

# POLITECNICO DI TORINO

*Facoltà di Ingegneria*

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

*Anno Accademico 2018/2019*



## **VALUTAZIONE DEL CONDIZIONAMENTO PER LO SCAVO CON EPB IN TERRENI CON PRESENZA DI CIOTTOLI**

*Tesi di Laurea Magistrale*

Candidato:

Paolo Falcetto

Relatore:

Prof. Ing. Daniele Peila

Corelatori:

Ing. Daniele Martinelli

Ing. Andrea Carigi

## Sommario

1	Introduzione .....	9
2	Metodi di scavo di gallerie.....	10
2.1	SCAVO CON TBM IN ROCCIA .....	11
2.1.1	Hard Rock TBM .....	11
2.1.2	Double shield TBM.....	12
2.2	SCAVO CON TBM NEI TERRENI .....	13
2.2.1	Slurry Shield .....	14
2.2.2	Hydroschild .....	15
2.2.3	Earth pressure balance shield (EPBs) .....	16
3	Condizionamento del materiale di scavo .....	19
3.1	Schiume .....	20
3.2	Procedura di design della schiuma .....	20
3.3	Parametri caratteristici del condizionamento.....	21
3.3.1	FER .....	21
3.3.2	FIR .....	22
3.3.3	FIR reale .....	22
3.3.4	Tempo di semivita ( $t_{50}$ ) .....	23
3.3.5	Densità della schiuma.....	23
3.3.6	Concentrazione di tensioattivo.....	23
3.4	Considerazioni .....	23
4	Prove di laboratorio.....	24
4.1	Slump test.....	24
4.1.1	Procedura .....	25
4.1.2	Slump test in letteratura .....	27
4.1.3	Vantaggi e svantaggi della prova.....	28
4.2	Test di semivita.....	29
4.2.1	Vantaggi e limitazioni .....	29
4.3	Prova di estrazione .....	29
4.3.1	Vantaggi e limitazioni .....	31
5	Caso studio .....	31
5.1	Introduzione .....	31
5.2	Prove di slump .....	33
5.2.1	Prova n°1 .....	34
5.2.2	Prova n°2 .....	35

*Valutazione del condizionamento per lo scavo con EPB in terreni con presenza di ciottoli*

5.2.3	Prova n°3 .....	35
5.2.4	Prova n°4 .....	36
5.3	Prove di semivita .....	37
5.3.1	Generatore di schiuma .....	37
5.3.2	Determinazione del tempo di semivita .....	39
5.4	Tilt Sliding Test.....	40
5.4.1	La prova .....	40
5.4.2	Interpretazione delle prove.....	44
5.4.3	Risultati delle prove.....	52
5.4.4	Analisi dei dati ottenuti nelle prove TST.....	113
5.4.5	Definizione di un criterio di valutazione.....	125
6	Conclusioni .....	139
7	Bibliografia.....	141
8	Ringraziamenti.....	144

## Indice delle figure

Figura 1: Hard Rock TBM © Herrenknecht AG .....	11
Figura 2: Double shield TBM © Herrenknecht AG.....	12
Figura 3: Hydroshield (jaafar,17) .....	15
Figura 4: Campo di applicabilità EPB e Slurry Shield TBM in funzione della distribuzione granulometrica del terreno ( jian ZHAO, 2012) .....	16
Figura 5: Erettore dei conci prefabbricati © www.terratec .com .....	17
Figura 6: Cilindri di spinta © Herrenknecht AG .....	18
Figura 7: estraattore a coclea in macchina EPB © Herrenknecht AG.....	18
Figura 8: Cono di Abrams .....	25
Figura 9: Miscelazione del materiale in betoniera .....	25
Figura 10: Immissione del materiale condizionato nel cono di Abrams.....	26
Figura 11: Sollevamento del cono dopo aver sbloccato i fermi alla base dello stesso .....	26
Figura 12: Estrattore a coclea (TUSC) .....	30
Figura 13: Distribuzione granulometrica tal quale di cava .....	31
Figura 14: Distribuzione granulometrica del terreno per prove TST .....	32
Figura 15: Tabella comparativa per Slump Test.....	33
Figura 16: Generatore di schiuma.....	37
Figura 17: Rappresentazione del generatore di schiuma.....	38
Figura 18: Prototipo per Tilt sliding test, vista dall'alto (dx) e frontale (sx) .....	41
Figura 19: Prototipo per prova TST, vista laterale con piano orizzontale e inclinato (Carigi,2017) ..	41
Figura 20: Introduzione del campione nell'alloggiamento in testa allo scivolo (Carigi,2017).....	42
Figura 21: Sollevamento del setto dopo sollevamento scivolo a 20°(Carigi,2017) .....	42
Figura 22: Inizio prova (Carigi,2017) .....	43
Figura 23: Transizione scivolo 20°-35° (Carigi,2017).....	43
Figura 24: Comportamento lineare ciottoli .....	45
Figura 25: Comportamento lineare fine .....	45
Figura 26: Comportamento disomogeneo ciottoli tra 30° e 35° .....	46
Figura 27: Comportamento disomogeneo fine tra 20° e 25° .....	46
Figura 28: Comportamento disomogeneo ciottoli tra 20° e 25° .....	47
Figura 29: Comportamento disomogeneo fine tra 30° e 35° .....	47

Figura 30: Comportamento rigido ciottoli .....	48
Figura 31: Comportamento rigido fine .....	49
Figura 32: Campione n°1.....	53
Figura 33: Percentuali in vasca di raccolta vs inclinazione scivolo prova n°2.....	55
Figura 34: Campione n° 2 .....	56
Figura 35: Percentuali in vasca di raccolta vs inclinazione scivolo prova n°3.....	58
Figura 36: Campione n°3.....	59
Figura 37: Percentuali in vasca di raccolta vs inclinazione scivolo prova n°3.....	61
Figura 38: Campione n° 4.....	62
Figura 39: Percentuali in vasca di raccolta vs inclinazione scivolo prova n°4.....	64
Figura 40: Campione n° 5 .....	65
Figura 41: Percentuali in vasca di raccolta vs inclinazione scivolo prova n°6.....	67
Figura 42: Campione n° 6 .....	68
Figura 43: Percentuali in vasca di raccolta vs inclinazione scivolo prova n°6.....	70
Figura 44: Campione n° 7.....	71
Figura 45: Percentuali in vasca di raccolta vs inclinazione scivolo prova n°7.....	73
Figura 46: Campione n°8.....	74
Figura 47: Percentuali in vasca di raccolta vs inclinazione scivolo prova n°8.....	76
Figura 48: Campione n°9.....	77
Figura 49: Percentuali in vasca di raccolta vs inclinazione scivolo prova n°9.....	79
Figura 50: Campione n°10.....	80
Figura 51: Percentuali in vasca di raccolta vs inclinazione scivolo prova n°10.....	82
Figura 52: Campione n°11.....	83
Figura 53: Percentuali in vasca di raccolta vs inclinazione scivolo prova n°11.....	85
Figura 54: Parametri di condizionamento nella prova n°12 .....	86
Figura 55: Campione n°12.....	86
Figura 56: Percentuali in vasca di raccolta vs inclinazione scivolo prova n°12.....	88
Figura 57: Campione n°13.....	89
Figura 58: Percentuali in vasca di raccolta vs inclinazione scivolo prova n°13.....	91
Figura 59: Campione n°14.....	92
Figura 60: Percentuali in vasca di raccolta vs inclinazione scivolo prova n°14.....	94
Figura 61: Campione n°15.....	95

Figura 62: Percentuali in vasca di raccolta vs inclinazione scivolo prova n°15.....	97
Figura 63: Campione n°16.....	98
Figura 64: Percentuali in vasca di raccolta vs inclinazione scivolo prova n°16.....	100
Figura 65: Campione n°17.....	101
Figura 66: Percentuali in vasca di raccolta vs inclinazione scivolo prova n°17.....	103
Figura 67: Campione n°18.....	104
Figura 68: Percentuali in vasca di raccolta vs inclinazione scivolo prova n°18.....	106
Figura 69: Campione n°19.....	107
Figura 70: Percentuali in vasca di raccolta vs inclinazione scivolo prova n°19.....	109
Figura 71: Campione n°20.....	110
Figura 72: Percentuali in vasca di raccolta vs inclinazione scivolo prova n°20.....	112
Figura 73: Ciottoli in vasca al variare del contenuto d'acqua totale ( $w_{tot}$ ).....	114
Figura 74: Fine in vasca al variare del contenuto d'acqua totale ( $w_{tot}$ ).....	114
Figura 75: Ciottoli in vasca al variare del FIR .....	116
Figura 76: Fine in vasca al variare del FIR .....	116
Figura 77: Ciottoli in vasca al variare dell'acqua totale, senza schiuma.....	118
Figura 78: Fine in vasca al variare dell'acqua totale, senza schiuma.....	118
Figura 79: Ciottoli in vasca al variare del FER .....	120
Figura 80: Fine in vasca al variare del FER .....	120
Figura 81: Ciottoli in vasca al variare del FIR con FER 15.....	122
Figura 82: Fine in vasca al variare del FIR con FER 15.....	122
Figura 83: Ciottoli in vasca al variare del FIR con FER 10.....	124
Figura 84: Fine in vasca al variare del FIR con FER 10.....	124

*Valutazione del condizionamento per lo scavo con EPB in terreni con presenza di ciottoli*

Tabella 1: TBM scudate .....	13
Tabella 2: Slump Test n°1 .....	34
Tabella 3: Slump test n°2 .....	35
Tabella 4: Slump Test n°3 .....	35
Tabella 5: Slump Test n°4 .....	36
Tabella 6: Prove di semivita .....	39
Tabella 7: Prove con FER 20 .....	50
Tabella 8: Prove con FER 15 .....	50
Tabella 9: Prove con FER 10 .....	51
Tabella 10: Prove TST eseguite .....	52
Tabella 11: Parametri di condizionamento nella prova n°1 .....	53
Tabella 12: Valori misurati nella prova n°1 .....	55
Tabella 13: Parametri di condizionamento nella prova n°1 .....	56
Tabella 14: Valori misurati nella prova n°2 .....	58
Tabella 15: Parametri di condizionamento nella prova n°3 .....	59
Tabella 16: Valori misurati nella prova n°3 .....	61
Tabella 17: Parametri di condizionamento nella prova n°4 .....	62
Tabella 18: Valori misurati nella prova n°4 .....	64
Tabella 19: Parametri di condizionamento nella prova n°5 .....	65
Tabella 20: Valori misurati nella prova n°5 .....	67
Tabella 21: Parametri di condizionamento nella prova n°6 .....	68
Tabella 22: Valori misurati nella prova n°6 .....	70
Tabella 23: Parametri di condizionamento nella prova n°7 .....	71
Tabella 24: Valori misurati nella prova n°7 .....	73
Tabella 25 Parametri di condizionamento nella prova n°8 .....	74
Tabella 26: Valori misurati nella prova n°8 .....	76
Tabella 27-: Parametri di condizionamento nella prova n°9 .....	77
Tabella 28: Valori misurati nella prova n°9 .....	79
Tabella 29: Parametri di condizionamento nella prova n°10 .....	80
Tabella 30: Valori misurati nella prova n°10 .....	82
Tabella 31: Parametri di condizionamento nella prova n°11 .....	83
Tabella 32: Valori misurati nella prova n°11 .....	85

Tabella 33: Valori misurati nella prova n°12.....	88
Tabella 34: Parametri di condizionamento nella prova n°13 .....	89
Tabella 35: Valori misurati nella prova n°13.....	91
Tabella 36: Parametri di condizionamento nella prova n°14. ....	92
Tabella 37: Valori misurati nella prova n°14.....	94
Tabella 38: Parametri di condizionamento nella prova n°15 .....	95
Tabella 39: Valori misurati nella prova n°15.....	97
Tabella 40: Parametri di condizionamento nella prova n°16 .....	98
Tabella 41: Valori misurati nella prova n°16.....	100
Tabella 42: Parametri di condizionamento nella prova n°17 .....	101
Tabella 43: Valori misurati nella prova n°17.....	103
Tabella 44: Parametri di condizionamento nella prova n°18 .....	104
Tabella 45: Valori misurati nella prova n°18.....	106
Tabella 46: Parametri di condizionamento nella prova n°19 .....	107
Tabella 47: Valori misurati nella prova n°19.....	109
Tabella 48: Parametri di condizionamento nella prova n°20 .....	110
Tabella 49: Valori misurati nella prova n°20.....	112
Tabella 50: Prove effettuate variando l'acqua totale ( $w_{tot}$ ).....	113
Tabella 51: Prove effettuate variando il FIR .....	115
Tabella 52: Prove effettuate variando l'acqua totale, senza schiuma.....	117
Tabella 53: Prova con variazione del FER.....	119
Tabella 54: Prove con variazione di FIR a FER 15.....	121
Tabella 55: Prove con variazione di FIR a FER 10.....	123
Tabella 56: Classificazione delle prove TST.....	128
Tabella 57: Report riassuntivo prova n°1.....	129
Tabella 58: Report riassuntivo prova n°2.....	129
Tabella 59: Report riassuntivo prova n°3.....	130
Tabella 60: Report riassuntivo prova n°4.....	130
Tabella 61: Report riassuntivo prova n°5.....	131
Tabella 62: Report riassuntivo prova n°6.....	131
Tabella 63: Report riassuntivo prova n°7.....	132
Tabella 64: Report riassuntivo prova n°8.....	132

*Valutazione del condizionamento per lo scavo con EPB in terreni con presenza di ciottoli*

Tabella 65: Report riassuntivo prova n°9.....	133
Tabella 66: Report riassuntivo prova n°10.....	133
Tabella 67: Report riassuntivo prova n°11.....	134
Tabella 68: Report riassuntivo prova n°12.....	134
Tabella 69: Report riassuntivo prova n°13.....	135
Tabella 70: Report riassuntivo prova n°14.....	135
Tabella 71: Report riassuntivo prova n°15.....	136
Tabella 72: Report riassuntivo prova n°16.....	136
Tabella 73: Report riassuntivo prova n°17.....	137
Tabella 74: Report riassuntivo prova n°18.....	137
Tabella 75: Report riassuntivo prova n°19.....	138
Tabella 76: Report riassuntivo prova n°20.....	138

## 1 Introduzione

Lo scavo delle gallerie ha sempre rappresentato una sfida ingegneristica e tecnologica molto complessa; la necessità di tali opere è sorta inizialmente per velocizzare gli spostamenti tra punti sulla superficie terrestre separati da singolarità topografiche, come rilievi collinari, montuosi e successivamente, con l'evoluzione delle tecnologie di scavo, si è iniziato a realizzare gallerie idroelettriche, fognarie, ferroviarie, autostradali e drenanti. Lo scavo delle gallerie ha permesso inoltre di ridurre la pendenza media di una strada e di conseguenza di garantire la transitabilità a tipologie di veicoli che senza l'opera non sarebbero in grado di affrontare forti pendenze; tale caratteristica permette inoltre di ridurre i consumi e aumentare il livello di sicurezza

L'utilizzo dello spazio sotterraneo ha acquisito nel tempo una crescente importanza, specialmente in ambito urbano, dove le infrastrutture al servizio delle persone vengono spesso alloggiare in modo da non occupare la superficie, destinata alla mobilità delle persone e alle loro attività. Tra queste opere vi sono i sistemi di condotte idrauliche e fognarie, i cavidotti. Lo sviluppo di nuove tecniche di scavo, ha permesso negli ultimi anni di realizzare tunnel in condizioni sempre più complesse, con maggiore efficacia e in minor tempo. In ambito urbano lo scavo meccanizzato di gallerie ha assunto importanza sempre crescente, dovuta alla necessità di realizzare infrastrutture come le linee di trasporto metropolitane; tali opere necessitano di macchine in grado di scavare il tunnel, limitando al minimo l'impatto del cantiere e dello scavo sull'ambiente circostante; in tale contesto le opere che si intende realizzare si innestano dove sono presenti i sottoservizi cittadini, come fogne, acquedotti, linee elettriche ed è fondamentale preservare tali sistemi.

L'aspetto che però risulta più importante è quello legato alla subsidenza in superficie che potrebbe provocare gravi danni ai mezzi che transitano in superficie, oltre che alle fondazioni degli edifici; tali opere se soggette a cedimenti differenziali potrebbero risultare compromesse con conseguenti danni a livello economico dovuto al risarcimento dei danni e al fermo del cantiere. Nello scavo urbano è quindi fondamentale la caratterizzazione geotecnica e geofisica del tratto in cui si realizzerà l'opera in modo da scegliere la macchina che meglio si adatta alle condizioni individuate. La scelta ricade nella maggior parte dei casi sulle TBM di tipo EPB che permettono di effettuare lo scavo in quasi tutte le tipologie di terreno; queste macchine avanzano iniettando in camera di scavo degli agenti condizionanti, i quali differiscono in termini di quantità e tipologia in funzione del terreno da scavare. Tali agenti consistono in agenti schiumogeni e polimeri che permettono alla

macchina di adattarsi facilmente alle variazioni nelle caratteristiche del terreno che si incontrano durante lo scavo.

Nel presente lavoro di tesi si intende verificare l'applicabilità dell' EPB allo scavo in contesto extraurbano di una galleria ferroviaria in materiale morenico costituito da una componente fine con presenza di ciottoli. Tali elementi rappresentano, in caso di condizionamento non corretto, un problema per l'avanzamento della macchina, in quanto possono segregarsi sul fondo della camera di scavo e impedire l'estrazione del materiale mediante la coclea e compromettere l'applicazione uniforme della pressione al fronte da parte del materiale condizionato; possono inoltre creare delle vie preferenziali d'ingresso per l'acqua in macchina nel caso di scavo sottofalda.

## 2 Metodi di scavo di gallerie

La realizzazione di un tunnel può avvenire con differenti metodi, la scelta del più adatto dipende da vari fattori tra cui la lunghezza dell'opera, le caratteristiche geologiche e geomeccaniche dell'ammasso in cui verrà scavato il tunnel, il contesto idrogeologico e i vincoli ambientali legati alla sua realizzazione; in generale in funzione del contesto e dei vincoli presenti si può procedere con metodo di scavo tradizionale che prevede l'utilizzo di esplosivo (Drill & Blast) o martellone, oppure con scavo meccanizzato (TBM, Roadheader).

Lo scavo tradizionale risulta in generale molto più flessibile dello scavo meccanizzato e si adatta facilmente a variazioni nelle caratteristiche del materiale che si incontra; l'avanzamento in metri al giorno scavati risulta però molto inferiore rispetto allo scavo meccanizzato. La scelta del metodo tradizionale avviene nel caso in cui la galleria abbia una lunghezza ridotta (<2000 metri), caso in cui i tempi necessari alla preparazione del cantiere, alla costruzione e consegna della TBM e all'avvio dello scavo sarebbero eccessivi rispetto ai tempi di scavo della galleria; I costi delle fasi iniziali per scavo con TBM sono elevati ma, per gallerie di grande lunghezza, vengono recuperati grazie alla maggiore velocità e sicurezza del processo rispetto allo scavo in tradizionale.

La realizzazione di una galleria può essere necessaria in ambienti in cui si devono attraversare ammassi rocciosi, che possono avere caratteristiche molto variabili, come lo stato di stress presente in sito, la fratturazione o la resistenza a compressione monoassiale, oppure in terreni, dove lo scavo risulta più semplice ma il supporto del vuoto che si crea è più critico in quanto le caratteristiche del materiale sono scadenti. Nel caso di scavo in terreni ci si trova spesso sotto il livello della falda, questo comporta la necessità di limitare l'ingresso dell'acqua all'interno della galleria durante lo

scavo o di doverla pompare al di fuori, e di dover installare dei sistemi di impermeabilizzazione per il funzionamento e la tenuta a lungo termine dell'opera.

Lo scavo meccanizzato con TBM, nel corso del XX secolo, si è evoluto, si sono sviluppate inizialmente macchine adatte allo scavo in roccia competente e successivamente macchine dotate di uno e anche due scudi, in grado di affrontare lo scavo in ammassi rocciosi scendenti o terreni; lo scudo è cilindrico e avanza con la macchina durante lo scavo, garantendo la protezione degli operatori e degli impianti della macchina da venute d'acqua o caduta di materiale dalla corona di scavo e sostenendo la spinta del terreno o della roccia; nel corso degli anni si sono sviluppate differenti macchine scudate, in grado di fronteggiare lo scavo in terreni sciolti, in terreni coesivi e in presenza d'acqua e di limitare al minimo i cedimenti in superficie indotti dallo scavo.

## 2.1 SCAVO CON TBM IN ROCCIA

### 2.1.1 Hard Rock TBM

Lo scavo meccanizzato in roccia, prevede l'utilizzo di macchine dotate di una testa fresante chiusa, sulla quale sono installati utensili di scavo rotolanti e tasche di raccolta che permettono di convogliare il materiale scavato dal fronte di scavo sul nastro trasportatore della macchina. Tali macchine sono adatte a rocce con elevata resistenza a compressione monoassiale, come graniti o basalti e garantiscono un'elevata velocità di avanzamento; per la progressione sfruttano dei dispositivi detti gripper che permettono di ottenere il contrasto necessario a fornire la spinta alla testa fresante; tali dispositivi vengono addossati alle pareti del tunnel mediante pistoni idraulici che forniscono pressioni molto elevate; a causa di questa caratteristica della macchina, si necessita di pareti poco fratturate che garantiscano la tenuta dei gripper e siano stabili per la sicurezza degli operatori, che in questo tipo di macchine non sono protetti da uno scudo durante l'avanzamento. Le TBM da roccia non sono inoltre in grado di operare con importanti venute idriche o sottofalda. Un esempio di TBM da roccia è riportato di seguito in figura 1.

