

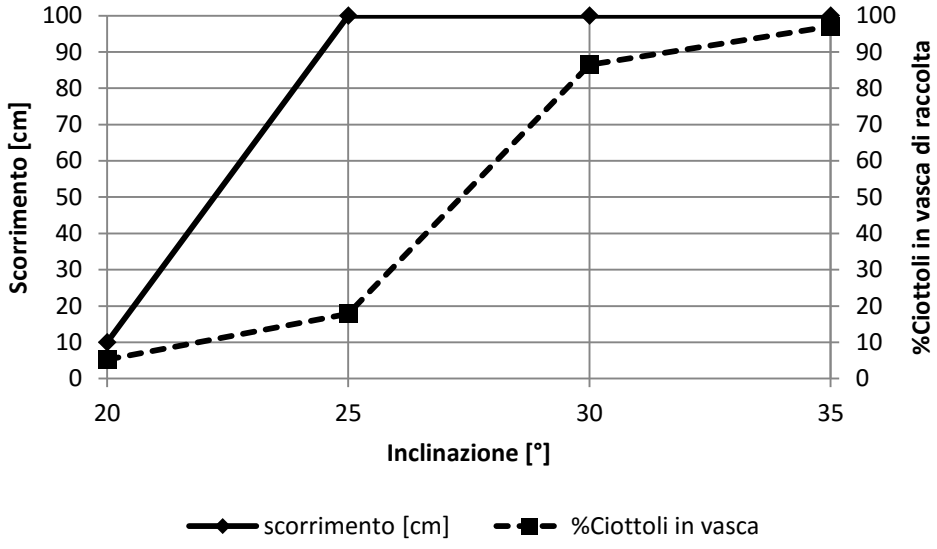


Figura 44 - Risultati ***TST08_m40φ100_w12_FIR00_p00t00***

TST9

La prova TST9 è stata eseguita su terreno di tipo A con campione da 40 kg. Il condizionamento è stato realizzato con il 12% di contenuto d'acqua totale, FER 10, FIR 30. Non è stato aggiunto polimero aggregante.

Si osserva uno scorrimento non trascurabile già a 20° che arriva a fondo scala a 25°. Come nella prova precedente, tra 25° e 30° arrivano in vasca di raccolta circa il 67% dei ciottoli.

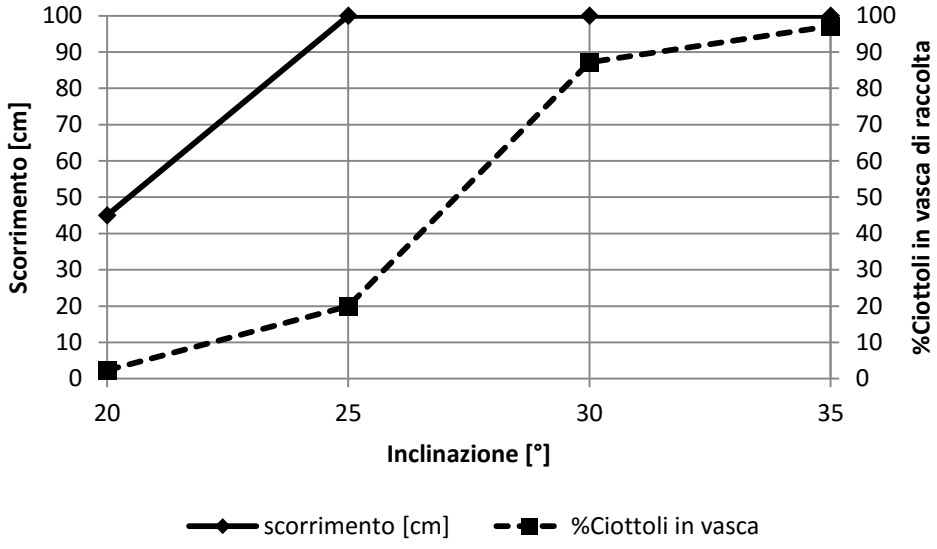


*Figura 45 - Risultati **TST09_m40φ100_w12_FIR30_p00t00***

TST10

La prova TST10 è stata eseguita su terreno di tipo B con campione da 26 kg. Il condizionamento è stato realizzato con il 12% di contenuto d'acqua totale, senza aggiunta di schiuma e polimero aggregante.

Lo sviluppo delle quantità misurate, scorrimento e percentuale di ciottoli in vasca di raccolta, è regolare. Si osserva che il 62.3% dei ciottoli arriva in vasca di raccolta nella fase tra i 20° e 25°.

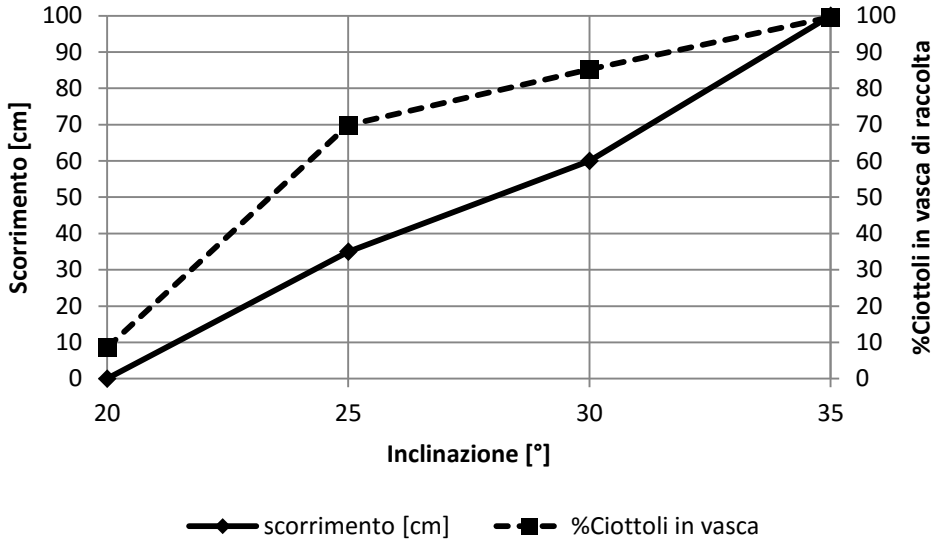


*Figura 46 - Risultati **TST10_m26φ055_w12_FIR00_p00t00***

TST11

La prova TST11 è stata eseguita su terreno di tipo B con campione da 26 kg. Il condizionamento è stato realizzato con il 12% di contenuto d'acqua totale, FER 10, FIR 30. Non è stato aggiunto polimero aggregante.

Da Figura 47 si osserva che lo scorrimento della pasta è pari a 60 cm a 20° e raggiunge il valore massimo già a 25°, mentre a 30° i ciottoli in vasca di raccolta sono il 95% del totale.

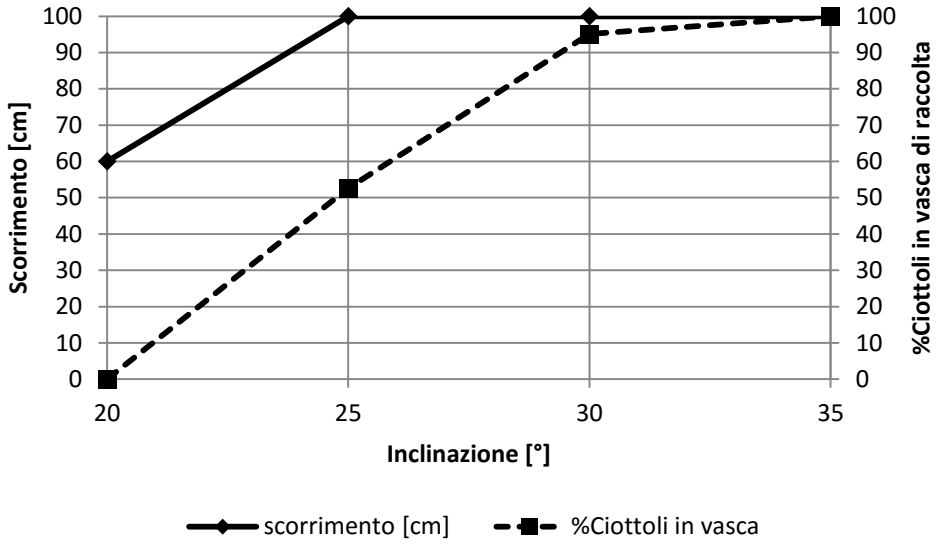


Figura 47 Risultati ***TST11_m26φ055_w12_FIR30_p00t00***

TST12

La prova TST12 è stata eseguita su terreno di tipo B con campione da 26 kg. Il condizionamento è stato realizzato con il 12% di contenuto d'acqua totale, FER 10, FIR 30 e polimero aggregante in concentrazione dello 0.015% su peso del fine.

Da Figura 48 si osserva che lo scorrimento della pasta è pari a 50 cm a 20° e raggiunge il valore massimo già a 25°, mentre a 30° i ciottoli in vasca di raccolta sono il 92% del totale.

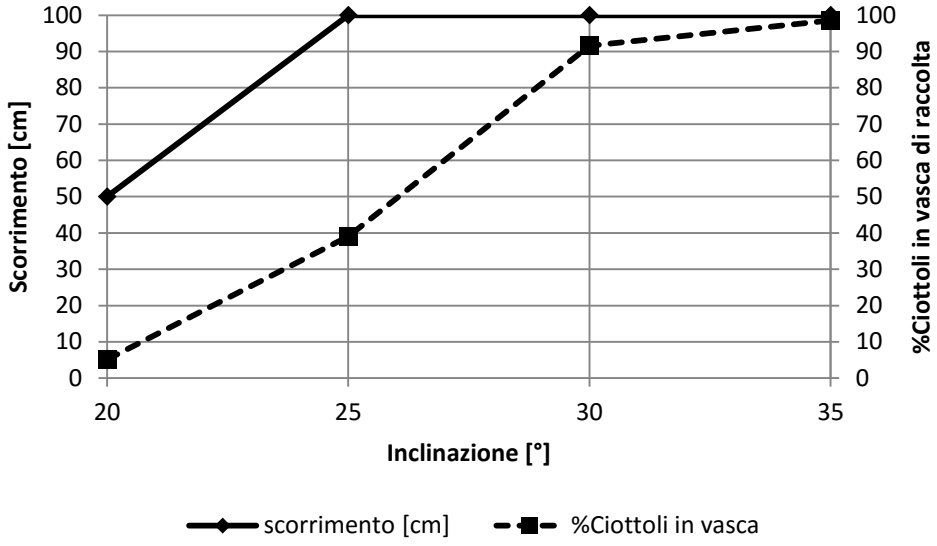


Figura 48 - Risultati ***TST12_m26φ055_w12_FIR30_p15t00***

TST13

La prova TST13 è stata eseguita su terreno di tipo B con campione da 26 kg. Il condizionamento è stato realizzato con il 12% di contenuto d'acqua totale, FER 10, FIR 30 e polimero aggregante in concentrazione dello 0.030% su peso del fine.

Si osserva uno sviluppo regolare di entrambe le quantità misurate, scorrimento della pasta e percentuale di ciottoli in vasca di raccolta.

Lo scorrimento raggiunge il valore massimo a 30° partendo da 20 cm a 20°.

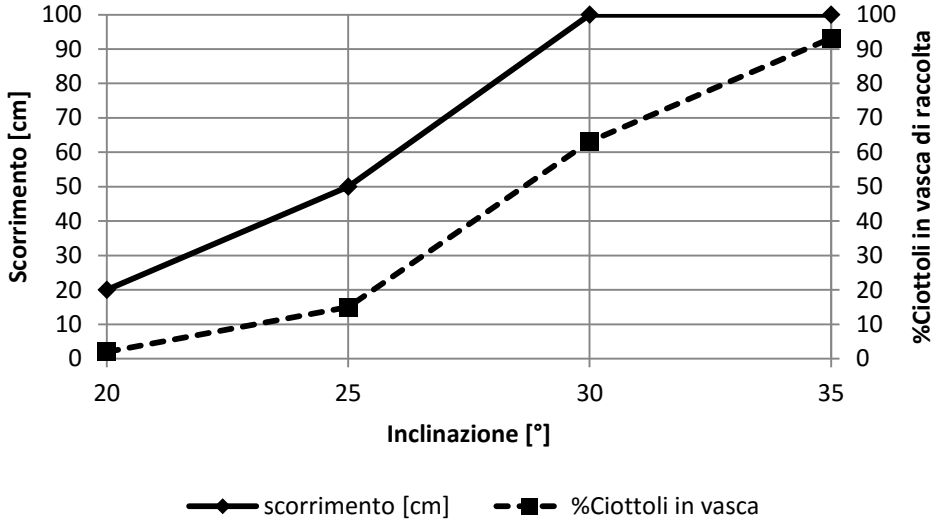


*Figura 49 - Risultati **TST13_m26φ055_w12_FIR30_p30t00***

TST14

La prova TST14 è stata eseguita su terreno di tipo B con campione da 26 kg. Il condizionamento è stato realizzato con il 12% di contenuto d'acqua totale, FER 10, FIR 30 e polimero aggregante in concentrazione dello 0.015% su peso del fine. La prova è stata eseguita 60 minuti dopo l'aggiunta del polimero.

Si osserva uno sviluppo regolare dello scorrimento della pasta che, partendo da 20 cm a 20°, raggiunge il valore massimo con un'inclinazione di 30°.

La percentuale di ciottoli in vasca di raccolta subisce un incremento del 70% tra 25° e 30°.

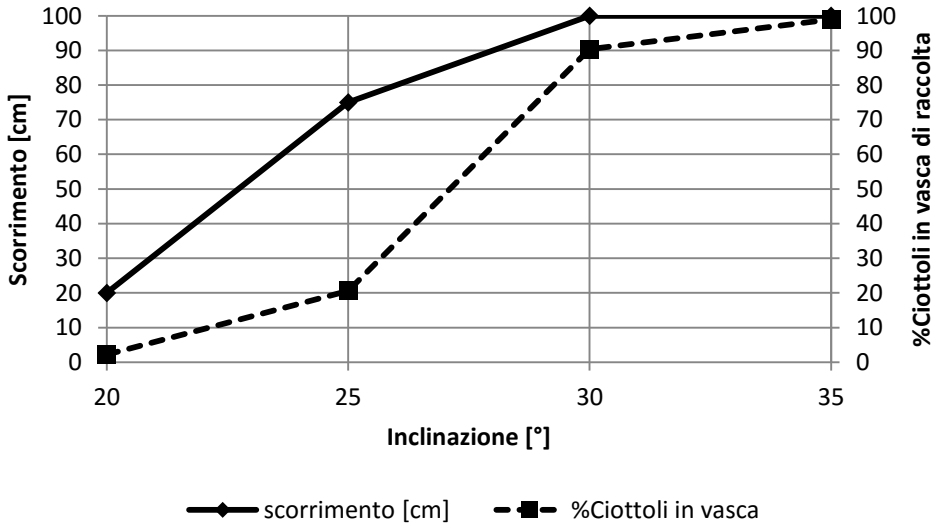


*Figura 50 - Risultati **TST14_m26φ055_w12_FIR30_p15t60***

TST15

La prova TST15 è stata eseguita su terreno di tipo B con campione da 26 kg. Il condizionamento è stato realizzato con il 12% di contenuto d'acqua totale, FER 10, FIR 30 e polimero aggregante in concentrazione dello 0.030% su peso del fine. La prova è stata eseguita 60 minuti dopo l'aggiunta del polimero.

Si osserva uno sviluppo regolare di scorrimento della pasta e percentuale di ciottoli in vasca di raccolta. In particolare, si può vedere che a 35° il 25% dei ciottoli si trova ancora sullo scivolo.

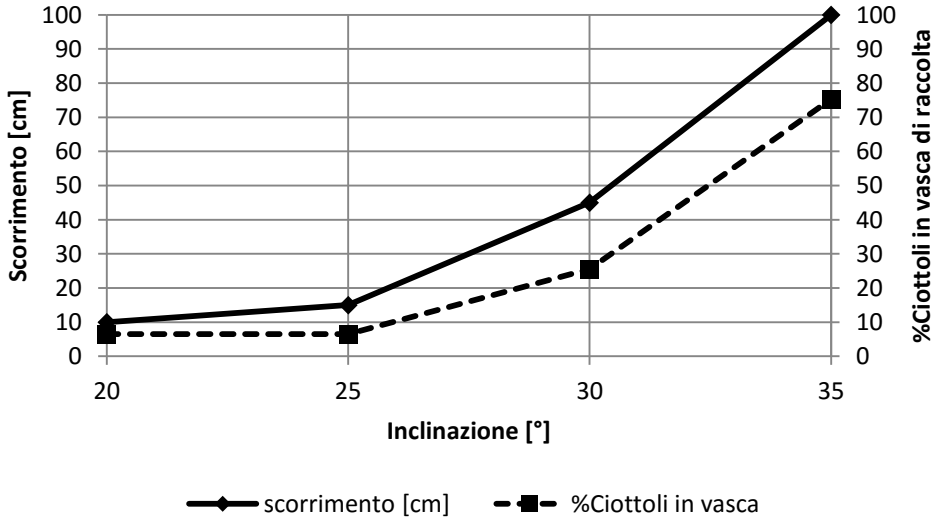


Figura 51 - Risultati ***TST15_m26φ055_w12_FIR30_p30t60***

TST16

La prova TST16 è stata eseguita su terreno di tipo A con campione da 40 kg. Il condizionamento è stato realizzato con il 12% di contenuto d'acqua totale, FER 10, FIR 30 e polimero aggregante in concentrazione dello 0.015% su peso del fine.

Si osserva uno scorrimento elevato, pari a 40 cm, già all'atto di rimozione della sponda trasversale. A 25° la pasta scorre fino alla fine dello scivolo.

La percentuale di ciottoli in vasca di raccolta aumenta in modo uniforme al crescere dell'angolo di inclinazione.

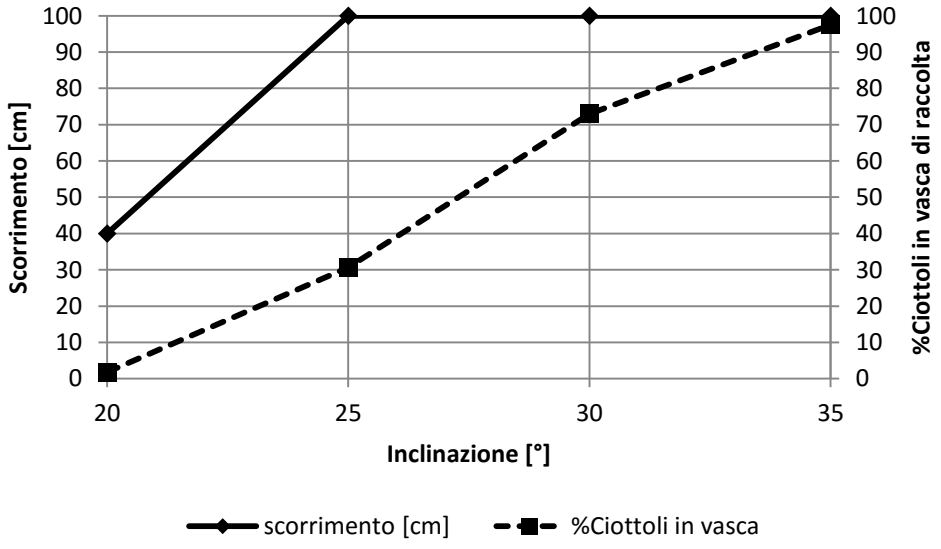


Figura 52 - Risultati ***TST16_m40φ100_w12_FIR30_p15t00***

6.2.2 Confronto dei risultati della prima fase

- Influenza del condizionamento

Al fine di valutare l'influenza degli agenti condizionanti utilizzati si riportano dei confronti eseguiti tra gruppi di risultati di prove effettuate mantenendo tutti gli altri parametri invariati.

Il primo gruppo (TST2 e TST4) ha come unica variante il contenuto d'acqua totale.

Il secondo gruppo (TST3 e TST4) ha come unica variante la concentrazione di polimero aggregante.

Nel terzo gruppo (TST10, TST11, TST12 e TST13) si va da un campione con sola acqua a uno con acqua, schiuma e polimero aggregante in concentrazione 0.030% passando per due situazioni intermedie.

Il quarto gruppo (TST8, TST9 e TST16) è costituito da un campione con sola acqua, uno con acqua e schiuma e uno condizionato con acqua, schiuma e polimero aggregante.

Il primo gruppo è costituito da campioni da 26 kg di terreno A.

In Figura 53 e Figura 54 si osserva che l'incremento del contenuto d'acqua produce un incremento sia dello scorrimento che della percentuale di ciottoli in vasca di raccolta.

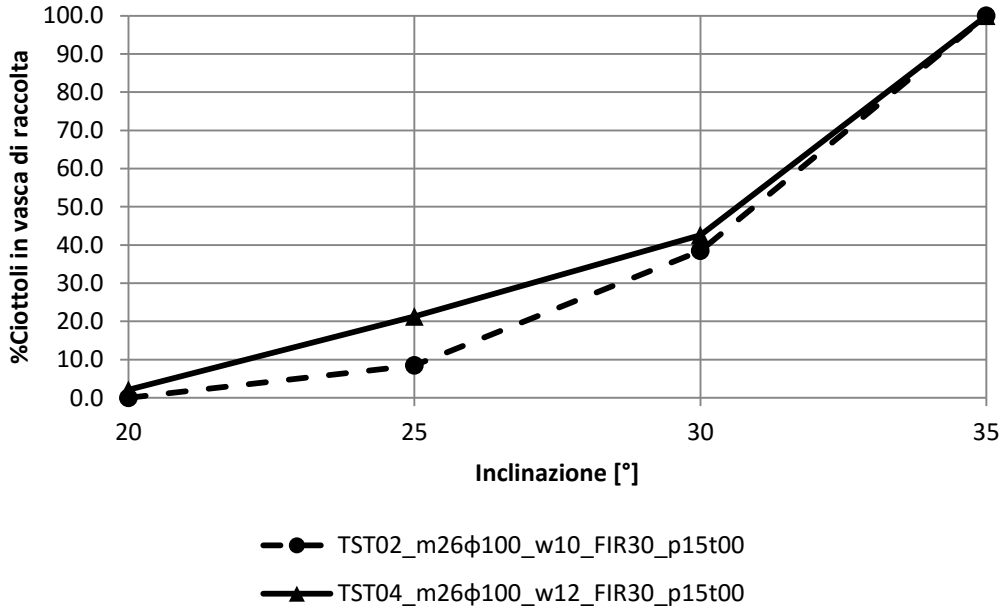


Figura 53 – Influenza dell'acqua sulla percentuale di ciottoli in vasca, confronto tra le prove TST2 e TST4

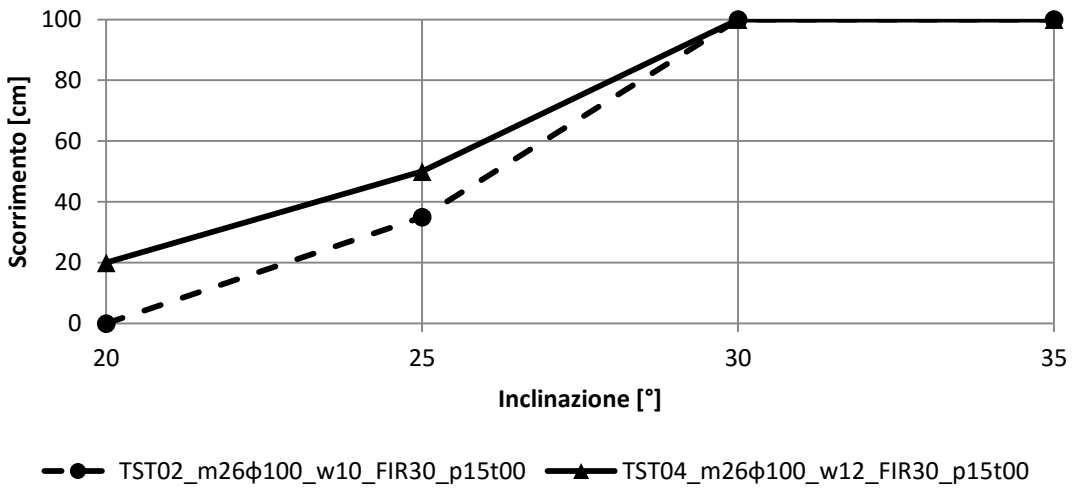


Figura 54 - Influenza dell'acqua sullo scorrimento della pasta, confronto tra le prove TST2 e TST4

Il secondo gruppo è costituito da campioni da 26 kg di terreno A.