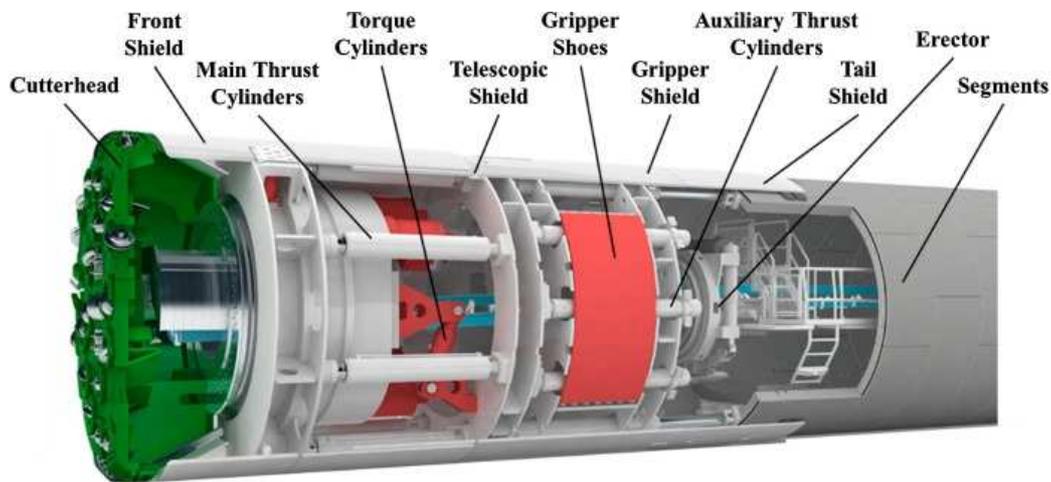


*Figura 1: Hard Rock TBM © Herrenknecht AG*

### 2.1.2 Double shield TBM

Sono state in seguito sviluppate le TBM doppio scudo in grado di scavare in roccia con elevata resistenza a compressione, ma anche di procedere in sicurezza in zone di faglia; tali porzioni di ammasso rappresentano infatti dei punti critici per lo scavo con tbn aperta da roccia, in quanto soggette a crolli e instabilità della corona di scavo.

Le macchine dotate di doppio scudo sono in grado eseguire contemporaneamente lo scavo e la posa del rivestimento definitivo della galleria se la qualità della roccia lo permette, in caso contrario l'avanzamento avviene sfruttando i pistoni idraulici di spinta che trovano il contrasto degli anelli in calcestruzzo precedentemente assemblati



*Figura 2: Double shield TBM © Herrenknecht AG*

## 2.2 SCAVO CON TBM NEI TERRENI

Nella realizzazione di gallerie in terreni lo scavo risulta semplice, ciò che presenta le criticità maggiori è il sostegno del vuoto che si crea con l'avanzamento; i terreni sono infatti caratterizzati da caratteristiche meccaniche scadenti, che non garantiscono la stabilità del vuoto.

Uno degli aspetti più importanti legato alla scavo nei terreni è quello legato alla subsidenza in superficie, fenomeno che potrebbe provocare gravi danni ai mezzi e alle persone che transitano in superficie, oltre che alle fondazioni degli edifici; tali opere, se soggette a cedimenti differenziali potrebbero risultare compromesse con conseguenti danni a livello economico dovuti a spese processuali e al fermo del cantiere. Il fenomeno della subsidenza si verifica nel caso in cui la pressione necessaria a garantire la stabilità del fronte viene a mancare, causando il franamento di una porzione del fronte che porta ad un conseguente abbassamento del terreno in superficie.

Nello scavo urbano è quindi fondamentale la caratterizzazione geotecnica e geofisica del tratto in cui si realizzerà l'opera in modo da scegliere la macchina che meglio si adatta alle condizioni individuate e in corso d'opera risulta di fondamentale importanza il monitoraggio delle strutture, le acque e gli impianti che sono interessati dal tracciato della galleria. Per quanto riguarda lo scavo in terreni, sono state sviluppate macchine in grado di fornire supporto al fronte di scavo, prevenire le venute d'acqua e limitare quindi i cedimenti in superficie oltre che, nel caso di scavo sottofalda, l'abbassamento della stessa. Di seguito si riporta uno schema generale delle macchine per lo scavo in terreno o anche in materiale misto costituito da rocce e terreni.

	<i>Tipologia di macchina</i>	<i>Campo di applicazione</i>
<b>SHIELD TBM</b>	<i>Open face</i>	Terreno solido, roccia scadente
	<i>Mechanical face support</i>	Terreno solido, roccia alterata e densamente fratturata
	<i>Compressed Air Shields</i>	Terreno solido con acqua, terreno misto a roccia
	<i>Slurry7Hydroshield</i>	Sabbie, terreni sabbiosi con roccia
	<i>Earth Pressure Balance Shield</i>	Argille, terreni argillosi con roccia

Tabella 1: TBM scudate

La prima tipologia di TBM scudate sviluppate, sono dette open face, presentavano una testa di scavo dotata di numerose aperture; tale struttura permetteva l'ingresso del materiale che veniva poi convogliato mediante nastro trasportatore al di fuori della galleria. Tale tipologia di macchina non permetteva di porre sostegno al fronte di scavo in caso di necessità. In seguito sono state sviluppate macchine in grado di porre un supporto di tipo meccanico al fronte per evitarne l'instabilità e altre dotate di un sistema ad aria compressa che permetteva di effettuare scavi sotto il livello della falda.

Le macchine attualmente più utilizzate per gli scavi in terreni o in ambito urbano dove è fondamentale il controllo della subsidenza in superficie sono le slurry shield/Hydroshield e in particolare le EPB shield; tali tipologie vengono di seguito presentate.

### 2.2.1 Slurry Shield

Questa tipologia di macchine è nata per lo scavo in terreni, dove è fondamentale il supporto del fronte per evitarne il franamento e i possibili fenomeni di subsidenza ad esso correlati; la funzione di sostegno viene fornita da un fango bentonitico. Tale mezzo viene pompato mediante una serie di condotte all'interno della camera di scavo ed è caratterizzato da un'elevata densità; esso è costituito da una miscela di bentonite e acqua con l'aggiunta di opportuni additivi ed il contenuto di bentonite varia in funzione della porosità del materiale da scavare. La miscela del fango va definita diversamente per ogni sito di scavo in quanto influenza l'uniformità nell'applicazione della pressione sul fronte di scavo e l'impermeabilità del fronte.

Il fango bentonitico va a formare una membrana impermeabile sul fronte di scavo detta filter cake, che previene l'ingresso d'acqua all'interno della camera di scavo e grazie alla bassa permeabilità garantisce una corretta e uniforme applicazione della pressione sul fronte. Tale strato è sottile e si forma tra terreno e fango, nel momento in cui il fango perde parte dell'acqua a causa della pressione applicata.

Il fango garantisce il supporto del fronte ed è anche il mezzo di trasporto del materiale scavato; la torbida costituita da terreno scavato e fango bentonitico viene convogliata in un frantoio a mascelle alla base della camera di scavo che riduce la dimensione degli elementi più grossolani e poi in un sistema di condotte, fino ad un impianto di trattamento situato al di fuori della galleria, dove avviene la separazione con apposito impianto del terreno scavato dalla bentonite. Il fango agisce inoltre come lubrificante per gli utensili di scavo e ne mantiene bassa la temperatura riducendone l'usura durante lo scavo.

Le TBM di tipo slurry sono in grado di scavare in argille, sabbie e ghiaie ma nel caso di scavo in terreni ad alto contenuto di fine come limi e argille risulta problematica la separazione del materiale scavato dalla bentonite. Tali macchine presentano inoltre difficoltà nella regolazione rapida della pressione applicata al fronte, a causa dell'elevata densità del fango bentonitico e tale mezzo, in caso di particolari sostanze chimiche presenti nel terreno, può essere soggetto a contaminazione e perdere efficacia.

### 2.2.2 Hydroschild

Queste macchine sono un'evoluzione delle slurry shield; esse sono caratterizzate da una camera di scavo costituita da due parti, le quali sono separate da una parete sommersa. Una parte contiene la miscela costituita da terreno scavato e fango bentonitico e la seconda presenta una zona in cui viene immessa aria compressa; questo sistema permette, a differenza di quanto accade nelle macchine slurry, di regolare rapidamente la pressione applicata al fronte in caso di necessità. Di seguito è riportato uno schema del funzionamento di una macchina di tipo Hydroschild.

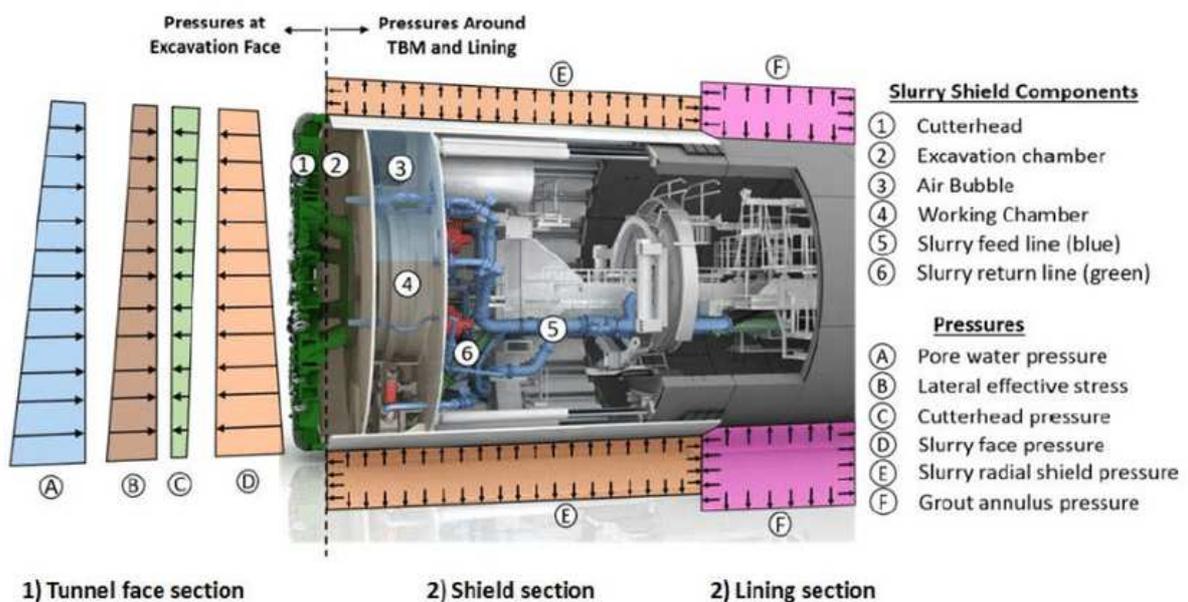


Figura 3: Hydroschild (jaafar,17)

Tra i vantaggi garantiti dall'estrazione del fango sotto forma di torbida si ha quello di poter scavare in presenza di materiali che aerodispersi potrebbero essere inalati o respirati dalle persone come ad esempio l'amianto. Con l'estrazione del fango mediante condotte si ha un confinamento totale del materiale pericoloso e di conseguenza una gestione adeguata dell'agente pericoloso.

### 2.2.3 Earth pressure balance shield (EPBs)

Le prime EPB furono progettate a partire dagli anni 70 in Giappone e nacquero per porre rimedio al problema dello scavo con slurry in materiali ricchi di fini come limi e argille; tali macchine infatti non prevedono impianti di separazione del materiale scavato dal mezzo con cui viene trasportato, sono adatte allo scavo in terreni limosi e argillosi e grazie all'utilizzo di agenti condizionanti si adattano allo scavo in terreni sabbioso ghiaiosi.

Di seguito si riporta uno schema che permette di valutare dove è opportuno l'utilizzo di EPB e dove di Slurry shield in funzione della granulometria del terreno da scavare.

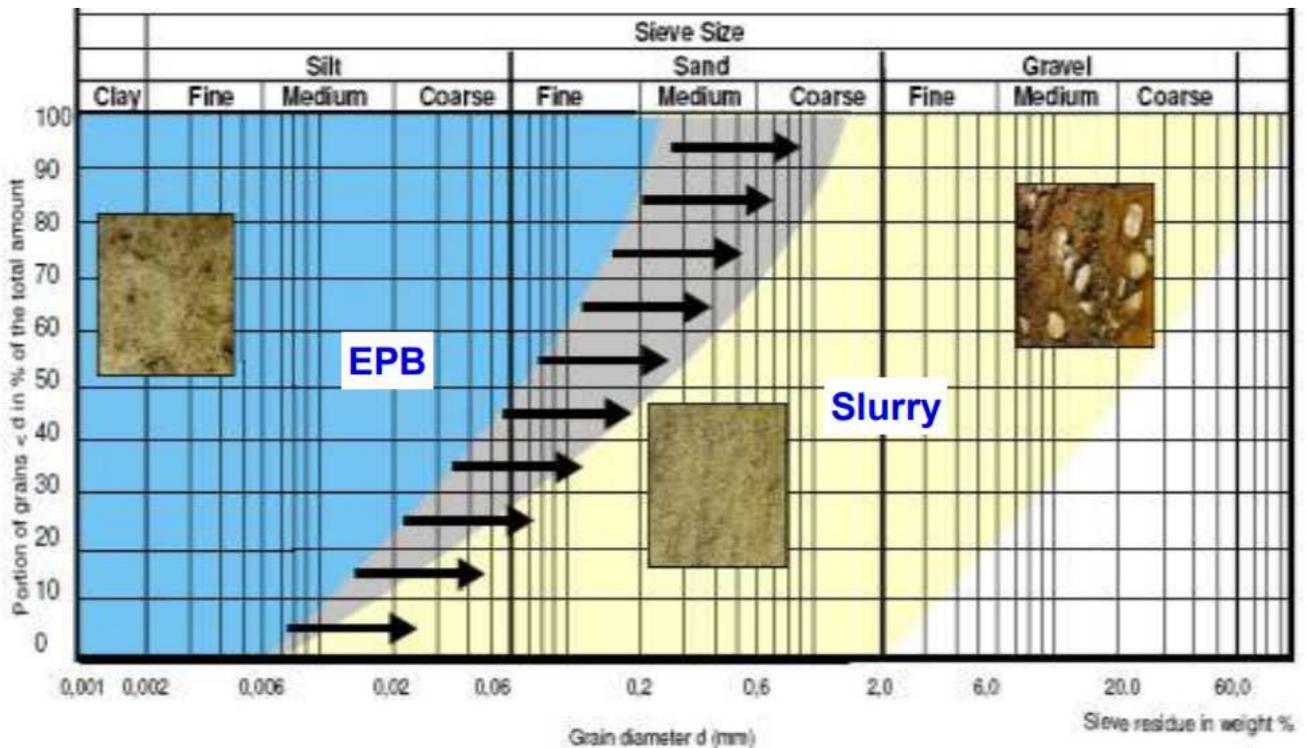


Figura 4: Campo di applicabilità EPB e Slurry Shield TBM in funzione della distribuzione granulometrica del terreno (jian ZHAO, 2012)

La pressione al fronte è un aspetto fondamentale dello scavo con EPB; essa viene applicata dallo stesso terreno scavato, che deve riempire completamente la camera di scavo. La macchina procede alternando le fasi di scavo a quelle di posa del rivestimento definitivo; la lunghezza del singolo avanzamento è legata alla lunghezza dei cilindri di spinta. Il rivestimento è costituito da un anello di conci prefabbricati che vengono installati mediante un erettore (fig. 5); tra l'anello e il terreno o la

roccia si ha una cavità anulare che viene riempita con una miscela bicomponente costituita da cemento e silicato, la quale ha il compito di evitare cedimenti in superficie e dare confinamento all'anello installato.



*Figura 5: Erettore dei conchi prefabbricati © [www.terratec.com](http://www.terratec.com)*

Il tempo richiesto per l'installazione dell'anello, rappresenta una criticità per il condizionamento, infatti all'aumentare del tempo di posa del rivestimento, gli agenti condizionanti perdono le caratteristiche che li rendono efficaci e il materiale in camera di scavo perde le proprietà meccaniche ottimali.

La macchina, in caso di terreno o roccia scadente, lavora quindi in modalità chiusa, ovvero a camera piena applicando uniformemente la pressione su tutta la superficie del fronte, mentre nel caso in cui si abbia un fronte più stabile, l'EPB può lavorare in modalità aperta, con la camera non completamente piena e avanzare più velocemente; nel secondo caso l'azione della coclea non serve più a regolare la pressione di sostegno al fronte, ma solamente all'estrazione del materiale dalla camera di scavo. Il materiale viene scavato da utensili raschianti e/o rotolanti e attraverso delle aperture nella testa di scavo, entra nella camera di scavo. Durante lo scavo vengono iniettati in testa e in camera agenti condizionanti, in particolare schiume e all'occorrenza anche polimeri che permettono di diminuire gli attriti, ridurre la coppia richiesta per la rotazione della testa, e costituire un materiale adatto ad essere estratto dalla camera mediante un estrattore a coclea e successivamente convogliato al di fuori della galleria mediante nastri trasportatori.

Il condizionamento con schiume permette inoltre di avere una buona comprimibilità del mezzo di supporto in modo da evitare variazioni rapide di pressione al fronte, che potrebbero causarne l'instabilità e garantisce l'impermeabilità del fronte.

Il terreno scavato addizionato con acqua e schiume si comporta come una molla, a fronte di variazioni di volume in camera di scavo si hanno piccole variazioni della pressione di supporto al fronte. E' possibile applicare la pressione al fronte di scavo mediante due sistemi:

- Spingendo lo scudo in avanti contro il terreno mediante martinetti idraulici.

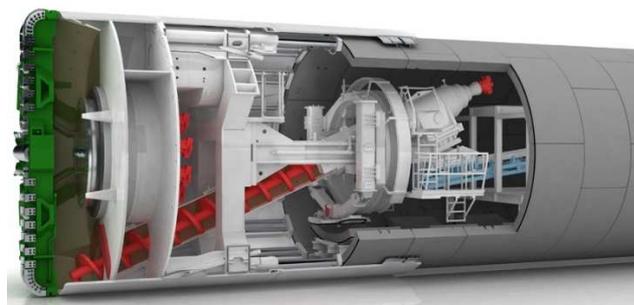


*Figura 6: Cilindri di spinta © Herrenknecht AG*

- Regolando la velocità di rotazione dell'estrattore a coclea e quindi aumentando la portata di estrazione del materiale dalla camera di scavo.

La funzione dell'estrattore a coclea è fondamentale per il controllo della pressione, infatti il materiale passa da una pressione elevata in camera di scavo alla pressione atmosferica, ciò avviene lungo la coclea; in funzione della lunghezza della coclea si possono infatti affrontare pressioni più o meno elevate, fino ad un massimo di circa 6 bar.

Oltre alla lunghezza è fondamentale la velocità a cui ruota; più è alta e minore sarà la pressione applicata al fronte, se bassa invece si avrà un aumento della pressione.



*Figura 7: estrattore a coclea in macchina EPB © Herrenknecht AG*

La pressione di supporto al fronte deve essere in equilibrio con la pressione fornita dal terreno e dall'acqua se presente. In funzione delle caratteristiche del terreno e del rapporto tra copertura e diametro della galleria ( $t/D$ ) vengono calcolati differenti valori di pressione da applicare al fronte con il materiale condizionato.

### 3 Condizionamento del materiale di scavo

Nel caso di scavo mediante TBM di tipo EPB, è necessario l'utilizzo di agenti condizionanti, che sono di seguito elencati:

- Schiuma
- Polimeri a catena lunga, per migliorare la stabilità delle bolle e in grado di assorbire acqua
- Additivi lubrificanti
- Filler, che permettono di modificare la distribuzione granulometrica del terreno in modo da facilitare il condizionamento
- Acqua nelle argille, per renderle più plastiche e scavabili
- Fango bentonitico

Tali elementi permettono di modificare il comportamento del materiale, in maniera che sia adatto ad essere scavato e trasportato. Essi vengono iniettati davanti alla testa di scavo, in camera di scavo e all'occorrenza anche all'interno della coclea. Tra le funzioni principali del condizionamento si hanno le seguenti:

- Ridurre la collosità nel caso di scavo in argille, problema che causerebbe l'adesione del materiale sulla testa di scavo, con diminuzione delle performance di scavo e aumento delle sollecitazioni sulla macchina.
- Ridurre l'angolo di attrito interno del materiale, in modo da diminuirne l'abrasività e i costi legati alla sostituzione degli utensili; si riduce inoltre la potenza necessaria all'estrazione e al trasporto sui nastri trasportatori del materiale scavato.
- Conferire al materiale un comportamento di tipo plastico, caratteristica che permette di aumentare la stabilità del fronte e ridurre il rischio di cedimenti in superficie.
- Migliorare la consistenza del materiale, in modo che si adatti alle caratteristiche e ai parametri di avanzamento della macchina.
- Ridurre la permeabilità del suolo in modo da limitare al minimo l'ingresso di acqua dal fronte.

### 3.1 Schiume

Nello scavo con EPB le schiume sono costituite da aria e liquido generatore, composto da acqua e tensioattivo; all'occorrenza vengono aggiunti particolari additivi lubrificanti e disperdenti.

La schiuma prodotta deve rispettare i seguenti requisiti:

- Avere densità costante e uniforme, quindi si deve avere una completa miscelazione tra liquido e aria e tutta la schiuma prodotta deve avere le stesse proprietà.
- Essere stabile per il tempo in cui rimane in camera di scavo.
- Avere una struttura omogenea nella dimensione delle bolle.

Il tipo di schiuma impiegata per condizionare il materiale di scavo, deve essere scelto in funzione del tipo di terreno.

Tale mezzo ha il compito di conferire al terreno una consistenza tale da applicare correttamente la pressione al fronte di scavo, ed essere estratto facilmente con la coclea oltre che trasportato dal sistema di nastri trasportatori della macchina. La schiuma permette inoltre di ridurre la temperatura raggiunta dagli utensili durante lo scavo, e di conseguenza anche l'usura degli stessi.

La sua formazione avviene in appositi generatori, che possono avere forme diverse, ma che hanno la funzione di generare turbolenza nei flussi in ingresso costituiti da aria e acqua con tensioattivo. La turbolenza che si crea garantisce una corretta miscelazione tra aria e liquido generatore e quindi la formazione della schiuma.

### 3.2 Procedura di design della schiuma

Il design della schiuma viene definito con la seguente procedura:

1. Caratterizzazione geotecnica del terreno da scavare mediante test di laboratorio.
2. Design del condizionamento in funzione della distribuzione granulometria del terreno
3. Caratterizzazione dal punto di vista ambientale del terreno condizionato mediante test di laboratorio; verifica che gli agenti condizionanti siano compatibili con le normative ambientali vigenti.
4. Controllo delle caratteristiche del materiale scavato in cantiere e miglioramento del design del condizionamento durante lo scavo.

A causa della variabilità del materiale che si incontra durante l'avanzamento della macchina, è fondamentale controllare il materiale condizionato e se necessario modificare i parametri di condizionamento al fine di avere sempre un materiale con le caratteristiche desiderate.

### 3.3 Parametri caratteristici del condizionamento

Le schiume sono costituite dai seguenti componenti nelle rispettive percentuali in peso:

- Acqua 5-10%
- Tensioattivo 0.5-5%
- Aria 90-95%
- Polimero (eventuale) < 0.1%

Esse sono caratterizzate dai seguenti parametri: FER (foam expansion ratio), FIR( foam injection ratio), tempo di semivita e concentrazione di tensioattivo nel flusso di liquido generatore, che vengono di seguito descritti.

#### 3.3.1 FER

Il FER (Foam expansion ratio) viene calcolato mediante la seguente equazione:

$$FER = \frac{V_{schiuma}}{V_{liquido\ generatore}} * 100$$

Dove il liquido generatore è costituito da acqua e tensioattivo.

Il FER varia tra 8 e 20 e per valori bassi, la schiuma risulta molto bagnata, mentre per valori alti risulta asciutta.

La scelta di tale parametro viene definita in funzione del terreno da scavare; in generale, per terreni sabbiosi si adottano FER piuttosto alti (16-20), mentre nel caso di terreni che hanno un contenuto di argille elevato, si adottano FER bassi in modo da avere una schiuma bagnata, in grado di adattarsi meglio allo scavo in argille.

### 3.3.2 FIR

Il FIR (Foam injection ratio) viene calcolato mediante la seguente equazione:

$$FIR = \frac{V_{schiuma}}{V_{materiale\ scavato\ (in\ posto)}} * 100$$

Dove il volume di materiale scavato va considerato in posto, senza tener conto del bulking factor, come indicato nelle linee guide EFNARC (2005).

Il FIR è un parametro che quantifica il volume di schiuma rispetto al totale di terreno in posto che si scava. Il FIR, in fase di definizione del condizionamento ottimale di un terreno, deve essere scelto in modo da avere sufficiente schiuma che garantisca la corretta plasticità e pastosità al terreno condizionato e allo stesso tempo deve prevenire l'eccesso di schiuma che ne provocherebbe la separazione dal materiale in fase di miscelazione.

Tale parametro, espresso in percentuale, oscilla in funzione della variabilità nelle caratteristiche del terreno che si incontra nello scavo; generalmente il range di valori varia tra 10% e 80%.

Maidl (1995) descrisse la procedura di calcolo del FIR necessario, in funzione della massima porosità del terreno.

Bezuijen (2002) ha quantificato la correlazione tra la quantità di schiuma necessaria per un buon condizionamento e la permeabilità del terreno.

### 3.3.3 FIR reale

Durante la campagna di condizionamento, il FIR viene espresso in percentuale rispetto al volume del campione, di conseguenza, dal momento che il campione è costituito da materiale fine, si trascura il volume occupato nel caso reale dalla componente grossolana che non è sensibile al condizionamento.

Per ricondursi al valore di FIR reale da adottare in fase di scavo occorre quindi correggere il valore ottenuto dai test in laboratorio, che avrà un valore sicuramente più alto rispetto al valore reale in quanto nella realtà, a parità di schiuma iniettata, si avrà un volume di materiale maggiore.

#### 3.3.4 Tempo di semivita ( $t_{50}$ )

Il tempo di semivita viene misurato in secondi, ed è un indice che caratterizza la stabilità delle bolle di schiuma a pressione atmosferica; corrisponde al tempo, richiesto da un certo numero di bolle, necessario alla perdita della metà del fluido generatore.

Per valori elevati di  $t_{50}$  si ha una schiuma le cui bolle sono stabili e durano a lungo prima di collassare, mentre per  $t_{50}$  bassi la schiuma ha scarsa stabilità. In generale, il tempo di semivita è legato alla scelta del valore di FER, infatti per FER alti si avrà una schiuma asciutta e più stabile, mentre per FER bassi si hanno schiume più bagnate e le cui bolle diventano instabili in breve tempo. Durante una campagna di condizionamento, può essere opportuno valutare la stabilità delle bolle per un campione di schiuma miscelata al terreno da condizionare; tale procedura permette di ricreare una condizione più rappresentativa della situazione che si ha in camera di scavo.

#### 3.3.5 Densità della schiuma

Dalla densità della schiuma è possibile ricavare il valore del FER.

#### 3.3.6 Concentrazione di tensioattivo

La concentrazione di tensioattivo, misurata come percentuale in volume, varia in funzione della quantità di acqua iniettata, o dell'acqua che è già presente nel terreno che si sta scavando.

La modulazione di tale valore è molto importante in fase di scavo per rispettare i limiti di tipo ambientale legati all'uso di tensioattivi; infatti, in fase di scavo, a seconda della durata di ogni avanzamento, a parità di concentrazione, può essere iniettata una quantità variabile di tensioattivo.

### 3.4 Considerazioni

Nel design del condizionamento ottimale di un terreno, può accadere che i parametri che garantiscono risultati migliori nel materiale condizionato, non rispettino i limiti imposti dal D.P.R 13 giugno 2017 relativo alle terre e rocce da scavo; occorre quindi valutare attentamente la scelta degli agenti condizionanti che si utilizzano e le loro caratteristiche.

Nel condizionamento di un terreno è fondamentale l'utilizzo di tensioattivi che siano degradabili in breve tempo e abbiano un basso impatto dal punto di vista ambientale; tale caratteristica è importante per poter ridurre il volume delle vasche di stoccaggio del materiale.

## 4 Prove di laboratorio

In una campagna per stabilire il condizionamento ottimale di un terreno, vengono svolte numerose prove, l'interpretazione delle quali permette di avere indicazioni sul comportamento che avrà il materiale al momento dello scavo.

Ad oggi non esistono però prove standardizzate per determinare la qualità di un terreno condizionato, si sono quindi sviluppati una serie di test in grado di individuare le proprietà del terreno condizionato come mezzo di supporto; tali proprietà possono essere descritte mediante i seguenti parametri:

- densità del mezzo di supporto per definire la distribuzione delle pressioni sul fronte di scavo
- lavorabilità e viscosità del mezzo
- permeabilità, per valutare l'applicabilità dell'EPB e determinare il flusso d'acqua in ingresso dal fronte.
- comprimibilità del mezzo, per valutarne la sensibilità a variazioni nel flusso di materiale estratto
- stabilità del mix durante i tempi morti della macchina.

### 4.1 Slump test

Una semplice prova che fornisce indicazioni sul comportamento del materiale condizionato è lo slump test; tale test permette di valutare se la quantità di agenti condizionanti utilizzati conferisce al materiale le caratteristiche meccaniche desiderate. Tale prova viene sempre adottata in quanto ha un costo molto basso e può essere effettuata sia in laboratorio come test preliminare allo scavo, sia in corso d'opera per valutare l'efficacia del condizionamento.

La prova di slump prevede l'utilizzo di un cono di Abrams (fig.8), analogamente a quanto avviene nelle prove di lavorabilità per il calcestruzzo proiettato ed è definita nella norme ASTM 143-C e UNI EN 12350.

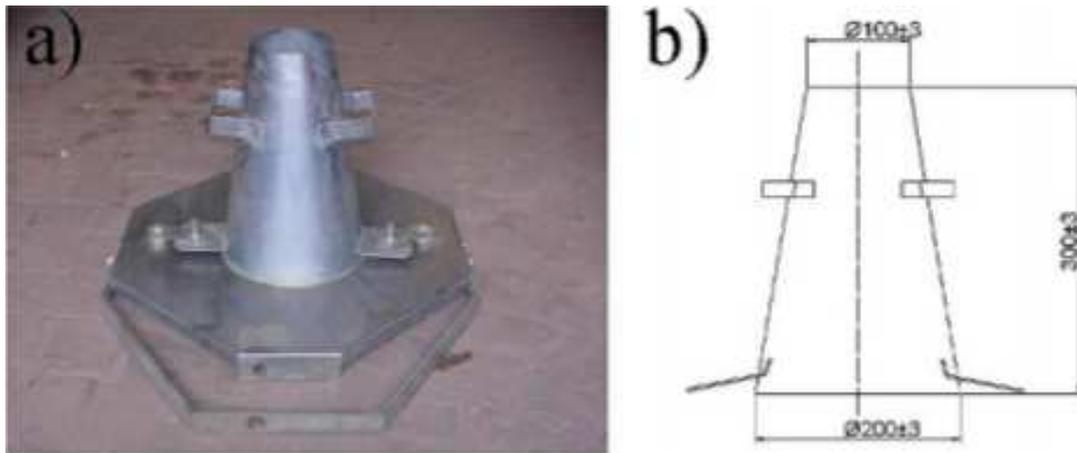


Figura 8: Cono di Abrams

#### 4.1.1 Procedura

La procedura prevede di mescolare in una betoniera il terreno, con l'acqua e gli agenti condizionanti (fig.9). Successivamente si riempie il cono di Abrams (fig.10) di materiale e dopo 1 minuto in cui il materiale si assesta a causa del peso proprio, si solleva il cono (fig.11) e si misura l'abbassamento rispetto al livello iniziale.

La prova permette di valutare il comportamento globale del terreno condizionato, la plasticità e la consistenza; si possono inoltre notare eventuali eccessi di acqua o schiume in quanto nella prova tendono a separarsi dall'impasto e a fluire sulla piastra sopra cui è poggiato il cono.



Figura 9: Miscelazione del materiale in betoniera



*Figura 10: Immissione del materiale condizionato nel cono di Abrams*



*Figura 11: Sollevamento del cono dopo aver sbloccato i fermi alla base dello stesso*

I test di slump, sulla base di numerose esperienze di laboratorio, possono essere suddivisi in 5 comportamenti principali, che vengono di seguito elencati:

- Non si ha la formazione di una miscela plastica, il collasso del materiale è irregolare e questo comportamento può essere associato ad una mancanza di acqua, di schiuma o di entrambe. Tale comportamento può inoltre essere dovuto ad una distribuzione granulometrica inadatta al condizionamento, a causa ad esempio di una carenza nella componente fine.
- Si ha comportamento di tipo rigido, con valori molto bassi di abbassamento del materiale; in questo caso si ha la formazione di un impasto caratterizzato da una buona plasticità, ma probabilmente la schiuma non è sufficiente. In questa condizione si ha un comportamento limite.

- Si ottiene una miscela troppo fluida che tende a segregare una parte di acqua o schiuma, o entrambe. Tale comportamento si ha quando si ha un eccesso di acqua o schiuma o di entrambe rispetto ai valori ottimali per un buon condizionamento.
- Si ha un comportamento di tipo plastico con una ridotta segregazione di liquido dall'impasto; il comportamento è limite in questo caso.
- Comportamento plastico del materiale, non si evidenziano rotture nella massa e non si ha segregazione di liquido. In questo caso il condizionamento è ottimale.

#### 4.1.2 Slump test in letteratura

La prova di slump è stata utilizzata da molti autori ed è stata effettuata su una grande varietà di terreni da condizionare per lo scavo con EPB; sono quindi disponibili numerosi dati in letteratura che permettono di avere indicazioni, in funzione del terreno che si deve condizionare, sui valori di schiuma, acqua e polimeri che forniscono i risultati migliori in termini di comportamento del materiale.

Di seguito sono riportati alcuni autori e i risultati ottenuti nelle loro analisi:

- ***Peron and Marcheselli (1994)***

*Nel loro studio analizzarono il condizionamento per scavo con di EPB per il passante ferroviario a Milano, in terreno alluvionale costituito dalle seguenti classi granulometriche:*

- *75% di dimensione compresa tra 0.075mm e 2mm*
- *20% maggiore di 2 mm*
- *5% costituito da materiale fine sotto gli 0.075mm*

Effettuando le prove giunsero ad un condizionamento ottimale, con valori di slump tra i 50mm e i 100mm caratterizzato da un FIR compreso tra 50% e 80% con aggiunta di un 5% di acqua per lo scavo sopra falda, mentre definirono un FIR del 50% per lo scavo sottofalda.

- ***Quebaud (1996) and Quebaud et al (1998)***

Questi autori effettuarono le prove su campioni con differenti distribuzioni granulometriche:

- *Sabbia fine con dimensione compresa tra 0.2mm e 0.4 mm*
- *Sabbia con dimensione tra 0.01mm e 4mm*

Nelle prove riscontrarono per entrambe le distribuzioni granulometriche un valore di slump ottimale intorno a 120mm e al fine di ottenere tale risultato, facendo variare il contenuto d'acqua tra 6% e 23%, era necessario adottare un FIR tra 5% e 35%.

- ***Pena (2003)***

L'autore utilizzò differenti tensioattivi e ne valutò le differenze nel condizionamento di una sabbia con distribuzione granulometrica compresa tra 0.002mm e 2mm.

Le prove furono effettuate con i seguenti valori di C% e FIR (Foam Injection Ratio):

- C% di tensioattivo tra 1.5% e 2.5%
- FIR 65%

I valori di slump ottenuti furono compresi tra 100 e 150mm e furono ritenuti ottimali per lo scavo mediante EPB.

Successivamente furono condotte prove con un FIR pari a 80% e risultati di slump ottenuti furono tra 150mm e 200mm.

- ***Leinala et al. (2000)***

Gli autori effettuarono prove su differenti tipologie di terreno durante lo scavo del Toronto Sheppard Subway Project.

Per la sabbia limosa, con un contenuto iniziale d'acqua variabile tra 8% e 11% fu necessario adottare un FIR al 50% per ottenere valori di slump intorno a 100mm.

- ***Vinai et al (2007)***

Gli autori effettuarono test su sabbie e al fine di avere un condizionamento ottimale riscontrarono uno stretto legame tra il contenuto d'acqua e il FIR .

#### 4.1.3 Vantaggi e svantaggi della prova

La prova di slump risulta semplice da eseguire e può essere effettuata in serie durante una campagna di condizionamento, in quanto il costo è molto basso. Tra i vantaggi si ha una vasta quantità di dati cui far riferimento in letteratura, in quanto è stata analizzata da molti autori in una grande varietà di terreni.

La prova risente di alcune limitazioni, tra cui la dimensione limitata del cono, che permette di valutare nel test solo la componente fine del campione di terreno; il materiale grossolano, che ha grande importanza nel comportamento globale del materiale condizionato alla scala della camera di scavo, non può essere valutato nella prova.

Il test di slump fornisce inoltre risultati di tipo qualitativo, basati sui valori di abbassamento che sono soggetti ad una grande variabilità, e sulle osservazioni degli operatori che effettuano la prova.

## 4.2 Test di semivita

Un'altra prova che si effettua in laboratorio è il test di semivita, che permette di valutare la stabilità delle bolle di schiuma. La prova, definita nella procedura indicata nelle linee guida EFNARC(2005), permette di misurare il tempo in cui la schiuma perde la metà del liquido con cui è stata generata. Tale prova necessita di un imbuto in cui è presente una pietra porosa.

La procedura prevede di versare 80 g di schiuma nell'imbuto dopo aver opportunamente saturato la pietra porosa e avviare il cronometro; la schiuma perde con il passare dei secondi parte del liquido generatore, che fluisce dall'imbuto in un recipiente di raccolta posto su una bilancia; quando il valore misurato con la bilancia corrisponde alla metà del fluido generatore, quindi 40 g, si ferma il cronometro ed il tempo misurato corrisponde al tempo di semivita della schiuma.

### 4.2.1 Vantaggi e limitazioni

Il test di semivita permette di valutare, a pressione atmosferica, la stabilità delle bolle di schiuma; la procedura richiede attrezzatura semplice e a basso costo e permette di stimare la qualità della schiuma prodotta.

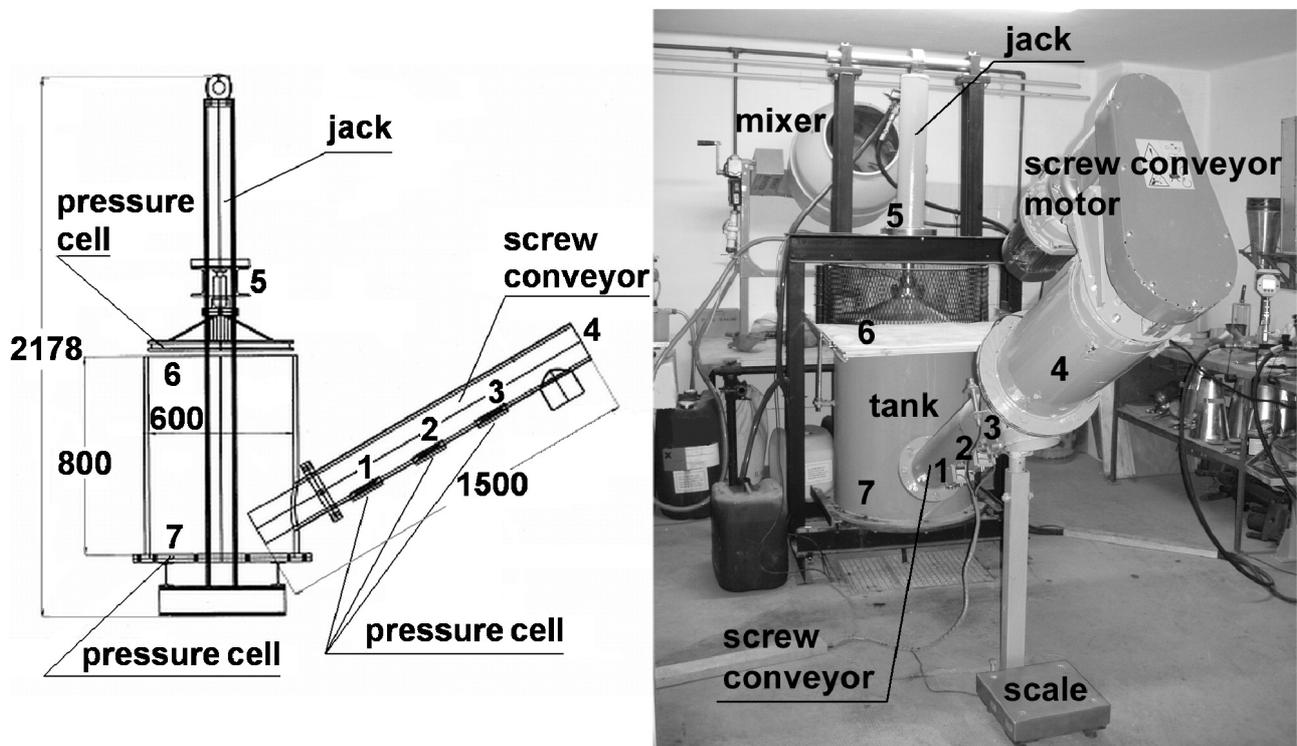
La prova di semivita risulta però poco rappresentativa di quello che sarà il comportamento della schiuma in camera di scavo, in quanto nella macchina essa viene prodotta ad una pressione molto più elevata di quella atmosferica e in camera di scavo il comportamento della schiuma è influenzato da numerosi fattori quali la presenza di acqua e eventuali sostanze chimiche in essa presenti. Il risultato della prova è soggetto inoltre ad una grande variabilità in funzione del tensioattivo che si adotta per generare la schiuma.

## 4.3 Prova di estrazione

Tra le prove di caratterizzazione, è stata sviluppata una prova in grado di simulare il processo di estrazione del materiale condizionato dalla camera di scavo; tale test prevede l'utilizzo di estrattori a coclea da laboratorio, costituiti da un serbatoio che può essere messo in pressione mediante cilindri idraulici e da una coclea alla base del serbatoio. Nella prova si esegue l'estrazione del materiale in pressione nel serbatoio mediante la coclea e attraverso dei trasduttori di pressione, viene misurata la pressione in diversi punti lungo la coclea. Durante la prova si misura inoltre la coppia necessaria a far girare la coclea; questo parametro è di fondamentale importanza per valutare la qualità del condizionamento ai fini dello scavo con EPB; durante lo scavo infatti, si avranno nel caso di materiale a comportamento rigido, valori di coppia elevati, mentre nel caso di

materiale molto fluido, i valori di coppia saranno bassi, ma si potrebbero avere problemi nel trasporto del materiale sui nastri trasportatori; occorre quindi condizionare il materiale in modo da avere una buona plasticità, senza avere eccessi o carenze di liquido o schiume e senza avere comportamento né troppo fluido e nemmeno troppo rigido. Tale equilibrio dovrebbe garantire valori di coppia non molto elevati e avere un trasporto del materiale senza rischio di fuoriuscite dai nastri.