In Figura 55 e Figura 56 si osserva che l'incremento della concentrazione del polimero aggregante produce una riduzione sia dello scorrimento che della percentuale di ciottoli in vasca di raccolta.

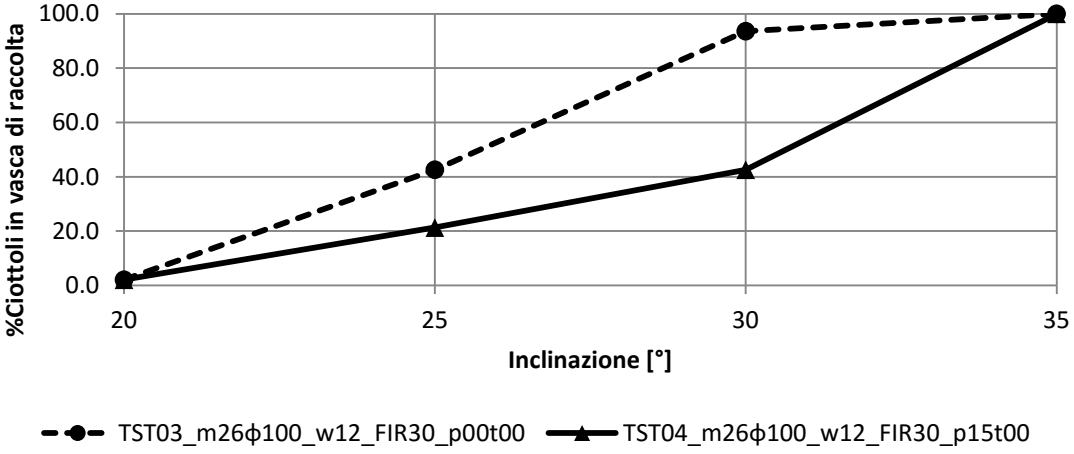


Figura 55 - Influenza del polimero sulla percentuale di ciottoli in vasca, confronto tra le prove TST3 e TST4

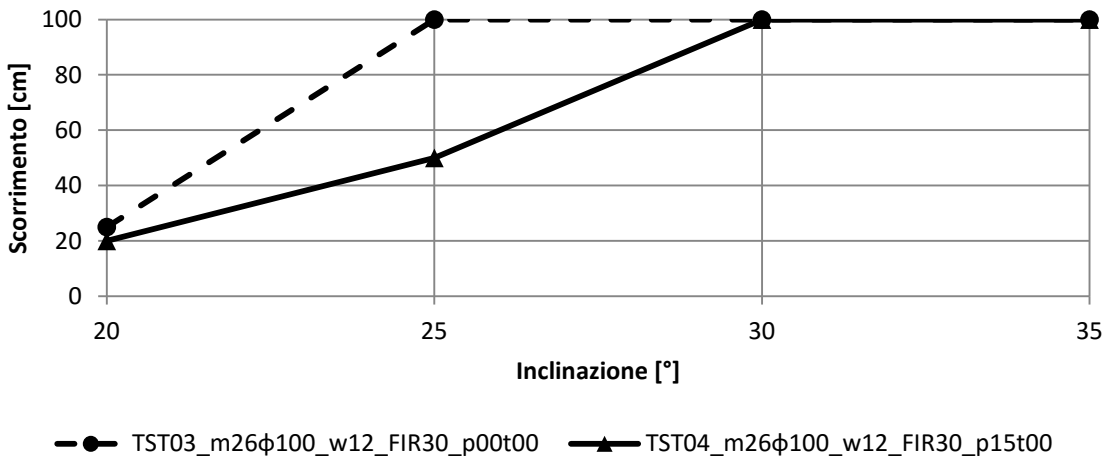


Figura 56 - Influenza del polimero sullo scorrimento della pasta, confronto tra le prove TST3 e TST4

Il terzo gruppo è costituito da campioni da 26 kg di terreno B.

Si individua una correlazione tra scorrimento della pasta e ciottoli in vasca. Si individua una riduzione di entrambi i parametri passando dal terreno condizionato con acqua e schiuma ai due campioni condizionati con acqua, schiuma e polimero aggregante. Al crescere della concentrazione di quest'ultimo si osserva che si riducono scorrimento della pasta e percentuale di ciottoli in vasca di raccolta analogamente a quanto già osservato nel secondo gruppo.

Il campione a cui è stata aggiunta solo acqua mostra un comportamento particolare. Come si può vedere in Figura 58, aggiungendo solo acqua lo scorrimento è inferiore a quello rilevato per i campioni condizionati con acqua e schiuma o acqua, schiuma e polimero. Per quanto riguarda la percentuale di ciottoli in vasca di raccolta, come si vede in Figura 57, il campione a cui è stata aggiunta solo acqua mostra scarse capacità di controllo a 25° (%ciottoli in vasca= 69.9%).

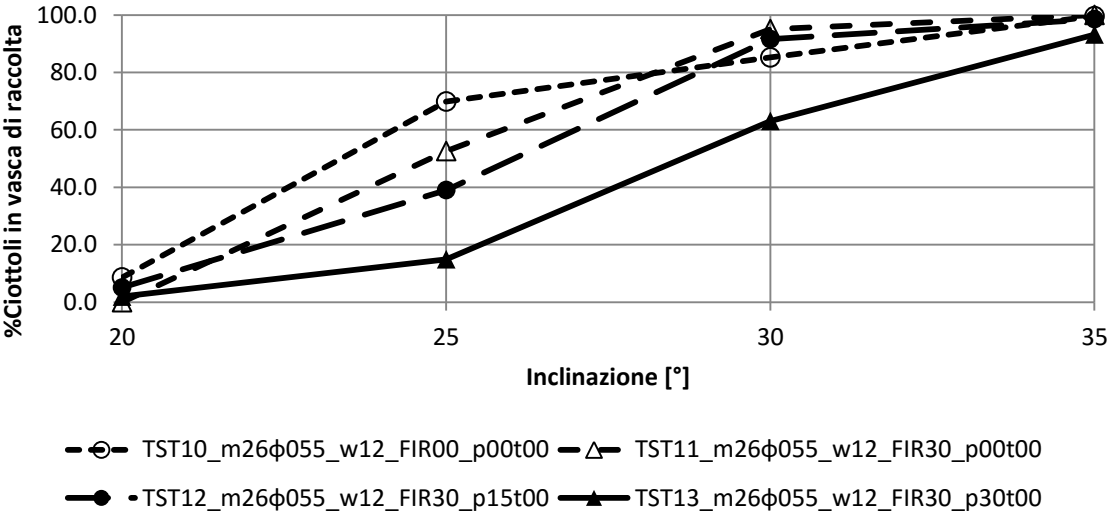


Figura 57 - Influenza del condizionamento sulla percentuale di ciottoli in vasca, confronto tra le prove TST10, TST11, TST12 e TST13

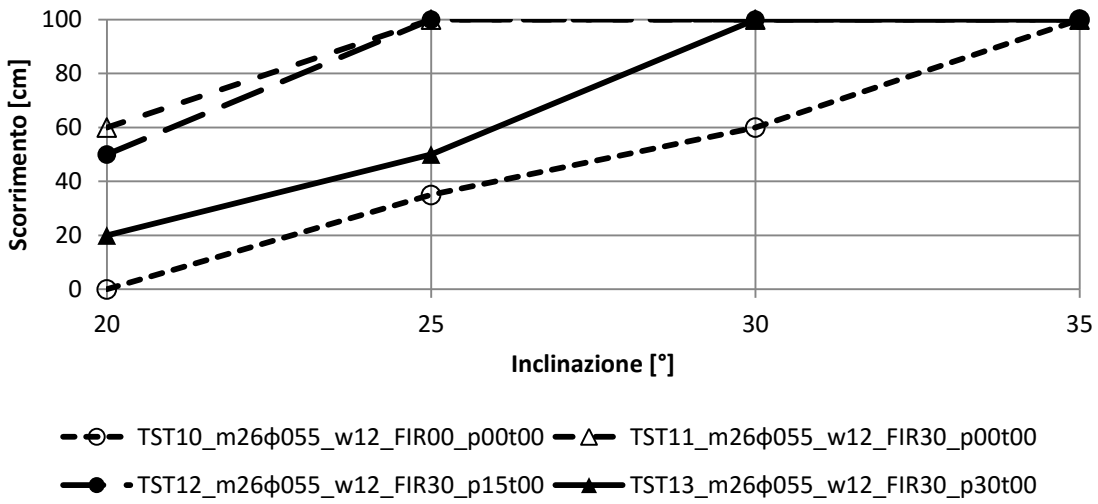


Figura 58 - Influenza del condizionamento sullo scorrimento della pasta, confronto tra le prove TST10, TST11, TST12 e TST13

Il quarto gruppo è costituito da campioni da 40 kg di terreno A.

In Figura 59 si vede che, in termini di percentuale di ciottoli in vasca di raccolta, l'aggiunta di schiuma produce una modifica del comportamento modestissima. L'aggiunta del polimero, invece, regolarizza il comportamento della massa riducendo la percentuale di ciottoli scivolati in vasca di raccolta tra 25° e 30°.

In Figura 60 si osserva che, in termini di scorrimento della pasta, il terreno a cui è stata aggiunta solo acqua subisce uno scorrimento molto minore a 20° rispetto agli altri due campioni.

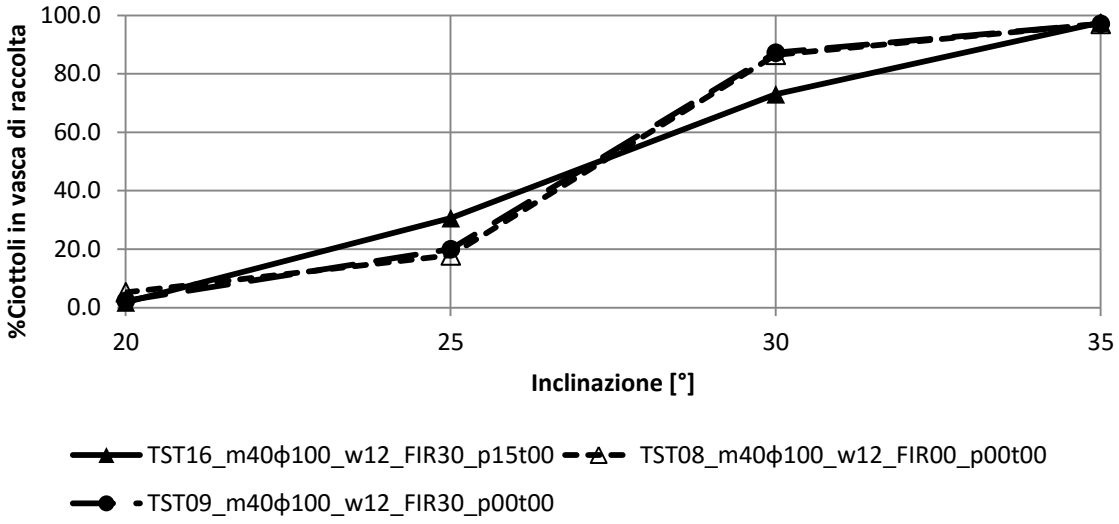


Figura 59 - Influenza del condizionamento sulla percentuale di ciottoli in vasca, confronto tra le prove TST8, TST9 e TST16

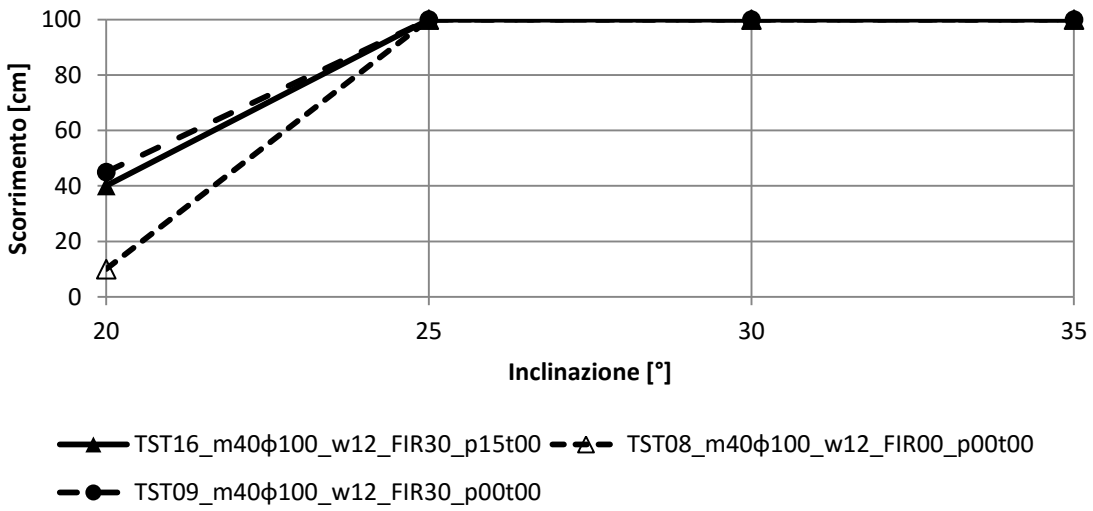


Figura 60 - Influenza del condizionamento sullo scorrimento della pasta, confronto tra le prove TST8, TST9 e TST16

- **Influenza del tempo**

Eseguendo un confronto tra i risultati delle prove TST4 e TST5 (Figura 61 e Figura 62), TST12 e TST14 (Figura 65 e Figura 64), TST13 e TST15(Figura 63 e Figura 66) si osserva una tendenza alla riduzione di scorrimento e alla riduzione della percentuale di ciottoli nella vasca di raccolta per le prove eseguite dopo un lasso di tempo dall'aggiunta del polimero,20 minuti per la coppia TST4-TST5 e 60 minuti per le altre.

La prima coppia di prove è eseguita su campioni da 26 kg di terreno A e concentrazione di polimero allo 0.015% sul peso del fine.

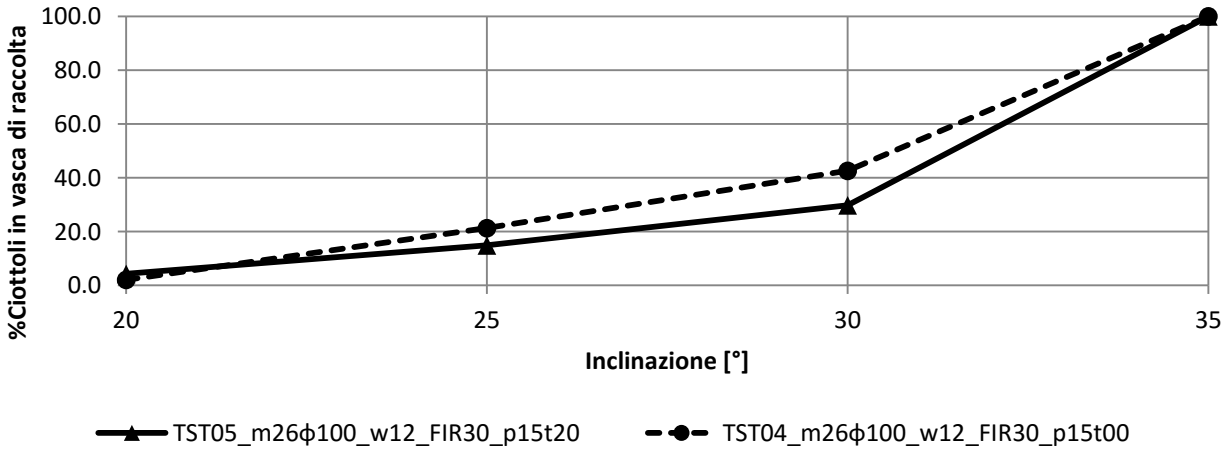


Figura 61 – Influenza del tempo sulla percentuale di ciottoli in vasca, confronto tra le prove TST4 e TST5

La seconda coppia di prove è eseguita su campioni da26 kg di terreno A e concentrazione del polimero allo 0.015% sul peso del fine.

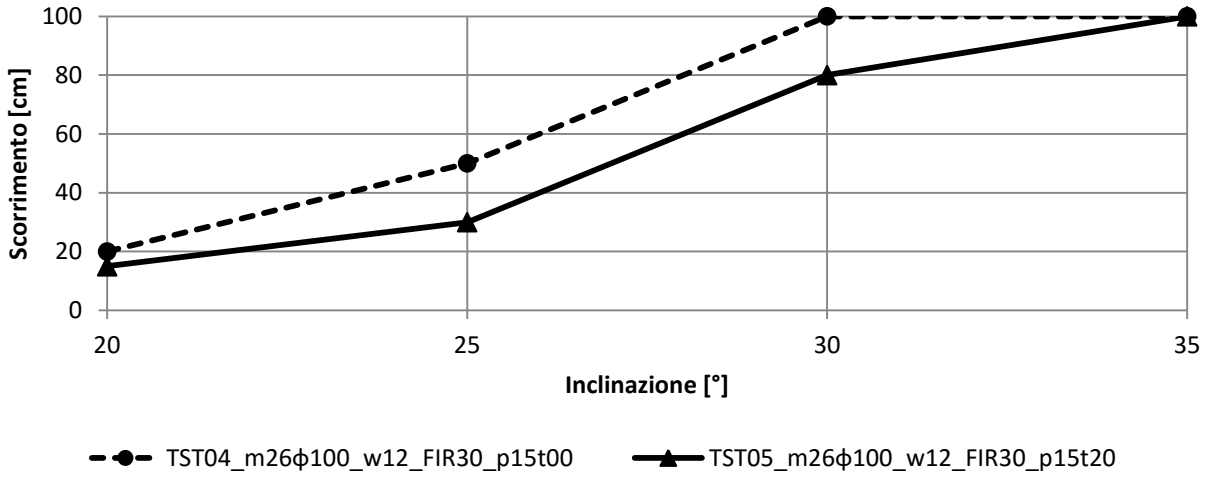


Figura 62 - Influenza del tempo sullo scorrimento della pasta, confronto tra le prove TST4 e TST5

La terza coppia di prove è stata eseguita su campioni da 26 kg di terreno B e concentrazione del polimero allo 0.030% sul peso del fine.

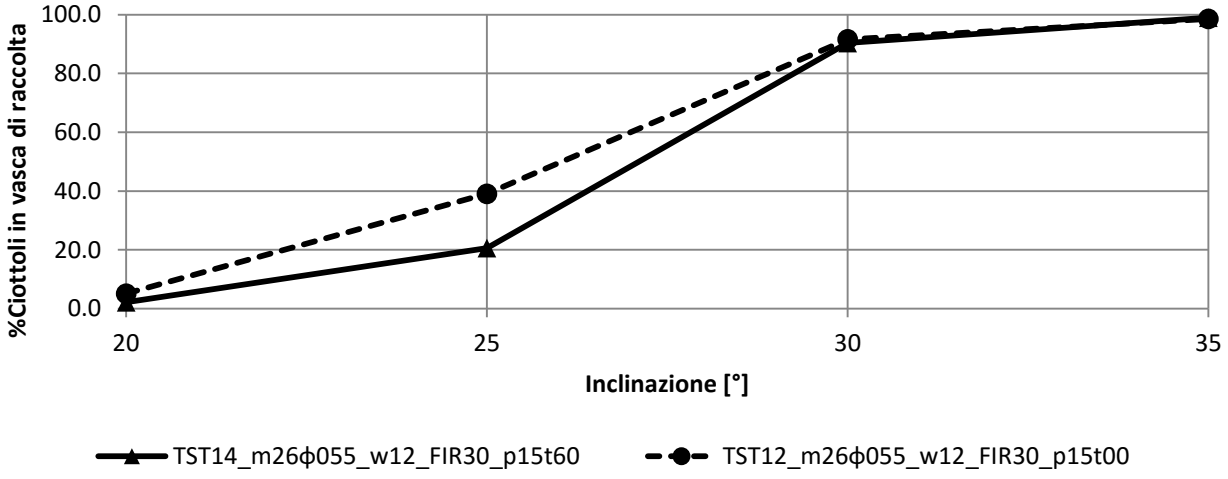


Figura 63 - Influenza del tempo sulla percentuale di ciottoli in vasca, confronto tra le prove TST 12 e TST14

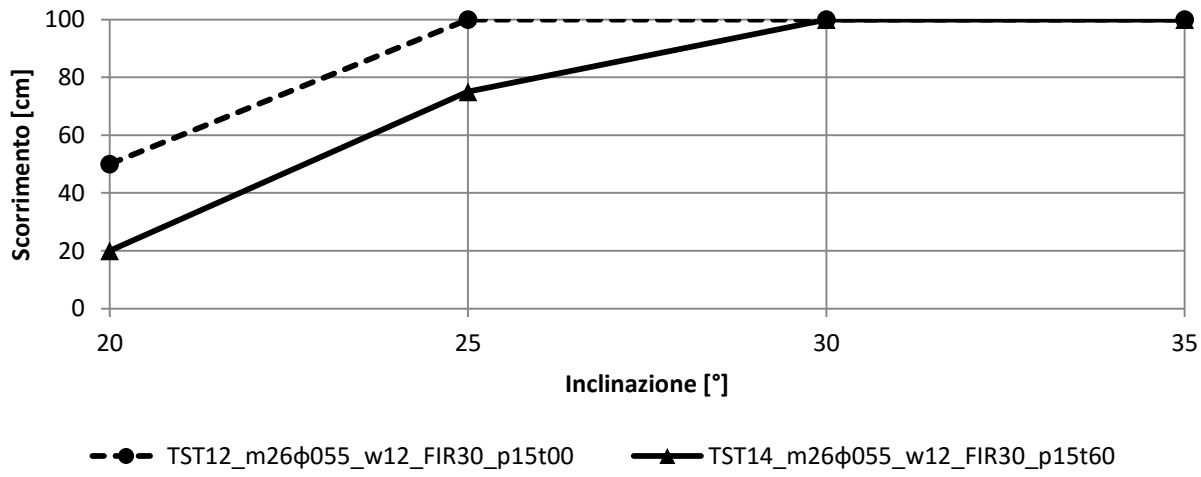


Figura 64 - Influenza del tempo sullo scorrimento della pasta, confronto tra le prove TST 12 e TST14