Al Politecnico di Torino, da Vinai et al. (2008) è stato sviluppato un prototipo di estrattore da laboratorio che viene riportato in figura 12.



*Figura 12: Estrattore a coclea (TUSC)*

La prova di estrazione prevede il condizionamento del materiale a pressione atmosferica e successivamente l'immissione dello stesso nell'estrattore, quando il serbatoio è pieno si procede con la prova.

#### 4.3.1 Vantaggi e limitazioni

Tra i vantaggi della prova si ha la possibilità di avere indicazioni sull'estrazione del materiale, in termini di coppia richiesta alla coclea e valutare, in funzione della pressione a cui viene posto il serbatoio, della dissipazione della pressione lungo la coclea; la prova permette quindi, in base al condizionamento, di definire l'idoneità del materiale ad essere estratto mediante il trasportatore a coclea.

Questo test presenta però alcune limitazioni: la prima è legata alla dimensione delle attrezzature da laboratorio, che non permettono di considerare nella prova la componente grossolana della distribuzione granulometrica che si analizza, ma soltanto la parte fine, mentre la seconda è legata al condizionamento del materiale a pressione atmosferica prima di immergerlo nel serbatoio del dispositivo; nel caso reale la miscelazione del terreno con gli agenti condizionanti, avviene alla pressione che si ha in camera di scavo, molto più elevata di quella atmosferica.

## 5 Caso studio

### 5.1 Introduzione

Nel corso del presente lavoro di tesi, si è condotta una campagna di condizionamento su un terreno morenico con particolare attenzione alle prove di Tilt Sliding Test; il terreno originale è caratterizzato dalla seguente distribuzione granulometrica (figura 13).

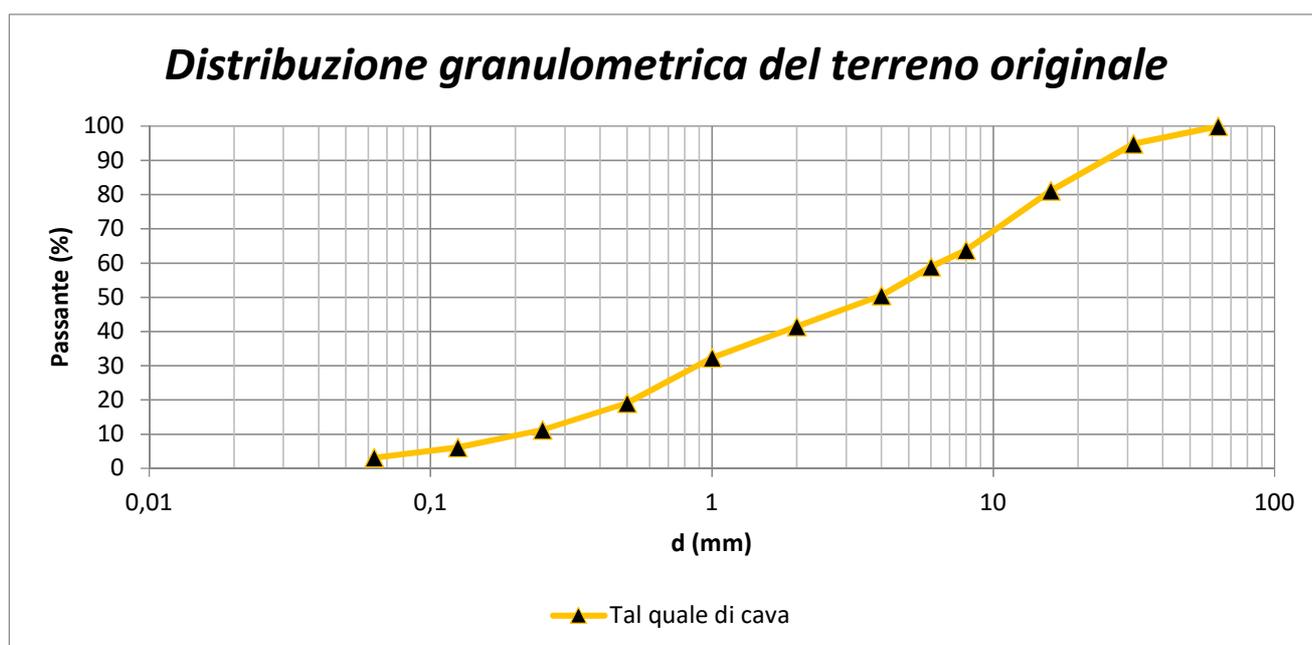
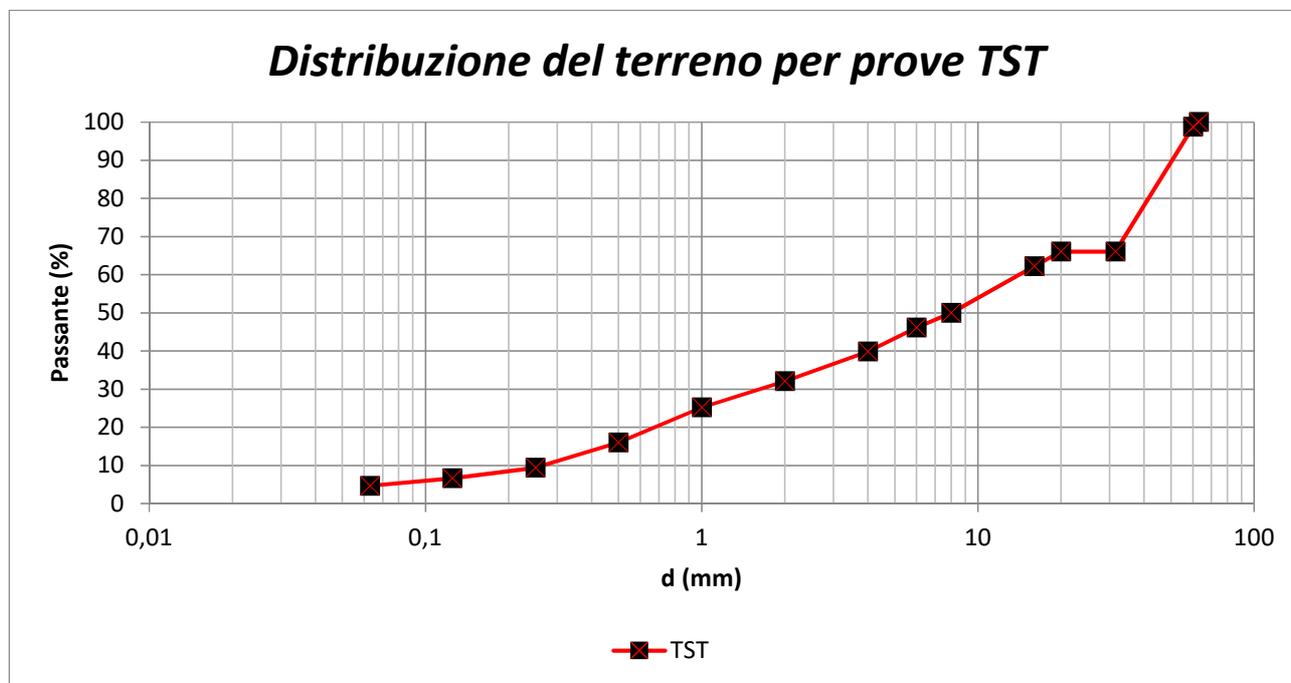


Figura 13: Distribuzione granulometrica tal quale di cava

Al fine di esaltare l'influenza della matrice fine sugli elementi più grossolani si è deciso di ricreare un terreno la cui componente fine fosse costituita dal passante al setaccio con luce di 30 mm, mentre la componente grossolana da ciottoli compresi tra 40 e 63 mm. La nuova distribuzione granulometrica ottenuta è riportata in figura 14.



*Figura 14: Distribuzione granulometrica del terreno per prove TST*

I ciottoli sono stati vagliati con setacci a maglia quadrata ISO 3310-2 da 40 e 63mm e successivamente con un setaccio a barre di luce pari a 31,5 mm secondo la normativa EN 933-1, per discriminare i ciottoli in base alla forma; si è deciso di ammettere ciottoli dalla forma prevalentemente sferica.

La presenza di elementi grossolani, caratterizzati da una dimensione molto superiore alle altre due, avrebbe costituito un problema, in quanto essi hanno un comportamento differente rispetto agli elementi sferici nell'interazione con la matrice fine.

Senza considerare il fattore di forma come elemento discriminante per la selezione dei ciottoli si sarebbero ottenuti risultati affetti da incertezza superiori.

## 5.2 Prove di slump

Le prove di slump sono state effettuate su campioni da 20 kg costituiti solamente da materiale fine, vagliato a 30 mm, e hanno permesso dopo una serie di prove, di ricavare i valori dei parametri del condizionamento che forniscono al materiale il comportamento ottimale per quanto riguarda l'applicazione della pressione al fronte e la facilità nell'estrazione con la coclea e nel trasporto sui nastri trasportatori. I risultati delle prove di slump sono di tipo qualitativo, di conseguenza è stato necessario interpretarle con una tabella comparativa sviluppata dal TUSC (Laboratorio gallerie e opere in sotterraneo) del Politecnico di Torino, che viene di seguito riportata (fig. 15). La tabella presenta alcune immagini rappresentative del comportamento del materiale condizionato, al variare del FIR e dell'acqua totale espressa in percentuale sul peso secco del campione. Grazie alla tabella, si può associare visivamente il comportamento del campione analizzato a uno di quelli descritti in tabella.

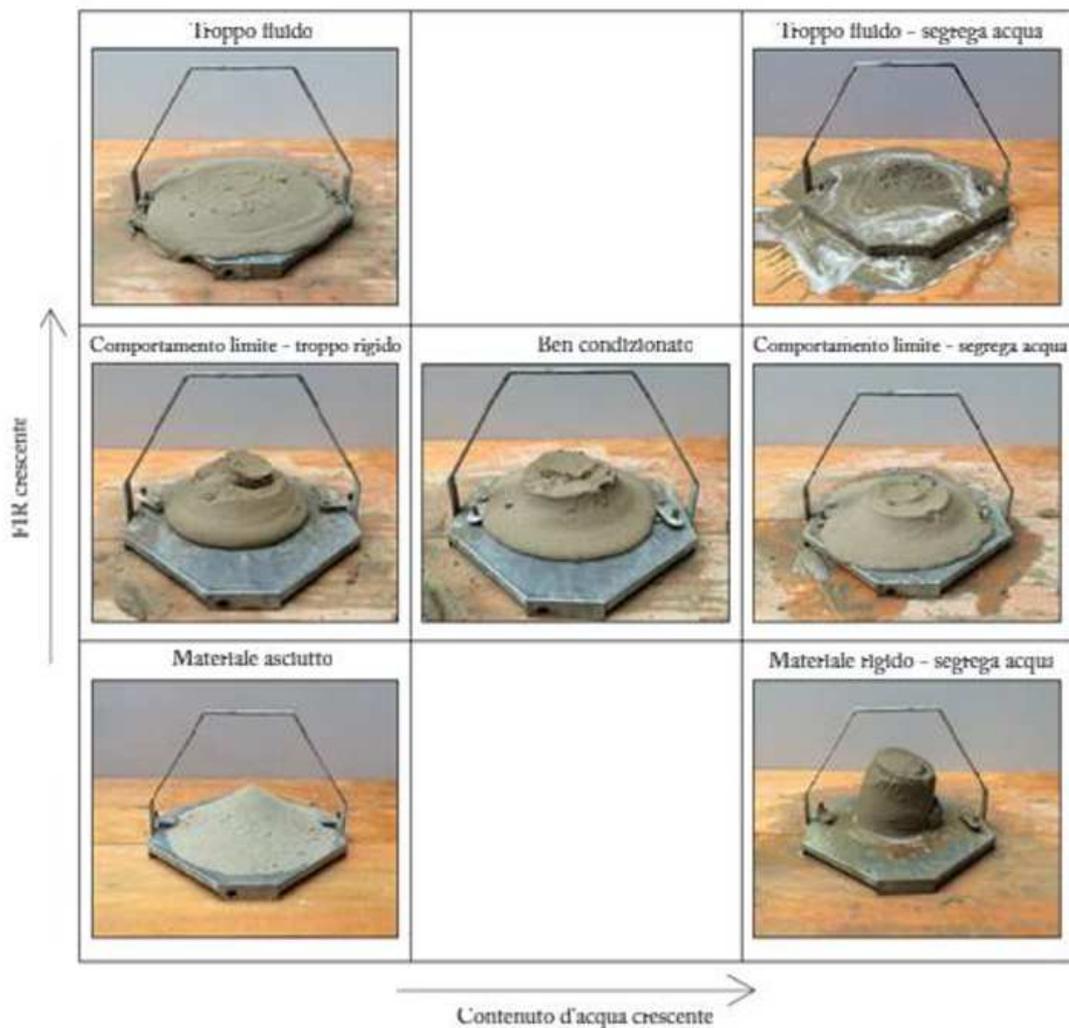


Figura 15: Tabella comparativa per Slump Test

## Valutazione del condizionamento per lo scavo con EPB in terreni con presenza di ciottoli

Le prove di slump sono state condotte a partire da valori di FIR, FER; contenuto d'acqua totale e concentrazione di primo tentativo e si sono poi variati i parametri in modo da raggiungere la condizione ottimale del materiale.

La procedura seguita nelle prove è la seguente:

1. Si posiziona il campione, pari a 20 kg di materiale, nel dispositivo di miscelazione, che è costituito da un mixer per calcestruzzi standard, con capacità pari 0.25 m<sup>3</sup>.
2. Si genera la schiuma, con il FER definito a priori.
3. All'interno del mixer si aggiungono la giusta dose di schiuma secondo il FIR previsto e l'acqua al campione, per poi miscelare.
4. Il materiale che si ottiene a seguito della miscelazione viene rovesciato in un cono di Abrams standard (UNI EN 12350-2:2009), il quale viene immediatamente sollevato.
5. Si misura quindi lo slump o abbassamento al cono e si osservano le caratteristiche del materiale ottenuto rispetto ai comportamenti presenti nella tabella di riferimento.

Di seguito sono riportati gli slump test effettuati in ordine.

### 5.2.1 Prova n°1

C[%]	W <sub>nat</sub> [%]	W <sub>add</sub> [%]	FIR[%]	FER[-]	SLUMP [cm]	Foto
1,1	7,5	5,5	30	20	23	
<b>Note</b>						
Il comportamento del materiale risulta troppo liquido, si nota uno spandimento eccessivo sul piatto e si ha la segregazione di acqua e schiuma dall'impasto.						

Tabella 2: Slump Test n°1

Sulla base del risultato del primo test si è proceduto con la riduzione di un punto percentuale di acqua e si è ripetuta la prova.

5.2.2 Prova n°2

C[%]	W <sub>nat</sub> [%]	W <sub>add</sub> [%]	FIR[%]	FER[-]	SLUMP [cm]	Foto
1,1	7,5	4,5	30	20	19	
<b>Note</b>						
Il comportamento del materiale risulta buono, la consistenza è pastosa e la plasticità del materiale è abbastanza corretta; si ha ancora un leggero eccesso di acqua						

Tabella 3: Slump test n°2

Nella prova successiva si è deciso di ridurre ulteriormente l'acqua di un punto percentuale e si è eseguito nuovamente il test.

5.2.3 Prova n°3

C[%]	W <sub>nat</sub> [%]	W <sub>add</sub> [%]	FIR[%]	FER[-]	SLUMP [cm]	Foto
1,1	7,5	3,5	40	20	16	
<b>Note</b>						
Il comportamento è buono, si notano una buona plasticità e una buona consistenza.						

Tabella 4: Slump Test n°3

Sebbene la prova n°3 abbia dato un risultato soddisfacente, si prova nel test successivo ad aumentare il FIR da 30% a 40% in modo da verificare se l'aggiunta di schiuma migliora ulteriormente il comportamento del materiale.

5.2.4 Prova n°4

C[%]	W <sub>nat</sub> [%]	W <sub>add</sub> [%]	FIR[%]	FER[-]	SLUMP [cm]	Foto
1,1	7,5	3,5	40	20	21	
<b>Note</b>						
Il comportamento è buono, si nota però un eccesso nella schiuma, che tende a segregare.						

Tabella 5: Slump Test n°4

In seguito alla prova n°4, si è ritenuto che tra le prove effettuate, la prova n°3 abbia fornito il materiale con le caratteristiche migliori, per quanto riguarda la capacità di applicare correttamente la pressione e di essere agevolmente trasportato dalla coclea e dai nastri.

Tale prova ha fornito quindi i valori ottimali del condizionamento per il materiale in analisi e non è stato necessario effettuare prove di slump successive alla n°4.

### 5.3 Prove di semivita

Per valutare la stabilità della schiuma prodotta, utilizzata per il condizionamento, si è deciso di effettuare una serie di prove di semivita.

#### 5.3.1 Generatore di schiuma

Il generatore di schiuma usato è stato prodotto dalla SPOILMASTER LIMITED, Berwick-upon-Tweed (UK), permette di controllare sia la portata di acqua (portata massima di 15 [l/min]), sia della portata di aria (portata massima di 150 [n.l/min]), nonché il dosaggio dell'agente schiumogeno. In figura è riportato lo schema del processo di generazione della schiuma; tale schema è simile a quello utilizzato nelle macchine da scavo ed è quindi rappresentativo del caso reale.

Dopo aver impostato i parametri di funzionamento del generatore, a meno di oscillazioni modeste, è possibile ottenere campioni regolari di schiuma con il tasso di espansione (FER) definito a priori. Al fine di ottimizzare la qualità della ricerca, prima dell'esecuzione di ogni set di prove viene eseguito un controllo del FER della schiuma.



*Figura 16: Generatore di schiuma*

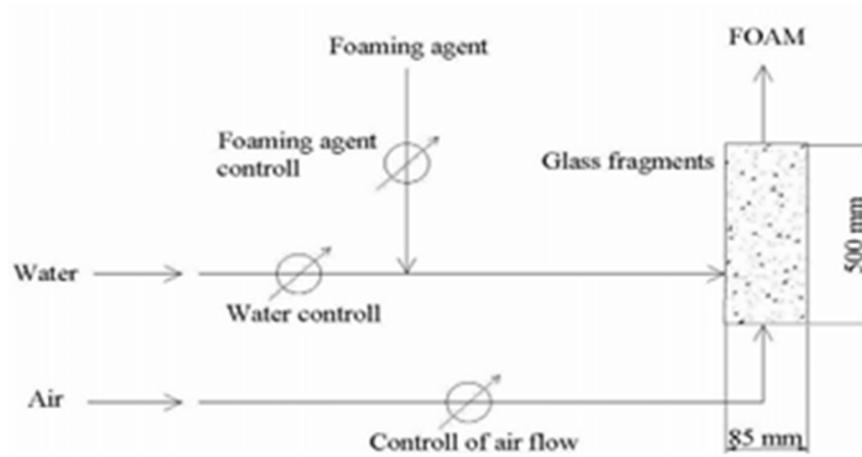


Figura 17: Rappresentazione del generatore di schiuma

### 5.3.2 Determinazione del tempo di semivita

La procedura necessaria alla determinazione del tempo di semivita ( $t_{50}$ ) è definita dalle linee guida EFNARC (2005) e si sviluppa nei seguenti passaggi:

1. Inizialmente si imposta una portata di liquido in ingresso al generatore di schiuma, poi si aggiunge l'aria in una certa portata e pressione in modo da produrre la schiuma.
2. Si produce schiuma per qualche minuto e si preleva un campione in un contenitore di volume e peso noti.
3. Si prelevano 80 g di schiuma, quantità che costituisce il campione per la prova, utilizzando un contenitore dal quale fondo il liquido può essere spillato.
4. Si determina il volume di liquido generatore come differenza tra il peso del campione e il peso del contenitore vuoto.
5. Mediante un cronometro si misurano i tempi, a intervalli di volume costanti, impiegati dal liquido a separarsi dalla schiuma e a fluire nel contenitore sottostante.
6. Si costruisce il grafico del tempo di drenaggio del liquido in relazione alla percentuale di volume drenato.

Il tempo di semivita corrisponde alla perdita da parte della schiuma del 50% del fluido generatore, occorre quindi che nel recipiente di raccolta si pesino 40 g di liquido.

Per completezza si sono effettuate 3 prove sulla stessa schiuma; i risultati sono di seguito riportati in tabella.

<b>Prova</b>	<b>FER</b>	<b>C (%)</b>	<b><math>t_{semivita}</math> (s)</b>
1	20	1.1	371
2	20	1.1	380
3	20	1.1	385

Tabella 6: Prove di semivita

La media dei valori di semivita ottenuti è pari a 378,6 secondi.

## 5.4 Tilt Sliding Test

Durante la campagna di condizionamento di un terreno con presenza di elementi grossolani, dopo aver individuato i parametri che forniscono le caratteristiche migliori al materiale di scavo, in termini di impermeabilità e capacità di applicare la pressione al fronte, è necessario valutare se il materiale ottenuto con il condizionamento ottimale è anche in grado di trasportare correttamente i ciottoli presenti.

Nello scavo con TBM di tipo EPB, il materiale asportato dal fronte dagli utensili di scavo si accumula in camera di scavo e viene rimescolato dagli agitatori presenti nella camera stessa; nel caso in cui siano presenti elementi grossolani questi tendono, se il condizionamento non è corretto, a segregare sul fondo della camera causando una non uniformità nell'applicazione della pressione e rendendo l'estrazione del materiale attraverso la coclea molto difficile.