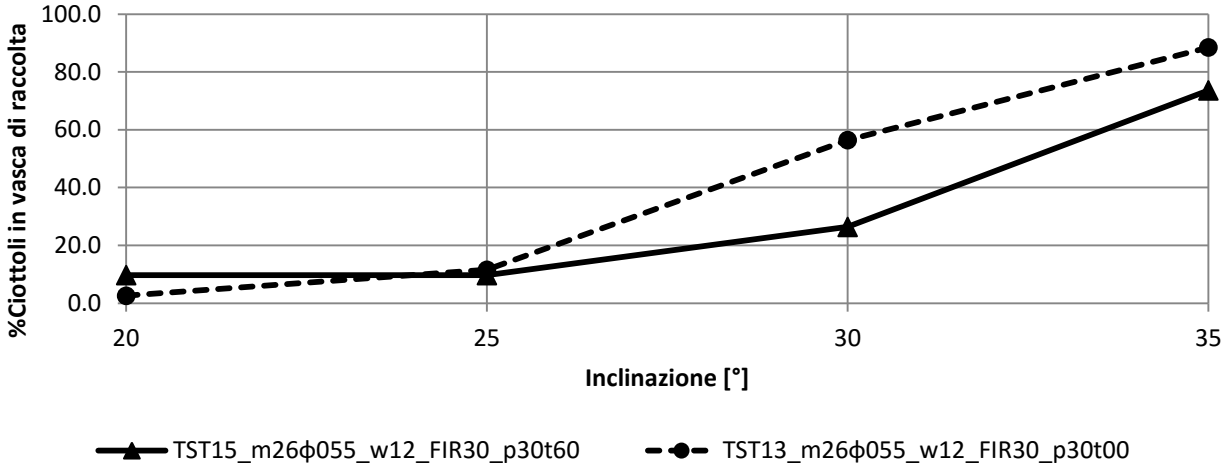


Figura 65 - Influenza del tempo sulla percentuale di ciottoli in vasca, confronto tra le prove TST 13 e TST15

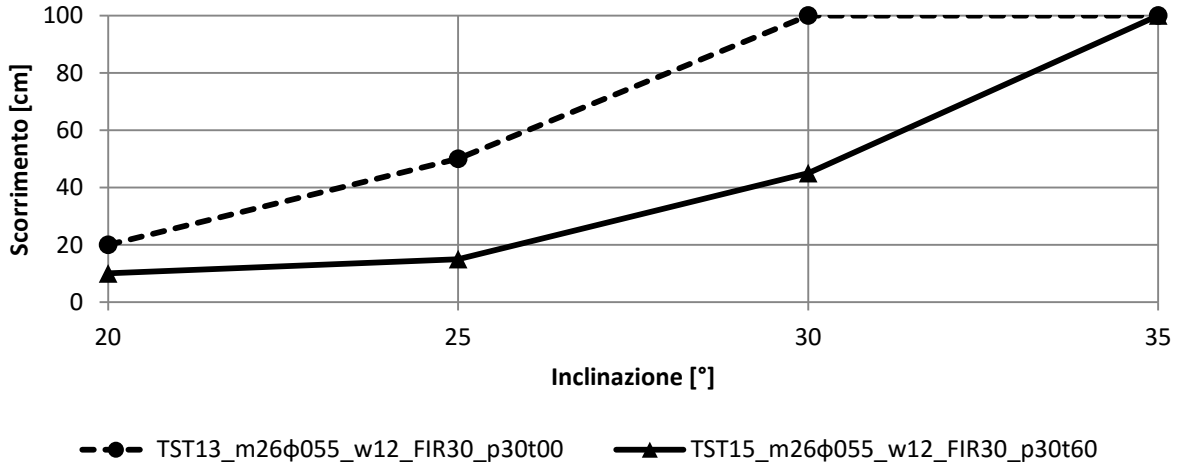


Figura 66 - Influenza del tempo sullo scorrimento della pasta, confronto tra le prove TST13 e TST15

- **Influenza della massa del campione**

Confrontando i risultati delle coppie di prove TST3-TST9 e TST4-TST16 si osserva un incremento dello scorrimento al crescere della massa del campione. Per quanto riguarda la percentuale di ciottoli in vasca di raccolta la coppia di campioni condizionati con solo schiuma (Figura 67) mostra un'inversione di comportamento rispetto a quanto avviene nei campioni con polimero (Figura 68).

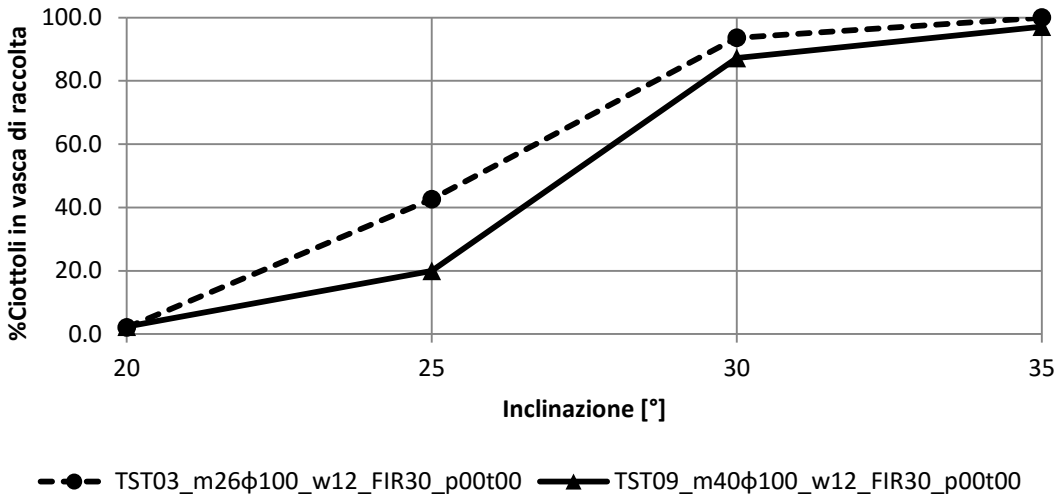


Figura 67 - Influenza della massa del campione sulla percentuale di ciottoli in vasca di raccolta, confronto tra le prove TST3 e TST9

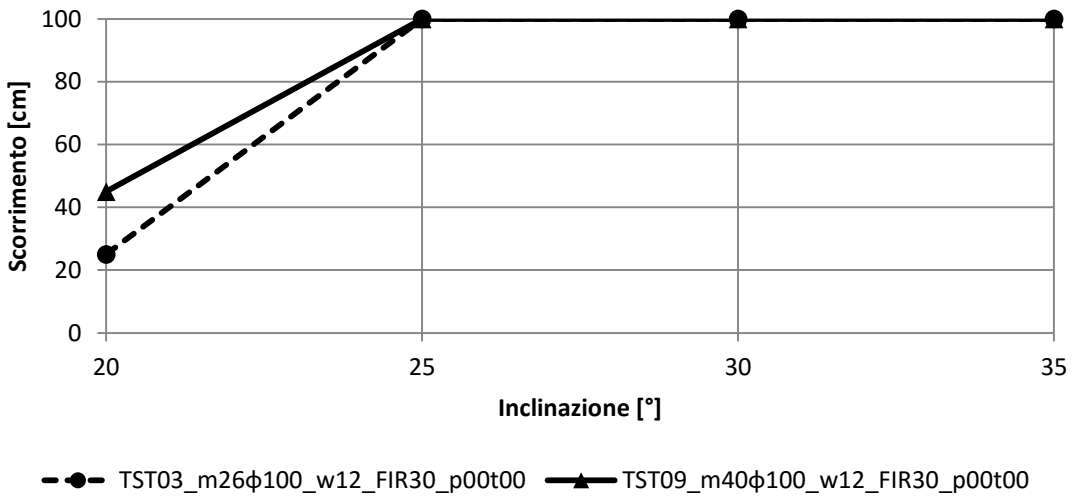


Figura 68 - Influenza della massa del campione sullo scorrimento della pasta, confronto tra le prove TST3 e TST9

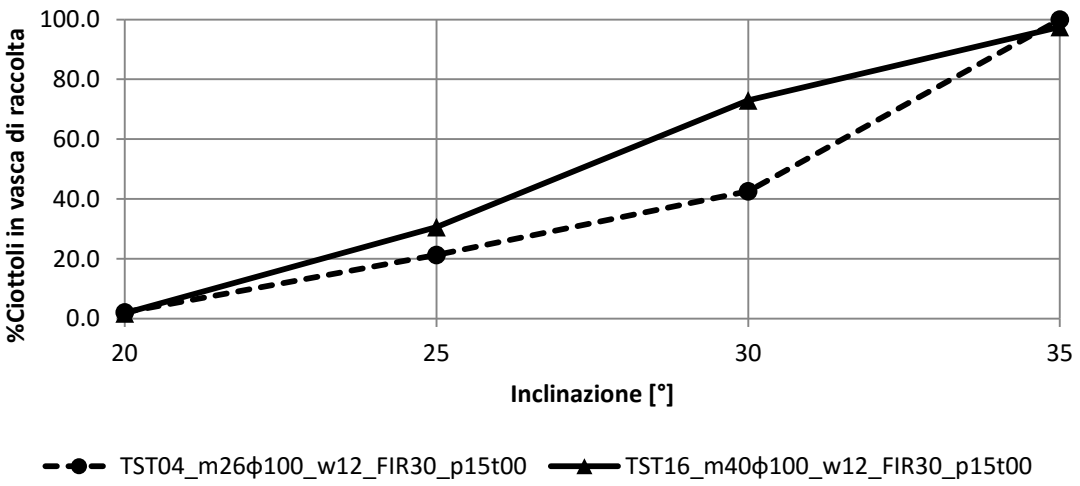


Figura 69 - Influenza della massa del campione sulla percentuale di ciottoli in vasca di raccolta, confronto tra le prove TST4 e TST16

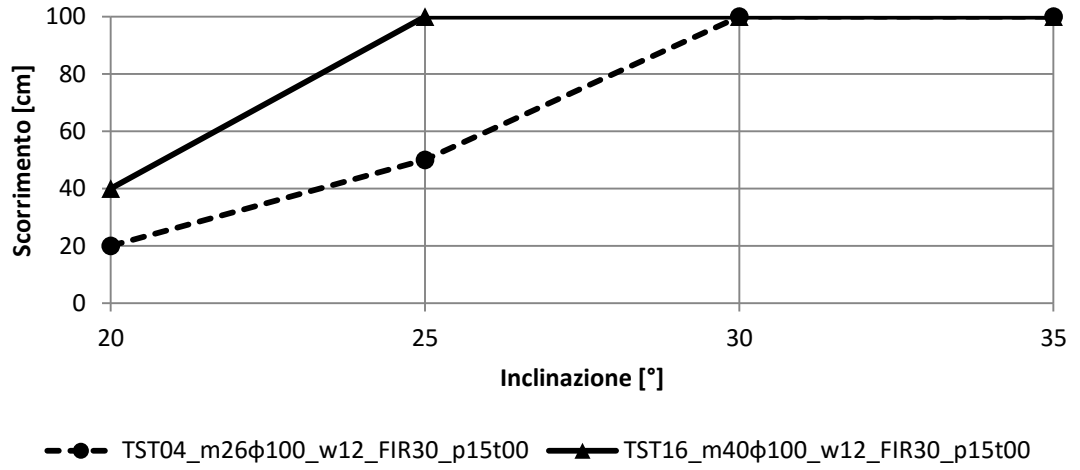


Figura 70 - Influenza della massa del campione sullo scorrimento della pasta, confronto tra le prove TST4 e TST16

- **Influenza del diametro massimo dei ciottoli**

Mettendo a confronto i risultati delle prove TST3 e TST11 si osserva una modesta influenza del diametro massimo sulla percentuale di ciottoli in vasca.

In Figura 72, si osserva un incremento dello scorrimento al diminuire del diametro massimo.

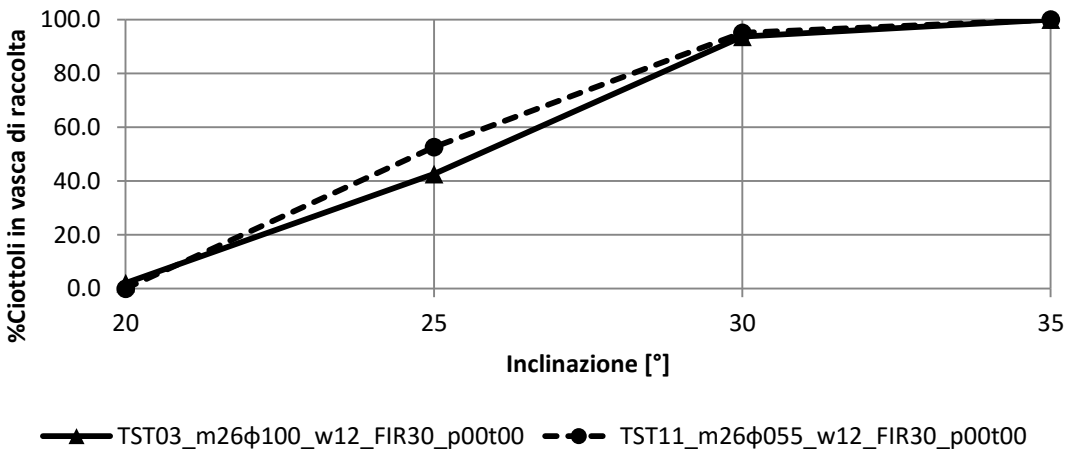


Figura 71 – Influenza del diametro massimo dei ciottoli sulla percentuale di ciottoli in vasca di raccolta, confronto tra le prove TST3 e TST11

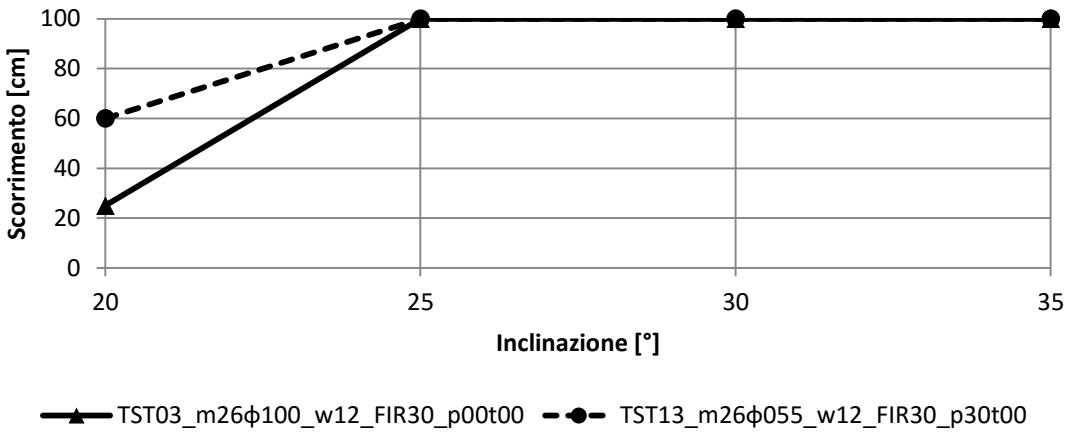


Figura 72 – Influenza del diametro massimo dei ciottoli sullo scorrimento della pasta, confronto tra le prove TST3 e TST11

6.2.3 Seconda fase

TST8							
Angolo [°]	**t_k [g]**	**c_k [g]**	**n_k [-]**	**s_k [cm]**	**%F**	**%C**	**%N**
20	210	714	6	10	0.8	5.2	8.7
25	1067	2439	14	100	3.8	17.9	20.3
30	19216	11814	52	100	68.8	86.5	75.4
35	23155	13258	64	100	82.9	97.1	92.8
Residuo	4791	400	5				
Totale	27946	13658	69				

Foto			
20°	**25°**	**30°**	**35°**

Tabella 27 – Report sintetico prova TST8

20° Dei ciottoli scivolano verso il basso, dall'esame del video si osserva che erano disposti a ridosso della sponda. La pasta subisce un modesto scorrimento.

25° Lo scorrimento della pasta raggiunge i 100 cm. Poca massa cade nella vasca di raccolta. Molti ciottoli di grandi dimensioni restano perfettamente solidali con la pasta.

30° La massa scivola nella vasca di raccolta. Non si osserva un moto relativo tra le due componenti (pasta e ciottoli). I ciottoli scivolano immorsati nella pasta anziché sviluppare un moto individuale.

35° Praticamente tutto il materiale è nella vasca di raccolta. Si osservano pochi ciottoli sul piano.

Nel complesso, il condizionamento utilizzato in prova TST8 mostra un ottimo comportamento. I ciottoli e la pasta si muovono in modo omogeneo. La tendenza, in ogni fase, è quella di avere una pasta che ingloba gli elementi lapidei e ne limita il movimento.

TST9							
Angolo [°]	**t_k [g]**	**c_k [g]**	**n_k [-]**	**s_k [cm]**	**%F**	**%C**	**%N**
20	209	319	1	45	0.7	2.3	1.5
25	1900	2749	11	100	6.8	20.0	16.4
30	10350	12008	53	100	37.0	87.2	79.1
35	14669	13371	62	100	52.5	97.1	92.5
Residuo	13277	400	5				
Totale	27946	13771	67				

Foto			
20°	**25°**	**30°**	**35°**

Tabella 28 – Report sintetico prova TST9

20° Alla rimozione della sponda trasversale alcuni ciottoli non sufficientemente inglobati nella pasta rotolano in vasca di raccolta. Si osservano numerosi ciottoli, anche di dimensioni rilevanti fermi sullo scivolo. La pasta, rispetto la prova TST8, mostra un comportamento più fluido.

25° Nella la fase di sollevamento da 20° a 25° si raggiungono 100 cm di scorrimento. I ciottoli si muovono in modo lento e uniforme seguendo i movimenti della pasta. Al termine della fase dinamica si osserva una distribuzione omogenea dei ciottoli all'interno della massa di terreno condizionato.

30° Si osserva un moto predominante dei ciottoli, i quali non sono efficacemente frenati dalla pasta. Si può osservare che vengono a formarsi delle tracce laddove sono passati i ciottoli di dimensioni maggiori. Si può ipotizzare che nella fase tra 20° e 25° l'attrito sviluppato tra i ciottoli e il piano metallico abbia fornito un contributo resistente sufficiente a influenzare l'esito della prova.

35° Il processo iniziato tra 25° e 30° continua il suo sviluppo secondo modalità analoghe. Rispetto alla prova TST8 la pasta mostra un comportamento meno rigido e ne rimane una quantità maggiore sullo scivolo.

Il comportamento generale è ancora discreto ma la pasta non ha consistenza sufficiente a controllare il movimento dei ciottoli. La maggior presenza di fine sullo scivolo può essere imputata a un diverso comportamento reologico della pasta, infatti, il terreno condizionato con schiuma incrementa la propria capacità di dissipare energia.

TST10							
Angolo [°]	**t_k [g]**	**c_k [g]**	**n_k [-]**	**s_k [cm]**	**%F**	**%C**	**%N**
20	184	1024	6	0	1.4	8.6	7.5
25	3308	8300	46	35	24.3	69.9	57.5
30	4493	10125	60	60	33.0	85.2	75.0
35	8147	11831	77	100	59.9	99.6	96.3
Residuo	5457	50	3				
Totale	13604	11881	80				

Foto			
20°	25°	30°	35°

Tabella 29 – Report sintetico prova TST10

20° Un buon numero di ciottoli scivolano immediatamente in vasca per le stesse ragioni citate per le prove TST8 e TST9. La matrice non scorre e i ciottoli vi restano inglobati.

25° Si evidenzia un comportamento molto slegato con rotolamento con rotolamento in massa dei ciottoli. La matrice scorre poco e resta concentrata nella parte alta del piano inclinato.

30° Inizia un lento scivolamento della matrice, principalmente innescato dalla presenza dei ciottoli che tendono a separarsi dalla massa.

35° La matrice scorre in modo disomogeneo sospinta da cumuli di ciottoli. Si osservano le tracce prodotte dai ciottoli durante lo scivolamento che mettono in evidenza la netta prevalenza del moto degli elementi di dimensione maggiore rispetto alla matrice

Nel complesso il condizionamento utilizzato in TST10 porta a un comportamento non soddisfacente e ritenuto non omogeneo.

TST11							
Angolo [°]	**t_k [g]**	**c_k [g]**	**n_k [-]**	**s_k [cm]**	**%F**	**%C**	**%N**
20	64	0	0	60	0.4	0.0	0.0
25	2316	5811	30	100	15.1	100.0	100.0
30	7308	10502	69	100	47.7	100.0	100.0
35	8557	11047	77	100	59.9	100.0	100.0
Residuo	6761	0	0				
Totale	15318	11047	77				

Foto

20°	25°	30°	35°

Tabella 30 – Report sintetico prova TST11

20° La matrice esibisce un comportamento fluido e i ciottoli vi sono distribuiti in modo regolare. La consistenza della matrice può aver favorito un ammorsamento migliore dei ciottoli più vicini alla sponda.

25° Si osserva una velocità di scivolamento dei ciottoli leggermente superiore a quella della matrice. Si possono evidenziare le tracce di scivolamento già citate in TST9 a 30°. Una porzione di ciottoli, prevalentemente inferiore a 60 mm, resta inglobata nella matrice.

30° Si instaura un movimento generalizzato innescato dai ciottoli. Il materiale scorre in massa verso il basso lasciando una modesta quantità di fine sullo scivolo.

35° Il materiale rimanente scorre sul piano. Non sono evidenziabili caratteristiche di moto differenti da quelle già citate.

In generale, il condizionamento porta a una pasta non sufficientemente consistente per trasportare efficacemente ciottoli di grandi dimensioni.

TST12							
Angolo [°]	**t_k [g]**	**c_k [g]**	**n_k [-]**	**s_k [cm]**	**%F**	**%C**	**%N**
20	0	562	3	50	0.0	5.1	4.2
25	915	4302	23	100	6.4	39.0	32.4
30	5438	10090	61	100	37.8	91.6	85.9
35	7433	10856	69	100	51.6	98.5	97.2
Residuo	6961	161	2				
Totale	14394	11017	71				

Foto			
20°	**25°**	**30°**	**35°**

Tabella 31 – Report sintetico prova TST12

20° Si registra uno scorrimento non controllato di ciottoli non sufficientemente immorsati nel terreno. Il resto del terreno ha un comportamento sufficientemente omogeneo.

25° Si ha scorrimento prevalente di ciottoli con formazione di tracce evidenti. Il materiale riesce comunque a trattenere parte degli elementi.

30° I ciottoli si muovono in modo indipendente dalla pasta. Resta sullo scivolo una quantità esigua di ciottoli.

35° La tipologia di movimento non si discosta da quella rilevata per le fasi precedenti.

Il condizionamento è non adatto alla creazione di una pasta utile al trasporto di elementi lapidei di dimensioni decimetriche.

TST13							
Angolo [°]	**t_k [g]**	**c_k [g]**	**n_k [-]**	**s_k [cm]**	**%F**	**%C**	**%N**
20	47	225	2	20	0.3	2.0	2.6
25	345	1720	9	50	2.3	15.0	11.5
30	3148	7254	44	100	21.3	63.1	56.4
35	7775	10718	69	100	52.5	93.2	88.5
Residuo	7035	782	9				
Totale	14810	11500	78				

Foto			
20°	**25°**	**30°**	**35°**

Tabella 32 – Report sintetico prova TST13

25° Si rileva la separazione dalla massa principale di alcuni ciottoli poco ammorsati nella matrice. In generale, la massa subisce uno scorrimento sufficientemente uniforme.

30° Il movimento è guidato dallo scivolamento dei ciottoli. Sulla parte sinistra dello scivolo si individua un netto scivolamento di ciottoli che trascinano la matrice. Sulla parte destra si può notare che gli elementi tendono a muoversi insieme alla pasta e conservano distanze reciproche circa costanti.