Al fine di simulare il comportamento della massa costituita da ciottoli e materiale fine all'interno della camera di scavo, al Politecnico di Torino, nel laboratorio TUSC (Tunnelling and underground construction center) è stato costruito un prototipo che permette di creare una situazione di tipo dinamico in cui il comportamento del materiale viene osservato e analizzato .

### 5.4.1 La prova

Il prototipo utilizzato per effettuare le prove è costituito da un piano inclinabile, da un angolo di 20°, fino a 35°; tale piano è in legno ed ha una larghezza di 800 mm e una lunghezza di 1500 mm, su di esso sono state installate delle sponde di altezza pari a 100 mm che confinano il materiale durante la prova. Il piano di base e le sponde, per ridurre l'attrito tra la superficie di scivolamento e il materiale del campione, sono state rivestite in alluminio, e le sponde divergono con angolo pari a 5% in modo da influire in maniera minima sul flusso di materiale durante la prova. Ad un metro dalla base del piano inferiore è stata installata trasversalmente una sponda removibile, che garantisce il contenimento del materiale condizionato mentre viene sollevato fino all'angolo di 20°, inclinazione da cui ha inizio la prova.

Di seguito si riporta uno schema del prototipo con le quote principali (fig.18,19)

Valutazione del condizionamento per lo scavo con EPB in terreni con presenza di ciottoli

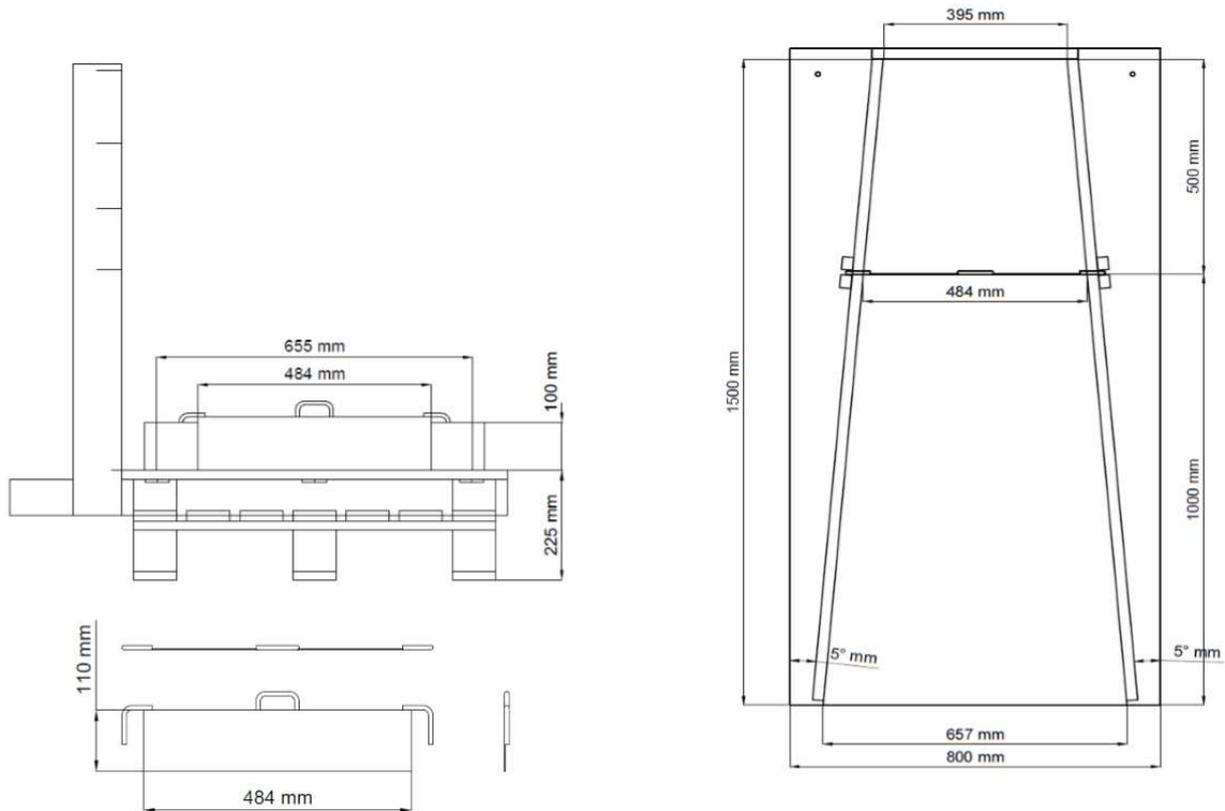


Figura 18: Prototipo per Tilt sliding test, vista dall'alto (dx) e frontale (sx)

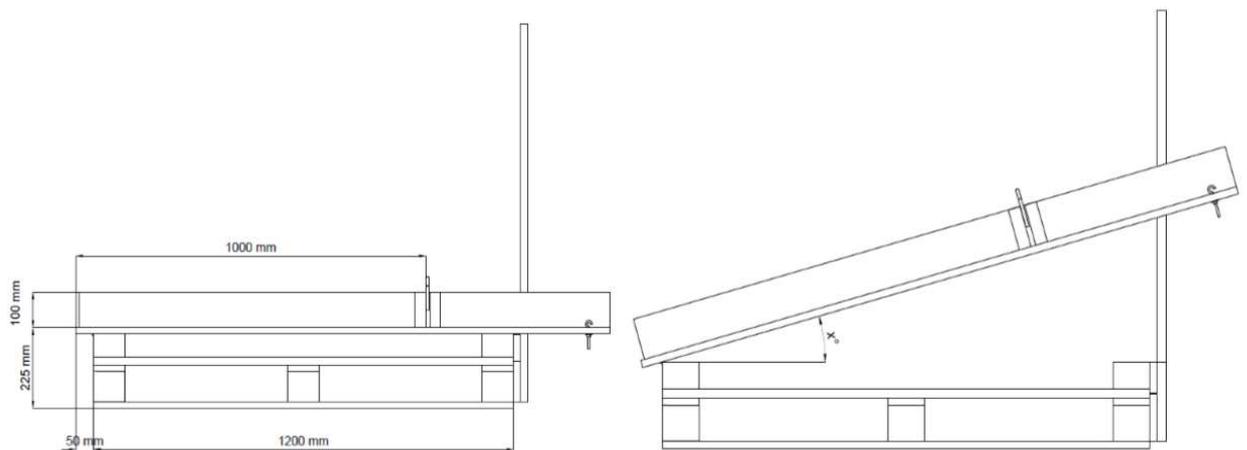


Figura 19: Prototipo per prova TST, vista laterale con piano orizzontale e inclinato (Carigi,2017)

Il campione di terreno condizionato viene posto nello spazio delimitato dalla sponda trasversale e dalla testa dello scivolo, che può contenere  $21880 \text{ cm}^3$  di materiale.

Il piano di base della struttura è incernierato ad un elemento di altezza pari a 207 mm e la cerniera si trova a 500 mm dalla fine del piano in modo da avere una parte di scivolo al di fuori della base d'appoggio ed avere una raccolta del materiale più agevole durante la prova.

L'altezza del piano di base dello scivolo è stata scelta in funzione della vasca di raccolta utilizzata per le prove in laboratorio. Per permettere l'inclinazione dello scivolo durante la prova, è stata fissata una catena alla testa dello scivolo, la quale viene collegata ad una puleggia ancorata ad un punto fisso sul soffitto. Tale sistema permette di inclinare manualmente lo scivolo e per visualizzare l'angolo raggiunto, è stata fissata un'asta graduata in legno con indicati i valori di 20°, 25°, 30°, 35° caratteristici della prova.

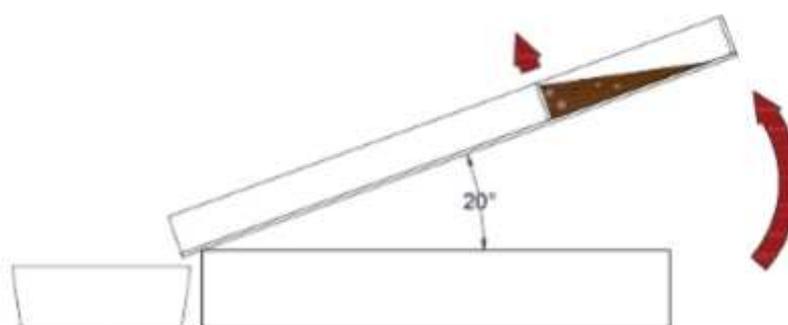
Di seguito si riporta schematicamente la procedura della prova, suddivisa nelle seguenti fasi:

1. Si versa il campione di materiale condizionato nell'apposito alloggiamento in testa allo scivolo.



*Figura 20: Introduzione del campione nell'alloggiamento in testa allo scivolo (Carigi,2017)*

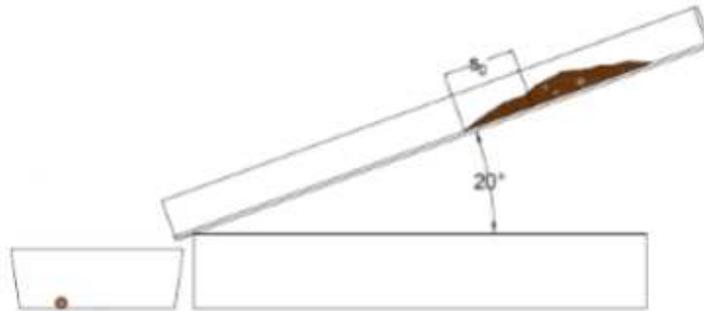
2. Si porta lo scivolo all'inclinazione di 20° e si solleva la sponda trasversale in modo da permettere al materiale di fluire sullo scivolo.



*Figura 21: Sollevamento del setto dopo sollevamento scivolo a 20°(Carigi,2017)*

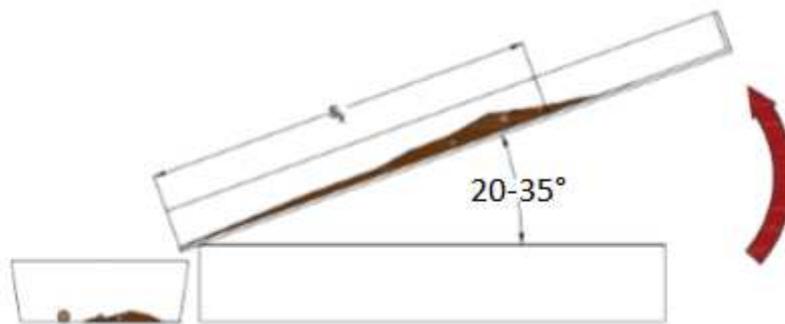
*Valutazione del condizionamento per lo scavo con EPB in terreni con presenza di ciottoli*

3. Il materiale fluisce sullo scivolo e viene raccolto nella vasca alla base dello scivolo; per ogni inclinazione si annotano i pesi del materiale fine e dei ciottoli in vasca.



*Figura 22: Inizio prova (Carigi,2017)*

4. Quando il materiale all'inclinazione di 20° si stabilizza, si procede con inclinando lo scivolo prima a 25°, poi a 30° e infine a 35°.



*Figura 23: Transizione scivolo 20°-35° (Carigi,2017)*

5. Quando il materiale all'inclinazione di 35° risulta stabile, si aggiunge al materiale nella vasca di raccolta, il materiale rimasto sullo scivolo a fine prova, in modo da ricavare i totali di materiale fine e ciottoli.

#### 5.4.2 Interpretazione delle prove

Durante la campagna di condizionamento, per verificare il comportamento del campione di materiale costituito da materiale fine e ciottoli, si sono effettuate una serie prove, in modo da osservare il comportamento del materiale in funzione delle variazioni dei parametri di condizionamento. In ogni test si sono pesate le quantità di ciottoli e materiale fine presenti in vasca di raccolta per ognuna delle inclinazioni dello scivolo, si sono quindi poste su un grafico le curve cumulate relative alla percentuale di materiale fine e ai ciottoli presenti in vasca di raccolta alle diverse inclinazioni.

Per interpretare le prove, si sono ipotizzati dei comportamenti limite che può manifestare il campione, in modo da rendere più immediata l'associazione dei risultati di una prova ad un determinato comportamento del materiale. Dal momento che i dati a disposizione da letteratura non permettevano di fare ipotesi articolate si è deciso di considerare come comportamento ideale quello più semplice, che prevede la linearità tra l'aumento di inclinazione e la percentuale di materiale in vasca.

Di seguito sono descritti i principali casi limite che possono verificarsi in una prova TST.

5.4.2.1 *Comportamento lineare*

Il comportamento che si ipotizza come ideale del materiale nella prova, dovrebbe restituire nella vasca, per ogni angolo dello scivolo, la stessa distribuzione granulometrica del campione analizzato, in quanto la matrice fine e i ciottoli in questo caso scivolano in maniera solidale nella vasca di raccolta. I grafici che si ottengono nel caso ideale sono riportati in figura 24 e 25 e si nota come la percentuale di ciottoli e matrice fine in vasca cresce linearmente in funzione dell'inclinazione del piano dello scivolo.

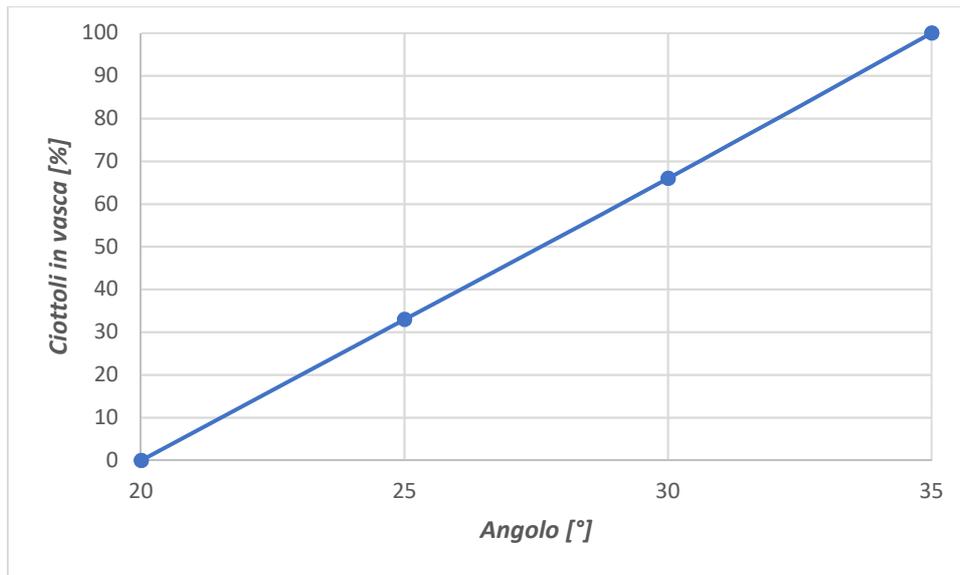


Figura 24: *Comportamento lineare ciottoli*

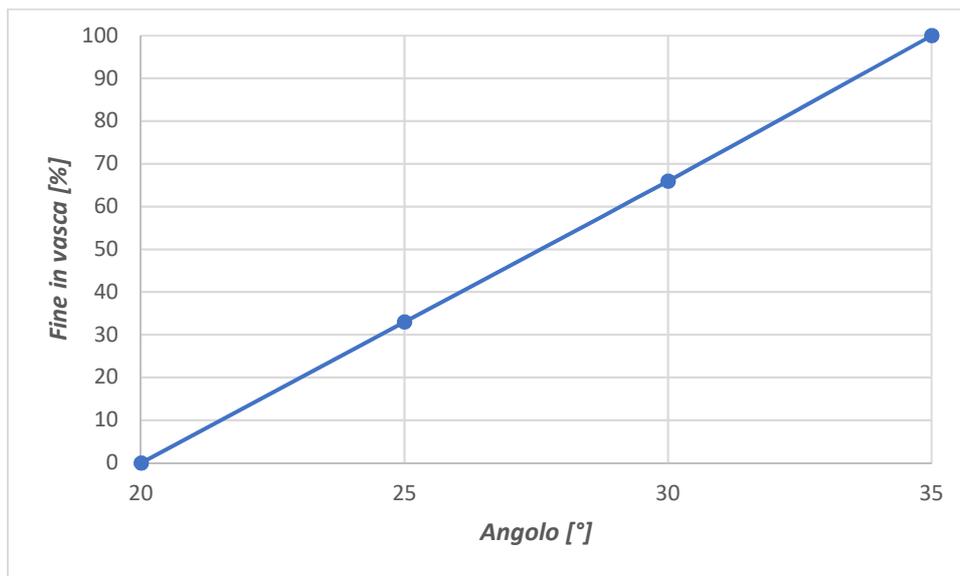


Figura 25: *Comportamento lineare fine*

#### 5.4.2.2 Comportamento disomogeneo

Se il materiale in vasca di raccolta non ha granulometria pari a quella del campione, significa che la matrice fine e i ciottoli non si comportano come un corpo unico, si muovono in maniera disomogenea. Tale comportamento può essere dovuto ad un eccesso di acqua o schiuma nel condizionamento, che rendono il materiale eccessivamente fluido; in questo caso la matrice fine non riesce a trascinare con sé i ciottoli che tendono quindi a separarsi dalla pasta.

I grafici caratteristici di un comportamento non omogeneo della massa di terreno condizionato sullo scivolo sono di seguito riportati in figura 26 e figura 27.

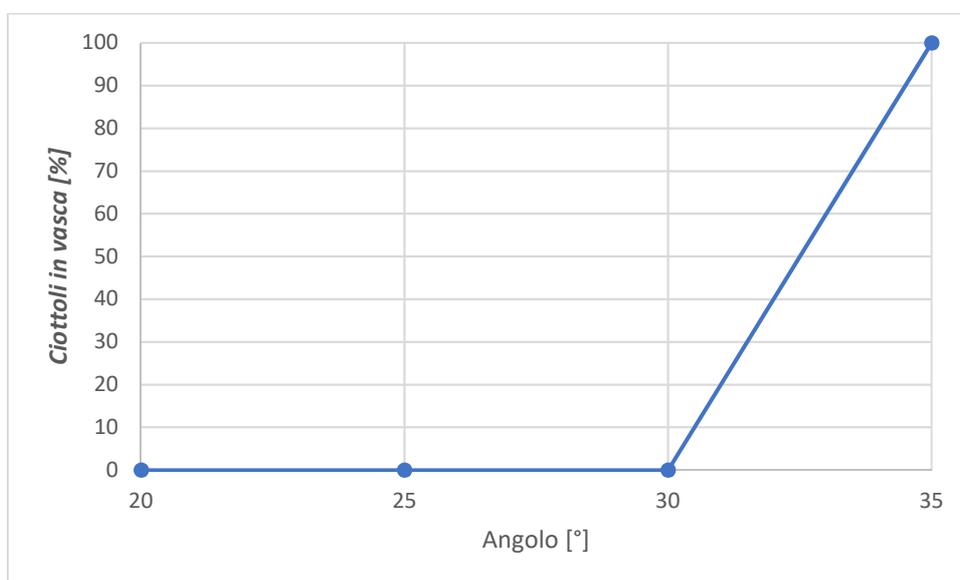


Figura 26: Comportamento disomogeneo ciottoli tra 30° e 35°

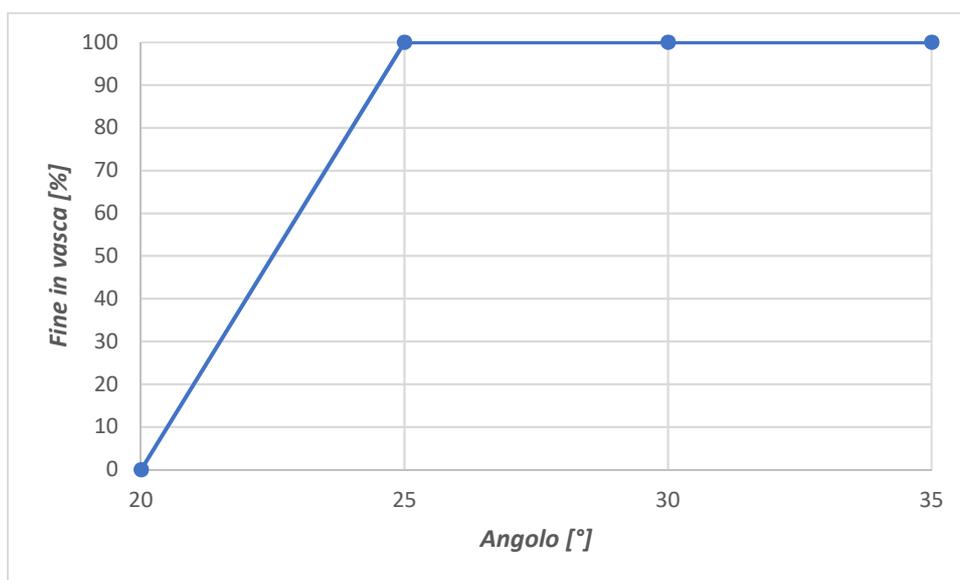


Figura 27: Comportamento disomogeneo fine tra 20° e 25°

## Valutazione del condizionamento per lo scavo con EPB in terreni con presenza di ciottoli

In figura 26 e 27 si nota come la totalità della componente fine si trovi nella vasca di raccolta già a 25° mentre i ciottoli rimangono sullo scivolo e arrivano nella vasca solo ad inclinazioni superiori ai 25°.