35° Tutto il materiale scende guidato dagli elementi più grandi. Rimane della matrice distribuita in modo irregolare e concentrata prevalentemente in sommità allo scivolo.

Nel complesso il materiale evidenzia un comportamento tendenzialmente guidato dal moto dei ciottoli ma il sistema si muove in modo relativamente uniforme.

TST14							
Angolo [°]	**t_k [g]**	**c_k [g]**	**n_k [-]**	**s_k [cm]**	**%F**	**%C**	**%N**
20	265	239	1	20	1.8	2.2	1.4
25	1036	2264	12	75	7.2	20.6	17.4
30	6736	9921	58	100	46.7	90.3	84.1
35	8932	10867	68	100	62.0	98.9	98.6
Residuo	5480	116	1				
Totale	14412	10983	69				

Foto			
20°	**25°**	**30°**	**35°**

Tabella 33 – Report sintetico prova TST14

20° Si verifica lo scivolamento incontrollato di alcuni ciottoli poco immorsati. La pasta subisce un modesto scorrimento e trattiene in modo efficace gran parte degli elementi lapidei.

25° In vasca di raccolta arrivano ciottoli che si erano staccati dalla massa principale nella fase precedente. La pasta scorre in modo omogeneo contenendo efficacemente il movimento degli elementi che vi sono immorsati.

30° Il moto, innescato dal movimento dei ciottoli, porta gran parte del materiale in vasca di raccolta. Si hanno ancora degli elementi sul piano inclinato bloccati dalla presenza della matrice.

35° Il moto prosegue secondo le modalità viste nelle fasi precedenti.

Nel complesso il materiale evidenzia un comportamento tendenzialmente guidato dal moto dei ciottoli ma il sistema si muove in modo relativamente uniforme.

TST15							
Angolo [°]	**t_k [g]**	**c_k [g]**	**n_k [-]**	**s_k [cm]**	**%F**	**%C**	**%N**
20	112	755	7	10	0.8	6.5	9.7
25	170	755	7	15	1.2	6.5	9.7
30	1120	2957	19	45	7.9	25.5	26.4
35	5755	8712	53	100	40.6	75.3	73.6
Residuo	8421	2863	19				
Totale	14176	11575	72				

Foto			
20°	**25°**	**30°**	**35°**

Tabella 34 – Report sintetico prova TST15

20° Si verifica lo scivolamento incontrollato di alcuni ciottoli poco immorsati. La pasta subisce un modesto scorrimento e trattiene in modo efficace gran parte degli elementi lapidei.

25° Lo scorrimento aumenta di una quantità modestissima. Due ciottoli slegati dalla massa arrivano in vasca di raccolta.

30° Alcuni ciottoli poco immorsati nella matrice si muovono in modo indipendente. Un lento scorrimento della pasta porta a una stabilizzazione di parte della massa che comunque mantiene un comportamento coerente.

35° Il materiale scivola in massa. Sul piano inclinato resta una quantità di matrice che trattiene efficacemente il movimento di elementi lapidei, anche di dimensioni decimetriche.

Nel complesso il terreno condizionato manifesta un'ottima capacità di controllo sugli elementi lapidei di dimensioni maggiori.

TST16							
Angolo [°]	**t_k [g]**	**c_k [g]**	**n_k [-]**	**s_k [cm]**	**%F**	**%C**	**%N**
20	90	319	1	40	0.4	1.8	2.0
25	1144	5525	15	100	5.1	30.6	29.4
30	7844	13173	45	100	34.8	73.0	88.2
35	12872	17602	45	100	57.1	97.5	88.2
Residuo	9662	447	6				
Totale	22534	18049	51				

Foto			
20°	**25°**	**30°**	**35°**

Tabella 35 – Report sintetico prova TST16

20° Nei primi istanti della prova si ha il rotolamento di un elemento che si trovava a ridosso della sponda. Durante lo scorrimento della pasta i ciottoli restano al suo interno senza esibire apprezzabili movimenti indipendenti.

25° Da 20°a 25° si sviluppa un movimento generalizzato della massa. Si osserva che alcuni degli elementi di dimensioni maggiori, posti in zona distale, non trovano sufficiente contenimento e scivolano in vasca di raccolta.

30° Si osservano alcuni elementi scorrere per via di una ridotta resistenza della matrice nella parte sinistra del piano. Il resto della massa scorre in modo omogeneo controllando gran parte degli elementi.

35° Si innesca lo scivolamento della massa rimanente. Si evidenzia uno scorrimento della matrice e dei ciottoli. In particolare si osserva come lo scorrimento dei ciottoli con una velocità elevata trova nelle sue fasi iniziali situazioni di bassa resistenza nelle quali sviluppa una velocità sufficiente a non permettere un successivo controllo da parte della matrice. Si possono individuare elementi che, non avendo accumulato sufficiente energia cinetica, sono efficacemente frenati dalla matrice.

Nel complesso, la prova ha fornito risultati soddisfacenti e il terreno mostra una capacità di controllo sufficientemente elevata.

6.3 Interpretazione dei risultati

Al fine di comprendere l'influenza dei singoli parametri sui risultati della prova si riportano dei confronti eseguiti tra gruppi di prove.

In primo luogo si desidera valutare l'influenza della dimensione del campione sull'esito della prova. Si può osservare che tendenzialmente i campioni da 40 kg mostrano un comportamento migliore rispetto a quelli da 26 kg. Questo è imputabile a un maggior spessore di terreno sullo scivolo: all'aumentare della superficie di contatto tra terreno e ciottoli, cresce la superficie sulla quale può avvenire uno scambio di tensioni, ne consegue un'interazione più intensa e un maggior controllo.

Dai risultati delle prove eseguite su campioni da 26 kg di terreno B riportati in Figura 73 si osserva che al crescere dell'impiego di agenti condizionanti si ha una riduzione della percentuale di ciottoli in vasca di raccolta e una riduzione della percentuale di pasta in vasca di raccolta.

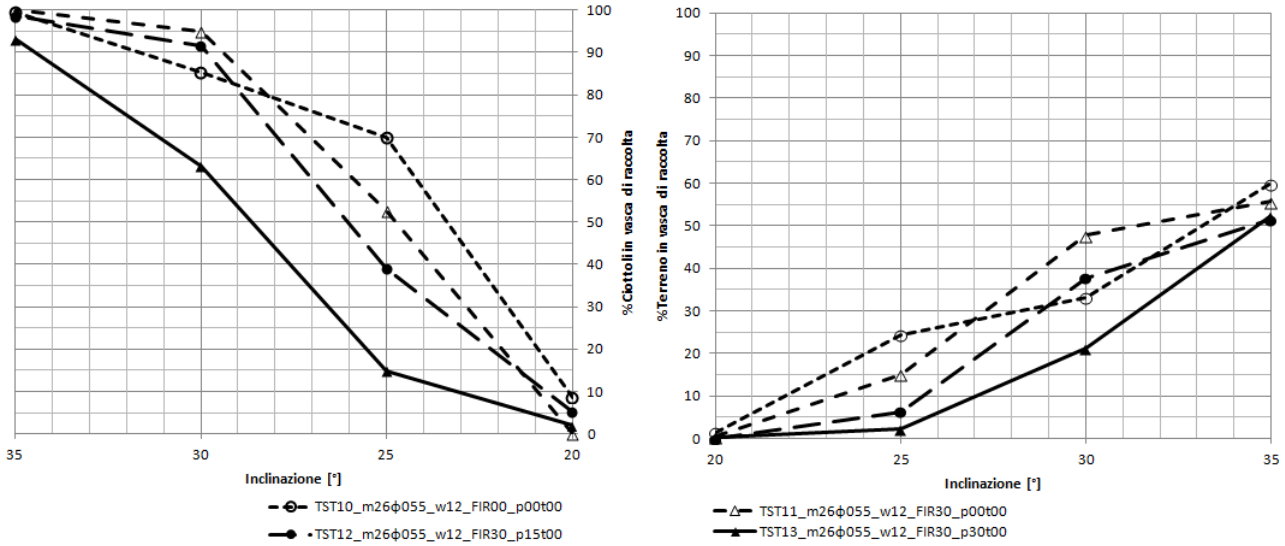


Figura 73 – Influenza del condizionamento sulle quantità di ciottoli e di pasta in vasca di raccolta, confronto tra le prove TST10, TST11, TST12 e TST13

Anche dai risultati delle prove eseguite su campioni da 40 kg di terreno A si osserva che al crescere dell'impiego di agenti condizionanti si ha una riduzione della percentuale di ciottoli nella vasca di raccolta e della percentuale di pasta nella vasca di raccolta.

Per effetto dell'incremento della concentrazione del polimero aggregante la pasta aumenta la sua viscosità ed esercita un maggior controllo sul moto dei ciottoli.

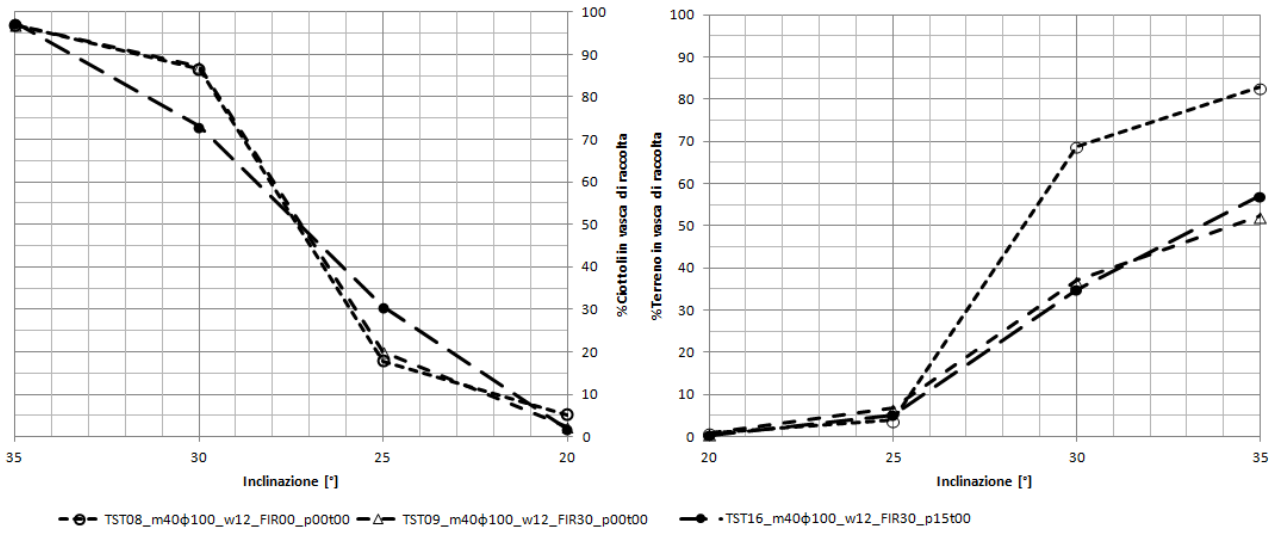


Figura 74 - Influenza del condizionamento sulle quantità di ciottoli e di pasta in vasca di raccolta, confronto tra le prove TST8, TST9 e TST16

Dai risultati delle prove eseguite su campioni da 26 kg di terreno B condizionato con schiuma e concentrazione del polimero aggregante dello 0.015% si osserva che al crescere del tempo intercorso tra l'aggiunta del polimero e l'esecuzione della prova si riducono la percentuale di ciottoli in vasca di raccolta e la percentuale di pasta in vasca di raccolta.

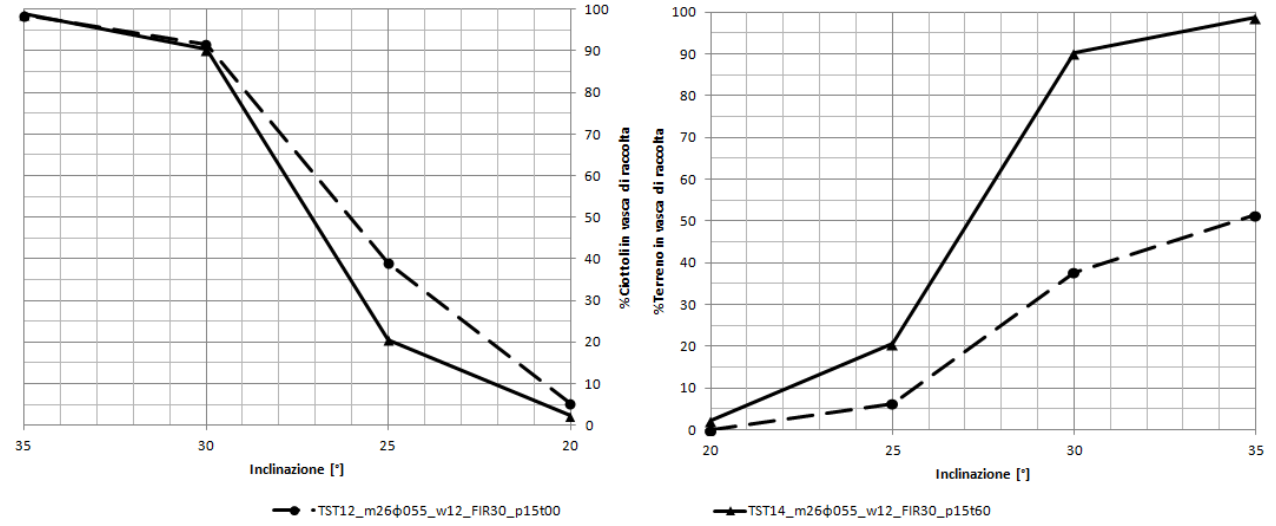


Figura 75 - Influenza del tempo sulle quantità di ciottoli e di pasta in vasca di raccolta, confronto tra le prove TST12 e TST14

Dai risultati delle prove eseguite su campioni da 26 kg di terreno B condizionato con schiuma e concentrazione del polimero aggregante dello 0.030% si osserva che al crescere del tempo

intercorso tra l'aggiunta del polimero e l'esecuzione della prova si riduce la percentuale di ciottoli in vasca di raccolta e cresce la percentuale di pasta in vasca di raccolta.

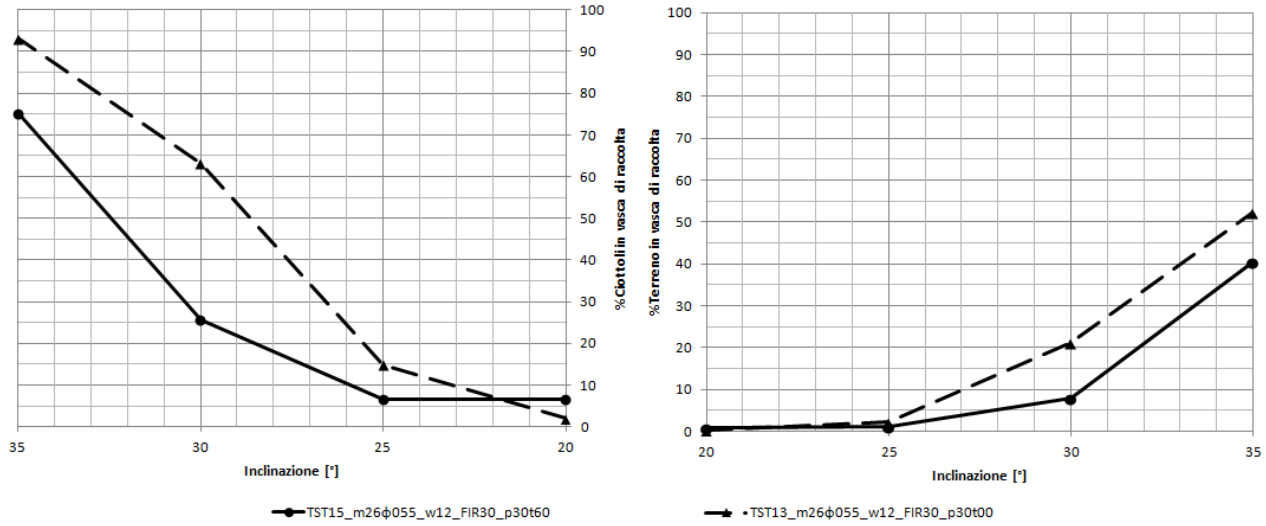


Figura 76 - Influenza del tempo sulle quantità di ciottoli e di pasta in vasca di raccolta, confronto tra le prove TST13 e TST15

Per effetto dell'incremento della concentrazione del polimero aggregante la pasta incrementa la sua viscosità ed esercita un maggior controllo sul moto dei ciottoli.

Dai risultati esposti in Figura 76 ,si osserva che eseguendo le prove con polimero aggregante allo 0.030%, la pasta sviluppa una viscosità tale da non essere trascinata in vasca di raccolta dai ciottoli. In Figura 75 si osserva che lo scorrere del tempo permette una maggior interazione ciottoli-pasta, ma quest'ultima non riesce ad opporsi efficacemente al moto e viene trascinata in vasca di raccolta dei ciottoli in quantità maggiore.

7 Conclusioni

Il condizionamento del terreno è fondamentale per l'applicazione della tecnologia EPB. Risulta necessario, per ogni progetto, eseguire una campagna di indagini mirata a determinare le modalità di condizionamento ottimale tale da massimizzare l'efficienza di scavo e la sicurezza delle operazioni.

Grazie alle prove di slump eseguite sulla frazione granulometrica passante a 30 mm si è determinato che è possibile condizionare i terreni in oggetto e si sono valutati i parametri ottimali del condizionamento da utilizzare nel terreno in analisi utilizzando prodotti di due differenti produttori.
Grazie alle prove di slump si è individuato che il campo di applicabilità ottimale per il terreno considerato varia nell'intorno di un contenuto d'acqua totale pari al 12% e un FIR pari al 30% ottenuto con schiuma generata con concentrazione dello schiumogeno c=1.5% e FER 10.

Il terreno in analisi è caratterizzato dalla presenza di numerosi elementi lapidei di dimensioni decimetriche. Questa situazione ha fatto sorgere la necessità di valutare se l'utilizzo della tecnica EPB fosse applicabile allo scavo di questo tipo di terreno. Infatti la presenza di questi ciottoli potrebbe inficiare l'efficacia del condizionamento, danneggiare gli utensili di scavo e creare problemi di segregazione, di estrazione e di trasporto se il terreno condizionato non è in grado di trasportare e trattenere gli elementi grossolani.
Per questo motivo è stata sviluppata una specifica procedura di prova (Tilt Sliding Test) che consentisse una valutazione del comportamento della componente fine del terreno con gli elementi più grossolani nelle diverse condizioni di condizionamento.
La prova TST sviluppata in questa ricerca evidenzia che è possibile realizzare un sistema pasta-ciottoli che si muove in modo sufficientemente omogeneo. A tale scopo, dall'analisi delle prove svolte, si evidenzia come l'utilizzo di polimeri aggreganti sia necessario per evitare la separazione gravimetrica dei ciottoli.
La pasta così ottenuta, grazie alla sua viscosità, riesce a spingere efficacemente i ciottoli e trattenerli al proprio interno.
L'utilizzo di del polimero in concentrazioni pari o superiori allo 0.015% in peso su peso del passante a 30 mm permette di migliorare la consistenza del terreno condizionato ed ottenere una pasta che, garantendo le caratteristiche necessarie per un buon condizionamento (applicazione della pressione in modo omogeneo, facilità di estrazione con coclea) consente di trattenere gli elementi di maggiori dimensioni.

La prova di laboratorio ideata risulta quindi utile per valutare il comportamento del materiale in queste condizioni, ma deve essere affiancata ad una prova di slump per verificare l'effettiva bontà del condizionamento.

Per un futuro sviluppo della ricerca, eseguire altre campagne di prova con diversi terreni e diverse tipologie di condizionamento, permetterà di individuare altri parametri significativi e di sviluppare degli indici che siano rappresentativi del comportamento dei terreni studiati.

8 Bibliografia

- AFTES, 2001. EUPALINOS 2000, "*Synthèse*", Octobre 2001, Paris (in French);
- ASTM C143/C 143M – 00, "*Standard test method for Slump of Hydraulic-Cement Concrete*", 2003;
- Bezuijen A., Schaminée P.E.L., "*Model experiments using foam simulation the drilling with an EPB shield*", 2000, GeoDelft Report No. BF 51010;
- Bilgin N., Copur H., Balci C. "*Mechanical Excavation in Mining Civil Industries*", 2014, Taylor&Francis;
- Guglielmetti V., Grasso P., Mahtab A., Xu S., "*Mechanized tunneling in urban areas. Design methodology and contstruction control*", 2008, Taylor&Francis;
- Hanamura T., Kurose J., Aono Y. e Okubo H., "*Integral studies on mechanized functions of mudding agents and the properties of muddified soils in the EPB shield tunneling technology*", 2007, 33rd ITA-AITES World Tunnel Congress: "Underground Space. The 4th dimension of metropolises", Prague, Taylor & Francis Group, London;
- Jancsecz S., Krause R. e Langmaak L., "*Advantages of soil conditioning in shield tunneling: experiences of LRST Izmir*", 1999, ITA-AITES World Tunnel Congress ' 99: "Challegnes for the 21st Century", Oslo, Alten et al. (eds), Balkema, Rotterdam;
- Langmaack L., "*Advanced technology of soil conditioning in EPB shield tunneling*", TBM Project Manager, MBT International, Zurich (CH);
- Leinala T., Grabinsky M., Delmar R. e Collins J.R., "*Effects of foam soil conditioning on EPBM performance*" North American Tunneling, 2000, Boston, Ozdemir (ed.), Balkema, Rotterdam;
- Mair R., Merritt A., Borghi X., Yamazaki H., Minami T., "*Soil conditioning for clay soils*" 2003, Tunnels and Tunnelling International (April), 29-33;
- Merritt A., Mair R.J., "*Mechanics of tunnelling machine screw conveyor: model tests*", 2006, Geotechnique 56 (9), 605-615;
- Peila D., Oggeri C, "*Influence of Granulometry, time and temperature on soil conditioning for EPBs aplications*";
- Peña M., "*Soil conditioning for sands*", Tunnels and Tunnelling International, July 2003, pp. 40-42;

- Peron J.Y., Marcheselli P., "*Construction of the 'Passante Ferroviario' link in Milan. Italy. lots 3P, 5P, and 6P: excavation by large EPBS with chemical foam injection*", 1994, Tunnelling '94, IMM, London;
- Quebaud S., Sibai M., "*Use of chemical foam for improvements in drilling by earth pressure balanced shields in granular soils*", Tunnelling and Underground Space Technology, Vol. 13, pp. 77-180;
- Vinai R., Oggeri C. e Peila D., "*Soil conditioning of sand for EPB applications: A laboratory research*", 2008, Tunnelling and Underground Space Technology, vol. 23(3), pp. 308-317, ISSN: 0886-7798, DOI: 10.1016/j.tust.2007.04.010;
- Vinai R., Oggeri C., Peila D., "*Soil conditioning of sand for EPB applications: A laboratory research*", 2008, Tunnelling and Undergroung Space Technology 23 (2008) 308-317;
- Williamson G.E., Traylor M.T. e Higuchi M., "*Soil conditioning for EPB shield tunneling on the South Bay Ocean Outfall*" Rapid Excavation and Tunneling Conference, 1999, Orlando (Florida, USA), Hilton D. e Samuelson K., SME, Littleton (Colorado, USA), pp. 897-925;
- Yoshikawa T., "*Soil pressure drop at the screw conveyor for shielded machines*", 1999, Transactions of the Japan Society for Mechanical Engineers, Part C 62 (595), 1197-1203.