Si può inoltre presentare il caso in cui siano i ciottoli ad arrivare nella vasca prima del fine; in questo caso i grafici caratteristici risultano i seguenti ( figura 28 e 29 )

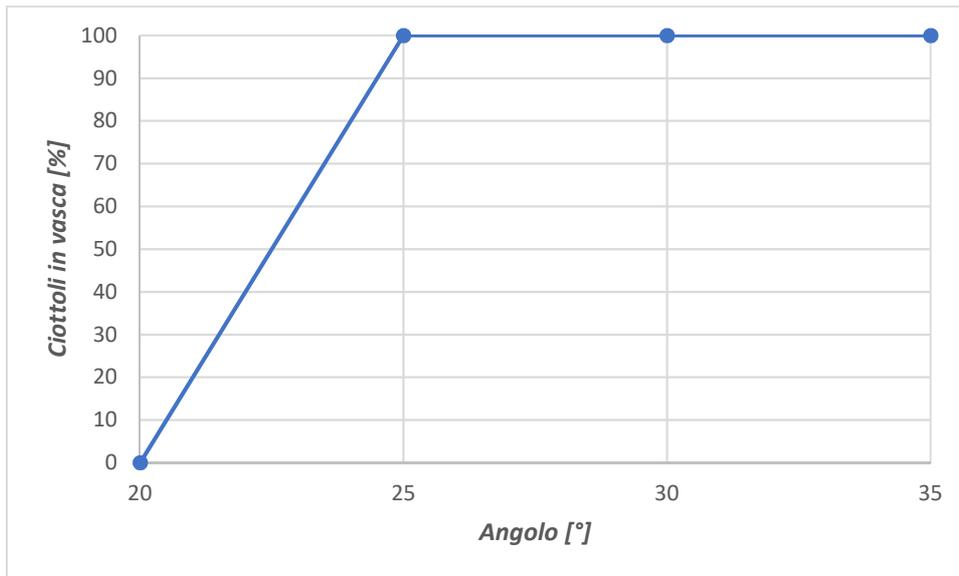


Figura 28: Comportamento disomogeneo ciottoli tra 20° e 25°

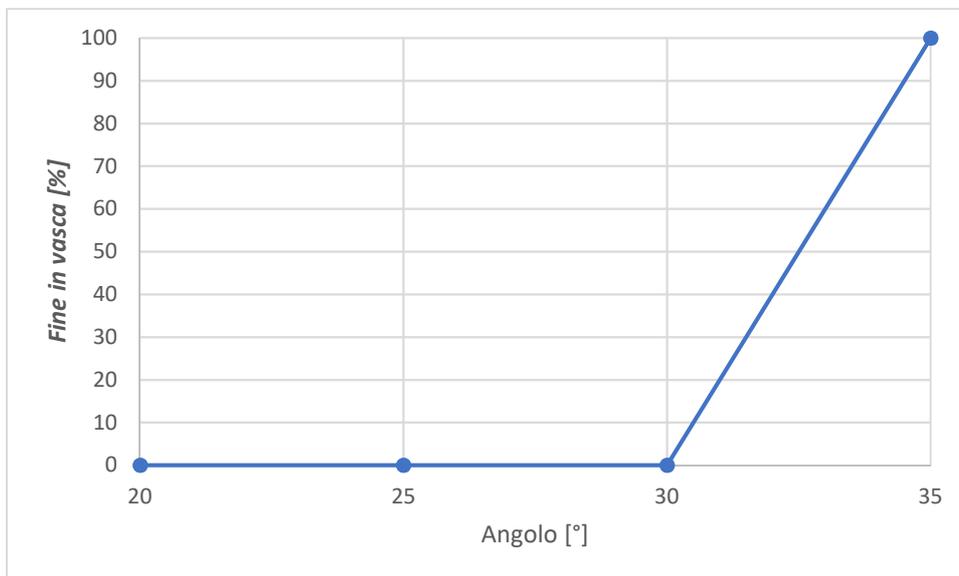


Figura 29: Comportamento disomogeneo fine tra 30° e 35°

#### 5.4.2.3 Comportamento rigido

Nel caso in cui il condizionamento non sia sufficiente a garantire una buona plasticità e pastosità al terreno con i ciottoli, può verificarsi il movimento di gran parte del campione in un unico movimento in cui la massa del campione trasla rigidamente sullo scivolo per poi finire nella vasca di raccolta.

I grafici caratteristici di questa condizione denotano un movimento uniforme e solidale del campione, anche se tale comportamento è indesiderato in fase di scavo in quanto in assenza di sufficiente acqua o schiuma, gli attriti impedirebbero un corretto funzionamento della macchina e l'usura degli utensili sarebbe eccessiva.

Nei due grafici in figura 30, 31 si hanno due esempi che rappresentano comportamenti di tipo rigido.

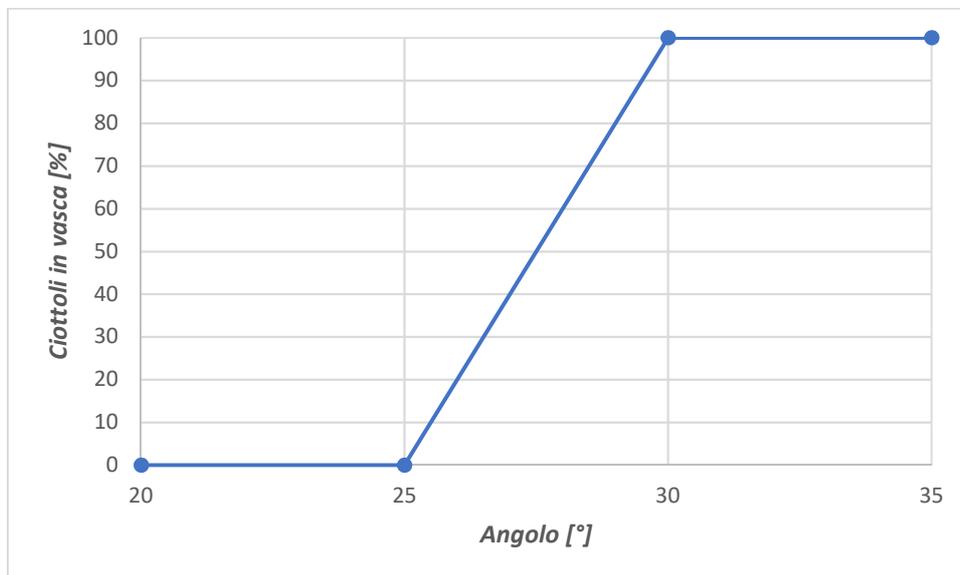


Figura 30: Comportamento rigido ciottoli

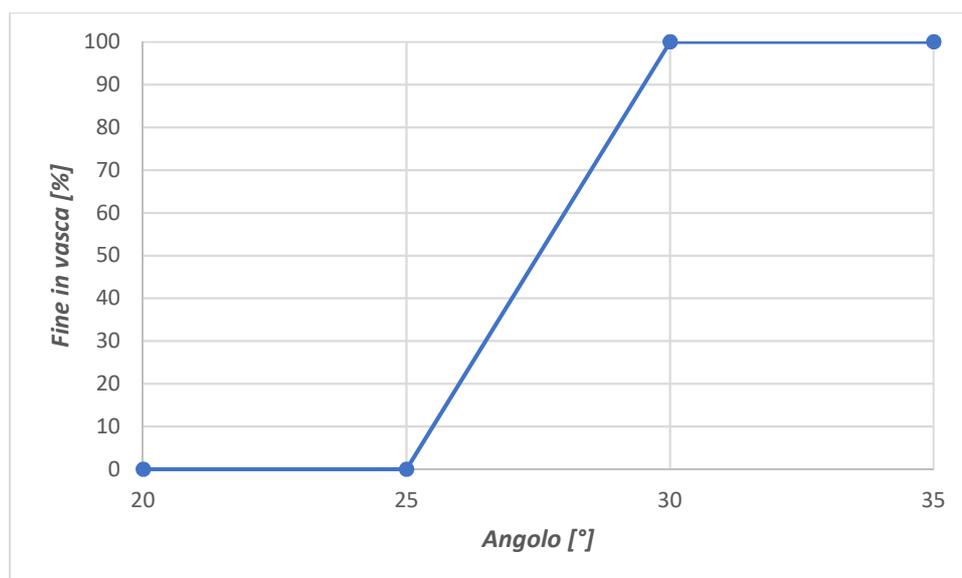


Figura 31: Comportamento rigido fine

I comportamenti sopra descritti rappresentano casi limite, nel corso delle prove però si incontrano situazioni in cui i risultati non sono ascrivibili con certezza ad una delle classi elencate, è quindi fondamentale l'analisi dei dati e l'osservazione dell'evoluzione della prova da parte dell'operatore.

Le prove TST sono state svolte su campioni costituiti da 20 kg di matrice fine, a cui sono stati aggiunti dopo la miscelazione del fine con acqua e schiume, 10 kg di ciottoli precedentemente selezionati con la vagliatura.

Le quantità di acqua e schiuma sono sempre riferite alla componente fine del campione, in quanto gli elementi grossolani risultano ininfluenti da questo punto di vista.

La sequenza scelta per effettuare i test è stata definita a partire dai valori ottimali di condizionamento stabiliti con le prove di slump, successivamente si sono effettuate serie di prove variando un parametro per volta e successivamente si sono combinate variazioni di due parametri.

I test successivi al primo, dove il condizionamento era quello ottimale, si sono effettuati osservando il comportamento del materiale sullo scivolo e cercando di modificare i parametri in modo da ottenere un comportamento migliore. Di seguito sono riportate le prove effettuate suddivise per valori di FER; i test condotti sono stati 20 e le prove effettuate sono suddivise in base al FER scelto nella prova.

La concentrazione del tensioattivo nel flusso in ingresso al generatore di schiuma è stata fissata all'1,1 (%) ed è rimasta invariata nel corso delle prove.

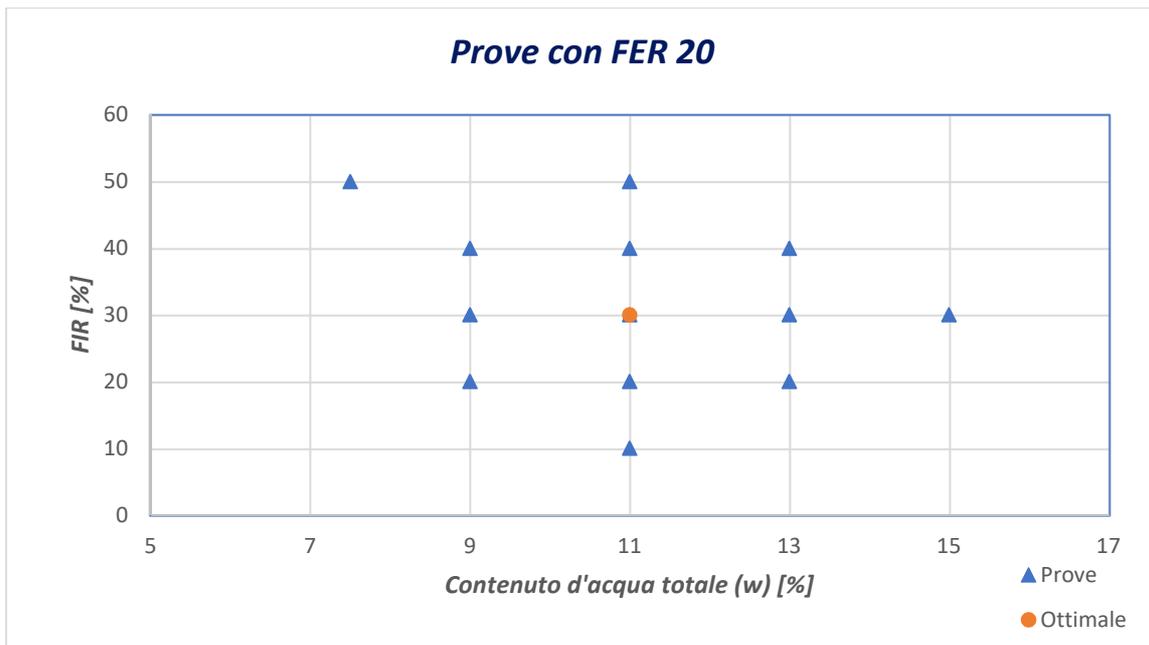


Tabella 7: Prove con FER 20

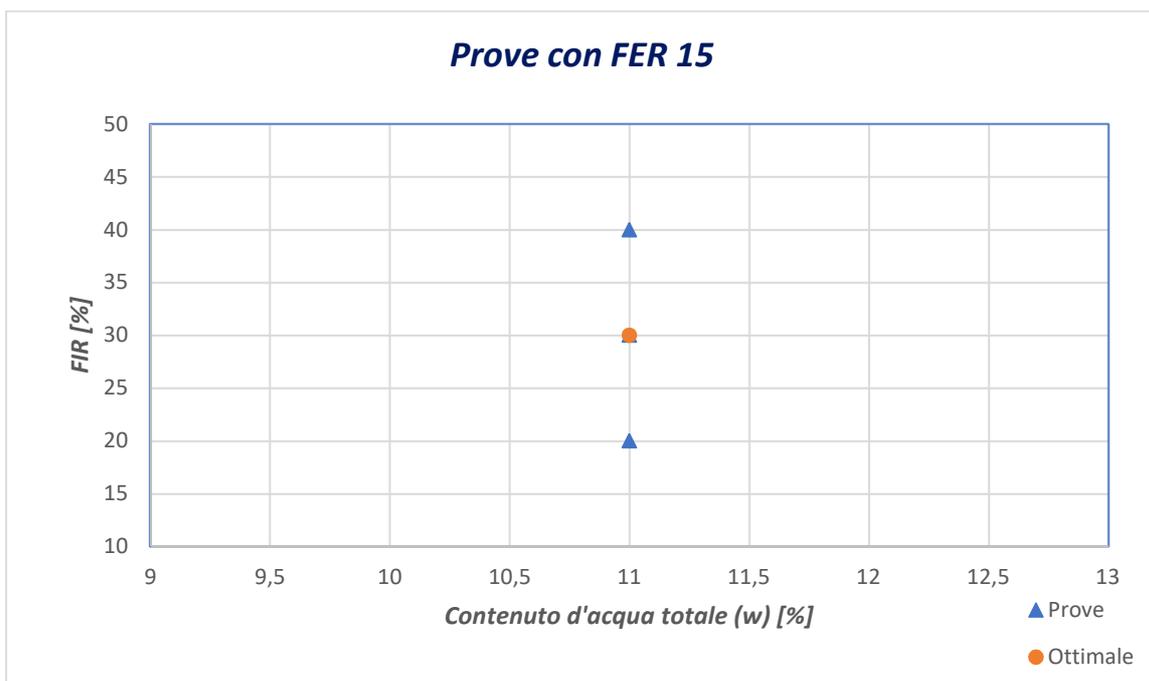


Tabella 8: Prove con FER 15

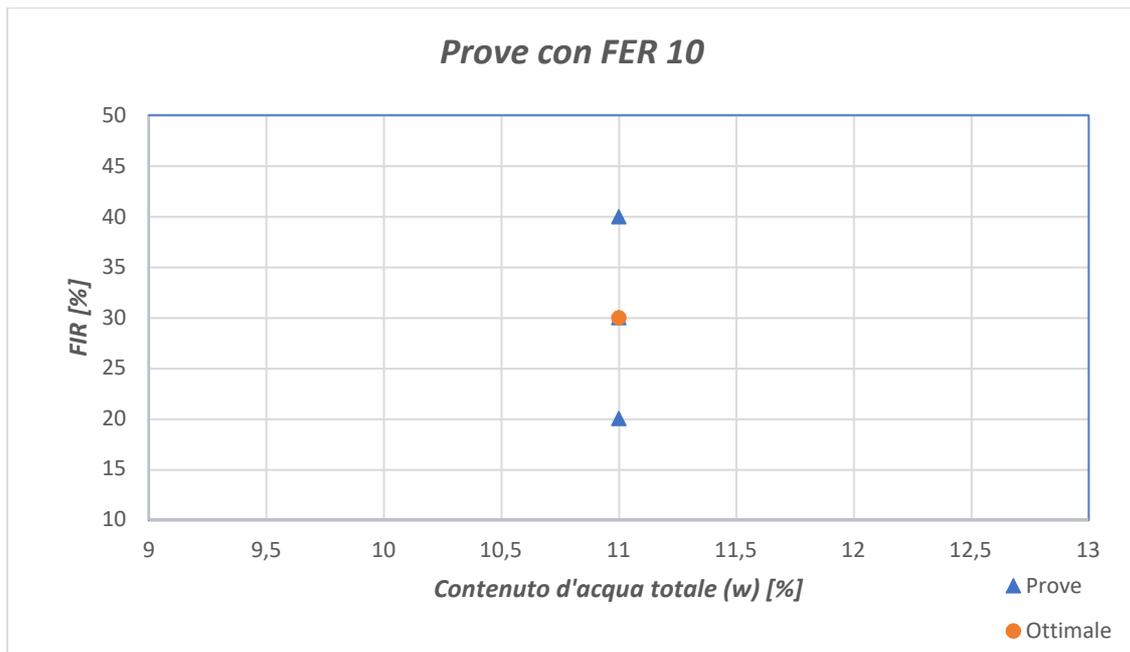


Tabella 9: Prove con FER 10

Di seguito si riporta una tabella riassuntiva contenente tutte le prove svolte.

<b>ID. Prova</b>	<b><math>W_{TOT}</math> (%)</b>	<b>FIR (%)</b>	<b>FER</b>	<b>C (%)</b>
1	11	30	20	1,1
2	13	30	20	1,1
3	15	30	20	1,1
4	9	30	20	1,1
5	11	0	0	0
6	11	50	20	1,1
7	11	10	20	1,1
8	11	20	20	1,1
9	11	40	20	1,1
10	9	0	0	0
11	13	0	0	0
12	15	0	0	0
13	11	30	15	1,1
14	11	30	10	1,1
15	11	20	10	1,1
16	11	40	10	1,1
17	11	20	15	1,1
18	11	40	15	1,1
19	13	20	20	1,1
20	9	20	20	1,1

Tabella 10: Prove TST eseguite

#### 5.4.3 Risultati delle prove

La campagna di Tilt Sliding Test viene di seguito descritta, riportando uno schema riassuntivo dei parametri di condizionamento adottati e una tabella con le foto di ogni prova, seguita dall'interpretazione delle immagini. Per ogni prova si è deciso di riportare inoltre un grafico che rappresenta, alle diverse inclinazioni, la percentuale di ciottoli e materiale fine in vasca di raccolta.

*5.4.3.1 PROVA N°1*

La prima prova è stata eseguita sul terreno condizionato secondo i parametri ottimali, ottenuti con la campagna di Slump Test che sono i seguenti:

<i>C (%)</i>	<i>1,1</i>
<i>FER</i>	<i>20</i>
<i>FIR (%)</i>	<i>30</i>
<i>W<sub>tot</sub> (%)</i>	<i>11</i>

*Tabella 11: Parametri di condizionamento nella prova n°1*

I vari step della prova sono stati fotografati in modo da interpretare correttamente il comportamento del campione. Di seguito si riportano la foto del campione prima di iniziare la prova e le foto delle varie fasi del test.



*Figura 32: Campione n°1*

*Valutazione del condizionamento per lo scavo con EPB in terreni con presenza di ciottoli*



**20°:** Il materiale risulta ben condizionato, si ha un leggero scorrimento ma la matrice fine e i ciottoli rimangono solidali.



**25°:** Il materiale fine e i ciottoli si comportano come un unico elemento, non si ha separazione degli elementi grossolani dal fine e non si ha materiale in vasca di raccolta.



**30°:** Il fine e i ciottoli iniziano in piccola percentuale ad arrivare in vasca di raccolta e lo scorrimento della massa risulta uniforme; non si notano elementi grossolani separati dalla matrice fine, vi rimangono correttamente immorsati.



**35°:** Il materiale è quasi totalmente arrivato in vasca di raccolta, rimane una parte di fine e pochi elementi grossolani sullo scivolo.

## Valutazione del condizionamento per lo scavo con EPB in terreni con presenza di ciottoli

Nella tabella 12 si riportano i valori di ciottoli e fine in vasca di raccolta alle diverse inclinazioni dello scivolo, espresse prima in grammi e poi in percentuale rispetto ai totali delle due classi; si riporta inoltre in figura 33 il grafico relativo alla prima prova con le percentuali di ciottoli e fine alle diverse inclinazioni.

<b>Angolo</b>	<b>Ciottoli (g)</b>	<b>Fine (g)</b>	<b>Ciottoli (%)</b>	<b>Fine (%)</b>
20	0	0	0	0
25	0	0	0	0
30	1468	600	10,1	3,2
35	10338	10754	70,9	58,1
Totale	10338	18516	100	100

Tabella 12: Valori misurati nella prova n°1

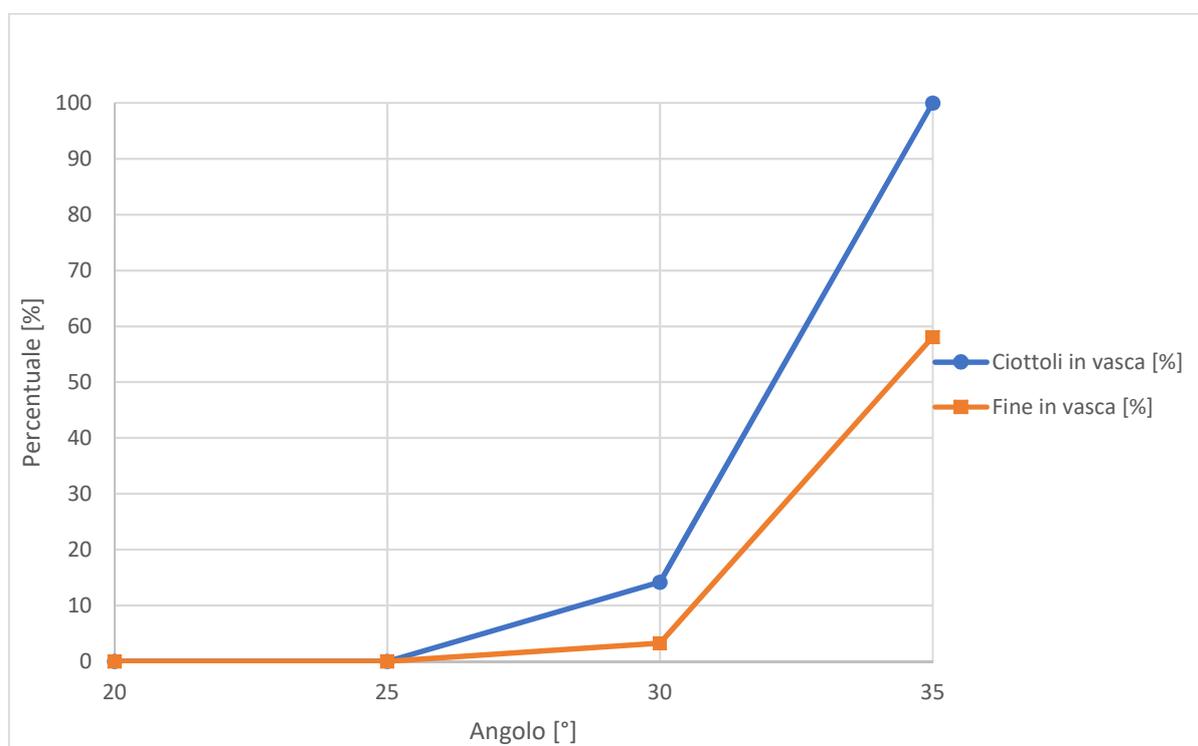


Figura 33: Percentuali in vasca di raccolta vs inclinazione scivolo prova n°2

## *Valutazione del condizionamento per lo scavo con EPB in terreni con presenza di ciottoli*

La percentuale di materiale in vasca di raccolta cresce in maniera concorde per le due classi e di conseguenza la distribuzione granulometrica del materiale in vasca risulta molto simile a quella del campione n°1. Dai valori ottenuti durante la prova, osservando il grafico, si nota come fino a 25° non si hanno ne ciottoli ne materiale fine in vasca, tra 30° e 35° inizia a scendere del materiale e a 35° si ha gran parte del campione in vasca di raccolta. L'esito della prova risulta positivo; la matrice fine e i ciottoli rimangono solidali per tutto il corso della prova, senza esibire movimenti relativi o separazione di una classe dall'altra.

### *5.4.3.2 PROVA N°2*

La prova n° 2 è stata condotta mantenendo invariati tutti i parametri di condizionamento a parte il contenuto d'acqua; i parametri risultano quindi i seguenti.

<i>C (%)</i>	<i>1,1</i>
<i>FER</i>	<i>20</i>
<i>FIR (%)</i>	<i>30</i>
<b><i>w<sub>tot</sub> (%)</i></b>	<b><i>13</i></b>

*Tabella 13: Parametri di condizionamento nella prova n°1*

Il campione n° 2 prima di iniziare la prova è riportato di seguito in figura 34.



*Figura 34: Campione n° 2*



**20°:** Il materiale fluisce sullo scivolo in maniera omogenea, si ha già a 20° uno scorrimento notevole, ma nessun elemento raggiunge la vasca.



**25°:** Iniziano ad arrivare in vasca di raccolta alcuni ciottoli e una piccola parte di fine; la matrice non è in grado di trattenere in maniera ottimale i ciottoli che tendono a scorrervi sopra.



**30°:** . arriva in vasca di raccolta circa il 50% dei ciottoli, mentre solo il 27% di matrice fine; i ciottoli sono quindi poco immorsati nel fine, che non ne influenza il movimento, tendono infatti a separarsi e ad arrivare prima in vasca di raccolta.



**35°:** La maggior parte dei ciottoli arriva in vasca di raccolta, mentre il 50% di matrice fine rimane adesa allo scivolo.

Di seguito in tabella 14 si riportano i valori ottenuti e in figura 35 il grafico con le percentuali delle due classi al variare dell'inclinazione dello scivolo.

Angolo	Ciottoli (g)	Fine (g)	Ciottoli (%)	Fine (%)
20	0	0	0	0
25	530	421	5,1	2,9
30	4656	4831	44,4	27,4
35	9537	8426	91,0	47,7
Totale	10475	17655	100	100

Tabella 14: Valori misurati nella prova n°2

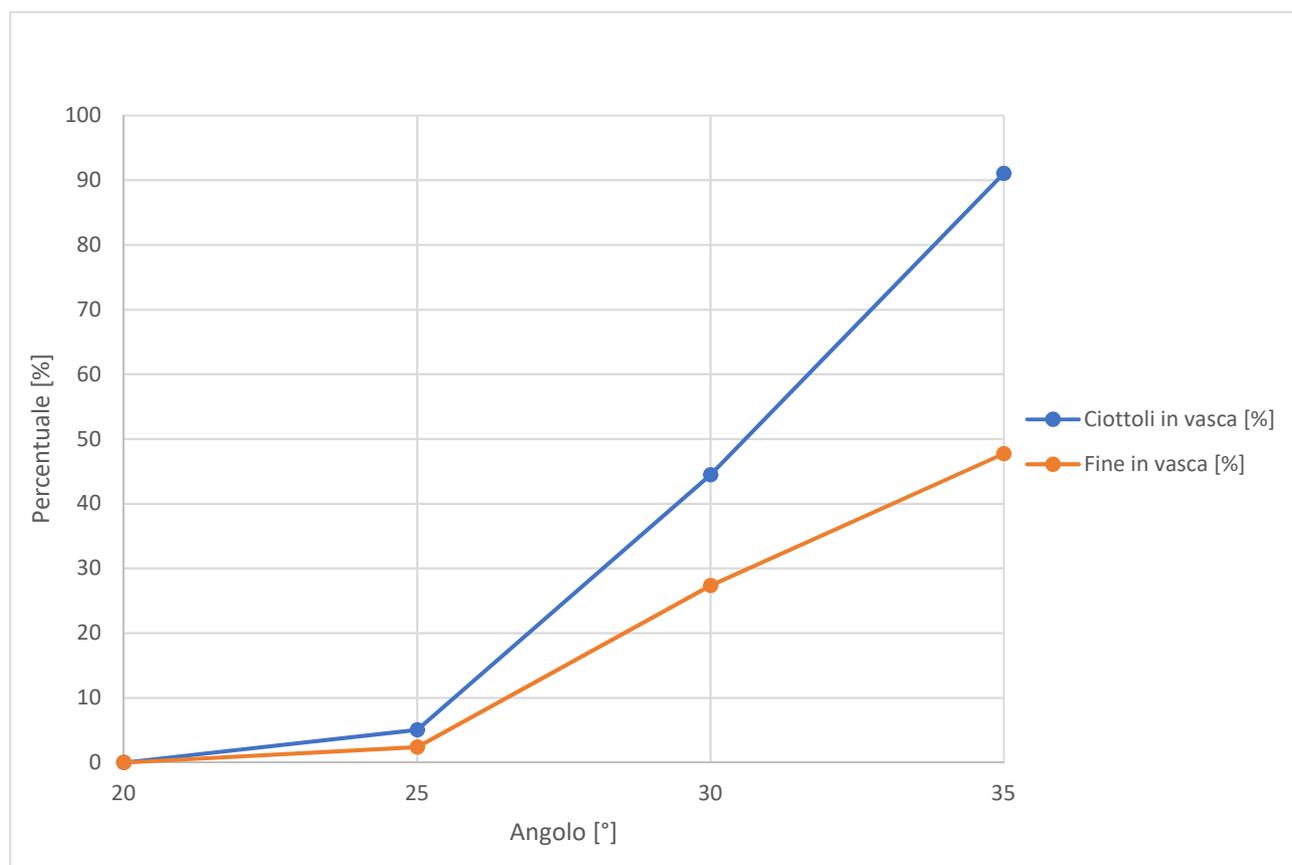


Figura 35: Percentuali in vasca di raccolta vs inclinazione scivolo prova n°3

## *Valutazione del condizionamento per lo scavo con EPB in terreni con presenza di ciottoli*

Dai risultati ottenuti e dal grafico relativo alla seconda prova, si nota come il materiale sia giunto in parte già a 25° in vasca di raccolta; a fine prova è inoltre rimasto circa il 50% della componente fine adesa allo scivolo, mentre solo il 3 % di ciottoli. Tale comportamento si discosta dall'ottimale in quanto la distribuzione granulometrica in vasca di raccolta risulta differente rispetto a quella del campione n°2.

### *5.4.3.3 PROVA N°3*

La terza prova è stata condotta variando ulteriormente il contenuto d'acqua totale. I parametri adottati sono i seguenti.

<i>C (%)</i>	<i>1,1</i>
<i>FER</i>	<i>20</i>
<i>FIR (%)</i>	<i>30</i>
<b><i>w<sub>tot</sub> (%)</i></b>	<b><i>15</i></b>

*Tabella 15: Parametri di condizionamento nella prova n°3*

Di seguito si riporta la foto del campione prima di iniziare la prova n°3.



*Figura 36: Campione n°3*

*Valutazione del condizionamento per lo scavo con EPB in terreni con presenza di ciottoli*



**20°:** Il materiale fluisce sullo scivolo fino alla vasca di raccolta, si nota una netta segregazione dei ciottoli dalla matrice fine. Il comportamento risulta eccessivamente fluido.



**25°:** buona parte dei ciottoli ha raggiunto la vasca di raccolta, rimane però gran parte del fine sullo scivolo. I ciottoli si muovono in maniera quasi indipendente dalla matrice fine.



**30°:** sullo scivolo rimane meno del 10% dei ciottoli mentre si ha ancora molto fine.



**35°:** non si notano ciottoli sullo scivolo, mentre la componente fine adesiva è abbondante.

## Valutazione del condizionamento per lo scavo con EPB in terreni con presenza di ciottoli

Di seguito in tabella 16 si riportano i valori ottenuti e in figura 37 il grafico con le percentuali delle due classi al variare dell'inclinazione dello scivolo.

Angolo	Ciottoli (g)	Fine (g)	Ciottoli(%)	Fine(%)
20	1067	1821	10,2	9,7
25	7333	7673	70,2	40,9
30	10041	10235	96,1	54,6
35	10446	11629	100	62,1
Totale	10446	18738	100	100

Tabella 16: Valori misurati nella prova n°3

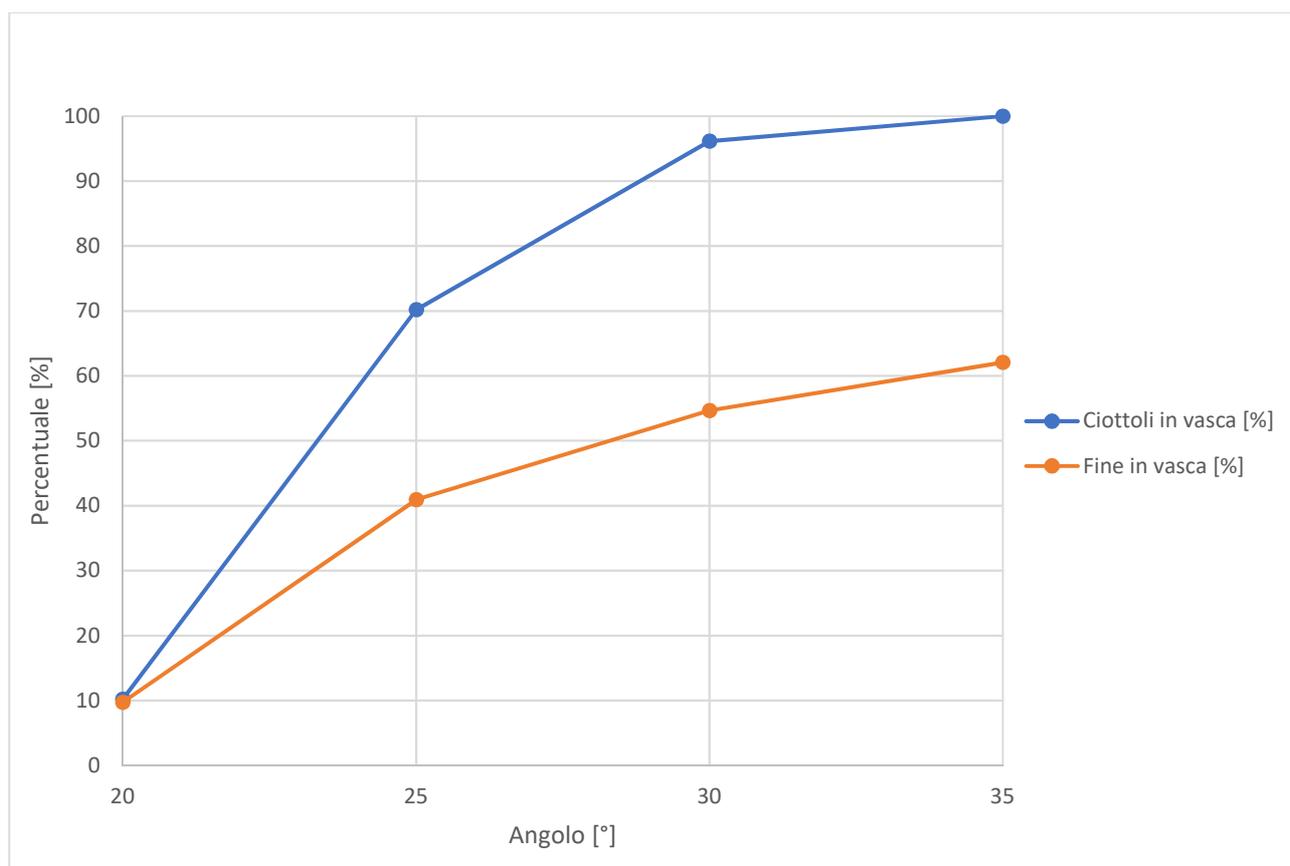


Figura 37: Percentuali in vasca di raccolta vs inclinazione scivolo prova n°3

## Valutazione del condizionamento per lo scavo con EPB in terreni con presenza di ciottoli

Dai risultati in tabella e dal grafico in figura si può notare come all'aumentare dell'acqua totale di ulteriori due punti percentuali rispetto alla prova numero 2, il materiale si mobilita sullo scivolo ad inclinazioni minori e di conseguenza arriva prima in vasca di raccolta. Anche in questo caso, come nella prova numero 2 a fine test si ha ancora una buona parte del fine adeso allo scivolo. Il campione ha mostrato nella prova un comportamento eccessivamente fluido, in cui le due classi erano completamente separate e indipendenti nel cinematismo; tale consistenza risulta quindi inadeguata per lo scavo con EPB.

### 5.4.3.4 PROVA N°4

La quarta prova è stata eseguita riducendo il contenuto d'acqua totale di due punti percentuali rispetto all'ottimale; con questo test si è voluto indagare il comportamento del campione anche diminuendo l'acqua, in modo da avere un quadro completo dell'influenza del parametro 'acqua totale' sul comportamento del materiale.

I parametri di condizionamento adottati sono stati i seguenti.

<i>C (%)</i>	<i>1,1</i>
<i>FER</i>	<i>20</i>
<i>FIR (%)</i>	<i>30</i>
<b><i>w<sub>tot</sub> (%)</i></b>	<b><i>9</i></b>

Tabella 17: Parametri di condizionamento nella prova n°4

Il campione di materiale condizionato prima di iniziare la prova è riportato di seguito in figura 38.



Figura 38: Campione n° 4

*Valutazione del condizionamento per lo scavo con EPB in terreni con presenza di ciottoli*

	<p><b>20°:</b> Il campione si mobilitato come blocco unico, risulta eccessivamente asciutto.</p>
	<p><b>25°:</b> il materiale rimane in posizione invariata rispetto a 20°.</p>
	<p><b>30°:</b> il campione è scivolato come blocco nella vasca di raccolta, rimangono solo pochi ciottoli e poco fine sullo scivolo. Tra 25° e 30° è stato superato l'angolo di attrito tra il blocco di ciottoli e fine e la superficie dello scivolo.</p>
	<p><b>35°:</b> sullo scivolo rimane poco materiale; la carenza di acqua nel condizionamento ha però limitato notevolmente il materiale adeso allo scivolo a fine prova.</p>

Di seguito in tabella 18 si riportano i valori ottenuti e in figura 39 il grafico con le percentuali delle due classi al variare dell'inclinazione dello scivolo.

Valutazione del condizionamento per lo scavo con EPB in terreni con presenza di ciottoli

Angolo	Ciottoli (g)	Fine (g)	Ciottoli (%)	Fine (%)
20	560	4	5,5	0
25	691	31	6,8	0,2
30	9817	17384	96,	88,9
35	10202	18794	100	96,1
Totale	10202	19549	100	100

Tabella 18: Valori misurati nella prova n°4

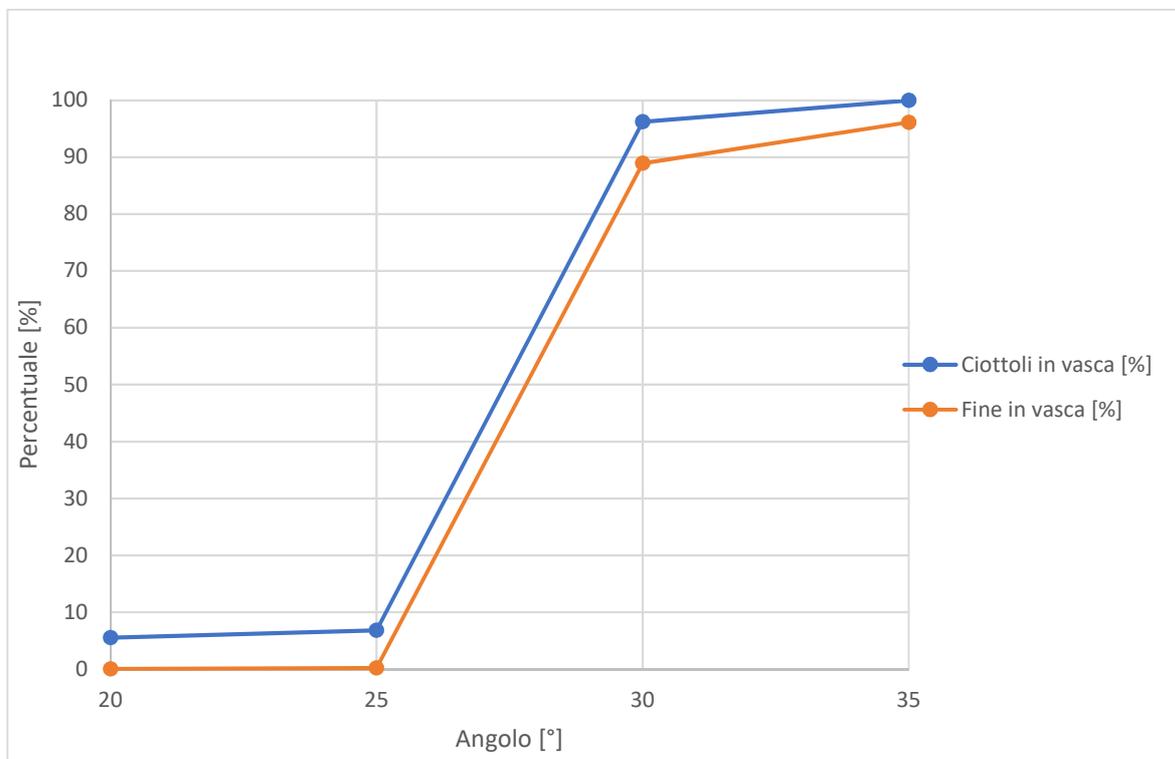


Figura 39: Percentuali in vasca di raccolta vs inclinazione scivolo prova n°4

## *Valutazione del condizionamento per lo scavo con EPB in terreni con presenza di ciottoli*

La prova ha mostrato chiaramente come la diminuzione dell'acqua totale del 2% rispetto all'ottimale conferisca al materiale un comportamento di tipo rigido; il campione si comporta come un blocco, dove ciottoli e fine sono solidali ma il movimento non avviene in maniera progressiva e plastica ma si sviluppa molto rapidamente al superamento dell'angolo d'attrito all'interfaccia tra il blocco e la superficie dello scivolo.

### *5.4.3.5 PROVA N°5*

Dopo aver valutato il comportamento dei campione al variare dell'acqua totale rispetto all'11% che rappresentava la percentuale ottimale, si è deciso di indagare il comportamento in funzione della variazione del solo FIR ( Foam Injection Ratio). Il valore ottimale per il FIR è pari al 30%.

I parametri di condizionamento adottati per la prova n°5 sono i seguenti.

<i>C (%)</i>	<i>1,1</i>
<i>FER</i>	<i>20</i>
<b><i>FIR (%)</i></b>	<b><i>0</i></b>
<i>w<sub>tot</sub> (%)</i>	<i>11</i>

*Tabella 19: Parametri di condizionamento nella prova n°5*

Di seguito in figura 40 si riporta il campione prima di iniziare la prova.



*Figura 40: Campione n° 5*

*Valutazione del condizionamento per lo scavo con EPB in terreni con presenza di ciottoli*

	<p><b>20°:</b> il campione rimane fermo sullo scivolo.</p>
	<p><b>25°:</b> non si osservano movimenti del campione.</p>
	<p><b>30°:</b> il blocco costituito da ciottoli e fine è scivolato nella vasca di raccolta, rimangono ancora alcuni ciottoli legati ad una piccola percentuale di fine.</p>
	<p><b>35°:</b> il materiale rimasto sullo scivolo rimane fermo nella posizione acquisita a 30°.</p>

Di seguito si riportano i valori misurati durante la prova in tabella 20 e di seguito si riporta il grafico in figura 41 rappresentativo dell'andamento della prova alle varie inclinazioni.

Valutazione del condizionamento per lo scavo con EPB in terreni con presenza di ciottoli

Angolo	Ciottoli [g]	Fine [g]	Ciottoli [%]	Fine [%]
20	0	0	0	0
25	0	0	0	0
30	10040	17647	97,3	96,3
35	10040	17647	97,3	96,3
Totale	10320	18322	100	100

Tabella 20: Valori misurati nella prova n°5

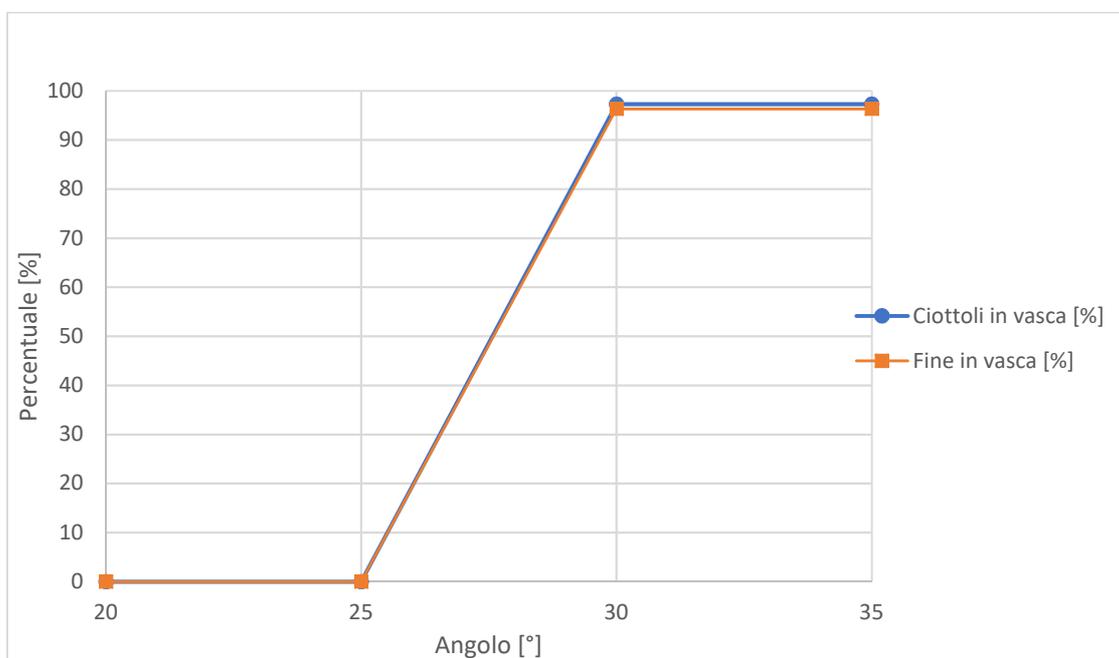


Figura 41: Percentuali in vasca di raccolta vs inclinazione scivolo prova n°6

## *Valutazione del condizionamento per lo scavo con EPB in terreni con presenza di ciottoli*

La prova è stata condotta con FIR pari a 0 % per valutare se la sola aggiunta di acqua, senza schiuma, potesse conferire al materiale le caratteristiche desiderate; il risultato però risulta insoddisfacente in quanto un materiale di questo tipo porterebbe ad attriti molto elevati in camera di scavo e per il trasporto mediante coclea.

### *5.4.3.6 PROVA N°6*

La prova n°6 è stata eseguita adottando un FIR pari al 50 %, in modo da eccedere del 20 % rispetto all'ottimale e valutare la capacità della matrice fine di trattenere e influenzare il movimento dei ciottoli all'aumentare della schiuma nel condizionamento.

I valori adottati nel condizionamento sono stati i seguenti.

<i>C (%)</i>	<i>1,1</i>
<i>FER</i>	<i>20</i>
<b><i>FIR (%)</i></b>	<b><i>50</i></b>
<i>W<sub>tot</sub> (%)</i>	<i>11</i>

*Tabella 21: Parametri di condizionamento nella prova n°6*

Il campione prima di iniziare la prova è riportato di seguito.



*Figura 42: Campione n° 6*

*Valutazione del condizionamento per lo scavo con EPB in terreni con presenza di ciottoli*



**20°:** Il materiale risulta piuttosto fluido, si inizia ad avere un cinematismo che porta una piccola percentuale di fine nella vasca di raccolta.



**25°:** il cinematismo iniziato nello step precedente prosegue, si ha una parte di fine e anche qualche ciottolo che raggiungono la vasca di raccolta.



**30°:** tra 25° e 30° si instaura un cinematismo innescato dai ciottoli che ne porta circa il 70 % in vasca di raccolta; sullo scivolo rimane gran parte del fine adesivo e alcuni ciottoli.



**35°:** sullo scivolo rimane circa il 45 % di fine adesivo, mentre i ciottoli non sono stati trattenuti e si trovano al 100 % in vasca di raccolta.

### Valutazione del condizionamento per lo scavo con EPB in terreni con presenza di ciottoli

Di seguito si riportano i valori misurati durante la prova e il grafico rappresentativo del comportamento del campione.

Angolo	Ciottoli (g)	Fine (g)	Ciottoli (%)	Fine (%)
20	0	112	0	0,6
25	1027	3545	9,7	19,6
30	8327	8547	79	47,2
35	10544	10358	100	57,2
Totale	10544	18112	100	100

Tabella 22: Valori misurati nella prova n°6

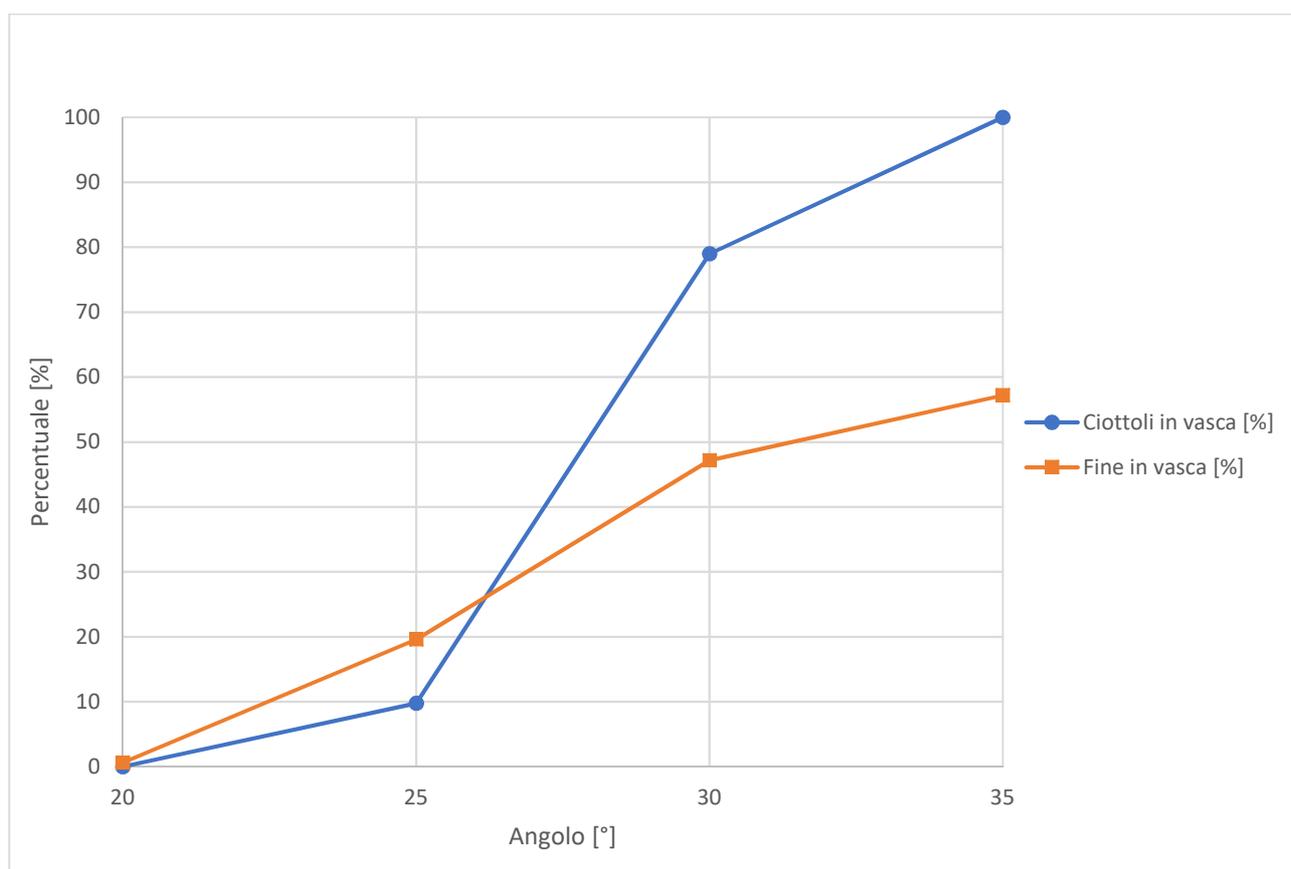


Figura 43: Percentuali in vasca di raccolta vs inclinazione scivolo prova n°6

## *Valutazione del condizionamento per lo scavo con EPB in terreni con presenza di ciottoli*

La prova n°6 mostra chiaramente come l'eccesso di schiuma non sia in grado di migliorare le caratteristiche del campione, causa invece una riduzione nella capacità del fine di trattenere gli elementi grossolani e aumenta la collosità della matrice fine che tende maggiormente ad aderire allo scivolo.

### *5.4.3.7 PROVA N°7*

La prova n°7 è stata condotta con FIR al 10%, riducendo quindi del 20% il FIR ottimale. I parametri di condizionamento sono stati i seguenti.

<i>C (%)</i>	<i>1,1</i>
<i>FER</i>	<i>20</i>
<b><i>FIR (%)</i></b>	<b><i>10</i></b>
<i>W<sub>tot</sub> (%)</i>	<i>11</i>

*Tabella 23: Parametri di condizionamento nella prova n°7*

Di seguito si riporta il campione n°7 prima di iniziare la prova.



*Figura 44: Campione n° 7*

*Valutazione del condizionamento per lo scavo con EPB in terreni con presenza di ciottoli*



**20°:** Il campione rimane fermo sullo scivolo, risulta asciutto e ha la forma di un blocco unico costituito da fine e ciottoli.



**25°:** Il campione esibisce un comportamento di tipo rigido e a meno di un 20 % di ciottoli e di matrice che si staccano durante il cinematismo, raggiunge il contenitore di raccolta.



**30°:** il residuo sullo scivolo rimane fermo nella transizione tra 25° e 30°.



**35°:** rimane ancora una piccola percentuale di fine sullo scivolo. Al diminuire della schiuma si nota una riduzione della collosità del fine e la tendenza ad aderire allo scivolo.

## Valutazione del condizionamento per lo scavo con EPB in terreni con presenza di ciottoli

Di seguito si riportano la tabella con i dati e il grafico relativi alla prova.

Angolo	Ciottoli	Fine	Ciottoli (%)	Fine (%)
20	0	0	0	0
25	9117	16763	86,6	84,8
30	9117	16763	86,6	84,8
35	10521	18914	100	95,7
Totale	10521	19770	100	100

Tabella 24: Valori misurati nella prova n°7

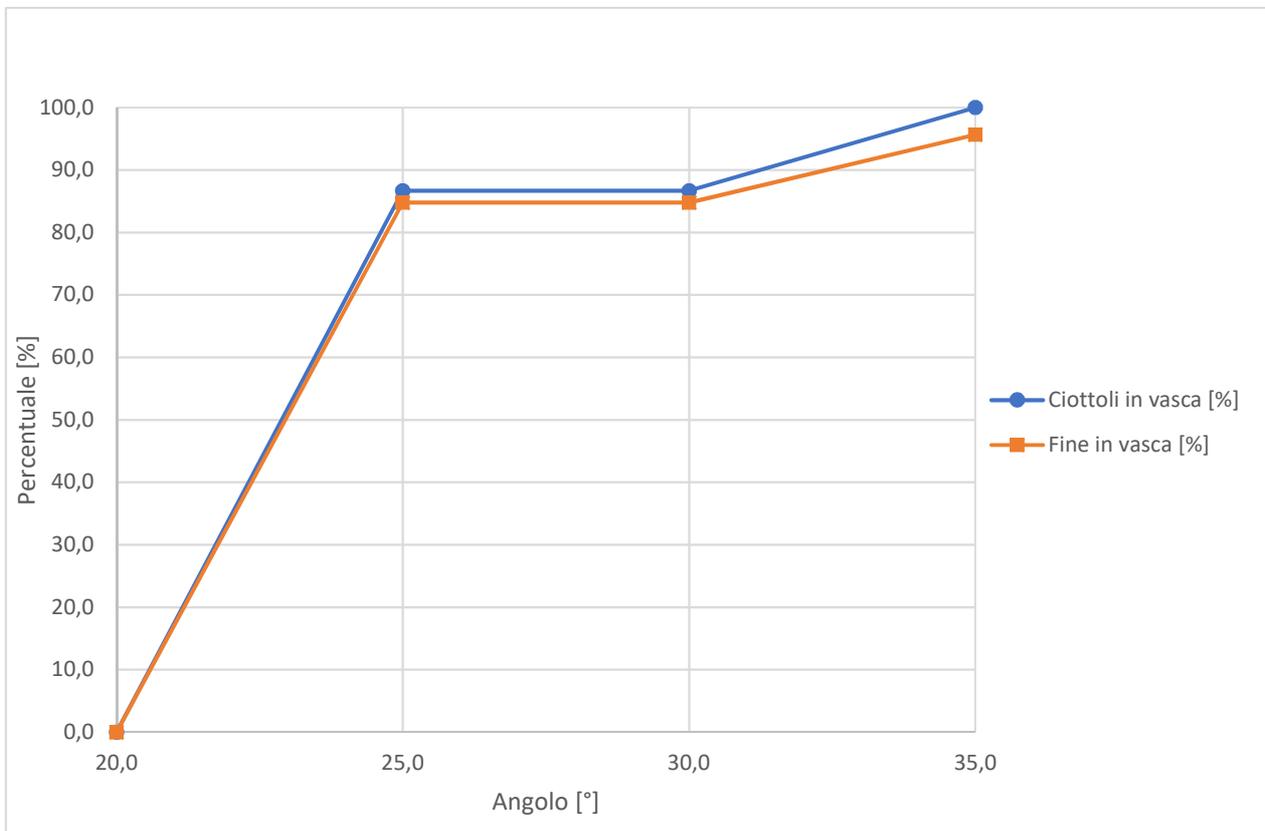


Figura 45: Percentuali in vasca di raccolta vs inclinazione scivolo prova n°7

## *Valutazione del condizionamento per lo scavo con EPB in terreni con presenza di ciottoli*

Dal grafico si nota come il comportamento sia migliorato rispetto alla prova con FIR pari a 0 %, ma rimane ancora rigido, circa l'80 % sia della pasta che dei ciottoli raggiunge il contenitore di raccolta nella transizione tra 20° e 25°.

### *5.4.3.8 PROVA N°8*

Nella prova si è deciso di ridurre del 10 % il FIR in modo da valutare il campione a fronte di una piccola riduzione di schiuma. I parametri di condizionamento sono stati i seguenti.

<i>C (%)</i>	<i>1,1</i>
<i>FER</i>	<i>20</i>
<b><i>FIR (%)</i></b>	<b><i>20</i></b>
<i>w<sub>tot</sub> (%)</i>	<i>11</i>

*Tabella 25 Parametri di condizionamento nella prova n°8*

Il campione condizionato prima di iniziare la prova è riportato di seguito in figura 46.



*Figura 46: Campione n°8*

*Valutazione del condizionamento per lo scavo con EPB in terreni con presenza di ciottoli*



**20°:** Il fine e i ciottoli si muovono in maniera abbastanza uniforme, l'insieme esibisce un movimento plastico. Si nota una leggera mancanza di schiuma in quanto il materiale risulta concentrato in una piccola porzione di scivolo.



**25°:** Lo sviluppo del cinematismo iniziato a 20° avviene correttamente, i ciottoli rimangono legati alla matrice fine e il movimento dell'insieme avviene in maniera plastica.



**30°:** tra 25° e 30° prosegue il movimento iniziato a 20° che porta gran parte del campione in vasca di raccolta, rimane ancora un 10 % di fine sullo scivolo.



**35°:** La situazione rimane praticamente invariata rispetto a 30°.

## Valutazione del condizionamento per lo scavo con EPB in terreni con presenza di ciottoli

Di seguito si riporta la tabella con i dati e il grafico relativo alla prova.

Angolo	Ciottoli	Fine	Ciottoli (%)	Fine (%)
20	0	0	0	0
25	0	0	0	0
30	9049	15526	85,5	80,1
35	10289	17547	97,3	90,5
Totale	10576	19376	100	100

Tabella 26: Valori misurati nella prova n°8

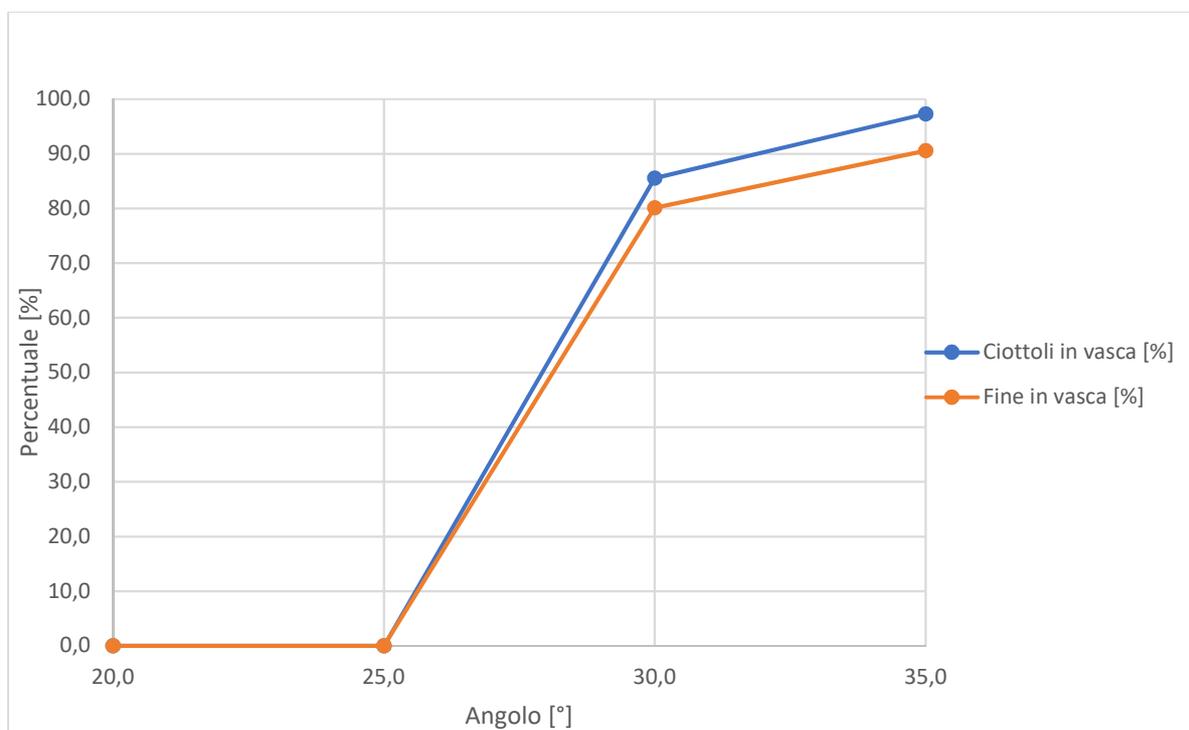


Figura 47: Percentuali in vasca di raccolta vs inclinazione scivolo prova n°8

## *Valutazione del condizionamento per lo scavo con EPB in terreni con presenza di ciottoli*

Osservando il comportamento del campione sullo scivolo e i dati misurati durante la prova, si nota come il cinematismo sviluppatosi a partire da 20° avvenga in maniera uniforme, pasta ed elementi grossolani rimangono solidali. Il comportamento risulta però ancora leggermente rigido in quanto il campione tende a formare un corpo unico che si espande poco sullo scivolo, e fino alla transizione tra 25° e 30° non arriva materiale in vasca di raccolta.

### *5.4.3.9 PROVA N°9*

La prova n° 9 è stata condotta aumentando il FIR del 10% rispetto all'ottimale; i parametri adottati sono stati in seguenti.

<i>C (%)</i>	<i>1,1</i>
<i>FER</i>	<i>20,0</i>
<b><i>FIR (%)</i></b>	<b><i>40,0</i></b>
<i>W<sub>tot</sub> (%)</i>	<i>11,0</i>

*Tabella 27-: Parametri di condizionamento nella prova n°9*

Il campione n°9 prima di iniziare la prova è riportato di seguito in figura 48.



*Figura 48: Campione n°9*

	<p><b>20°:</b> Il materiale tende a scivolare in maniera piuttosto uniforme; grazie alla schiuma in eccesso il campione si espande sullo scivolo e occupa una superficie ampia.</p>
	<p><b>25°:</b> Il cinematismo iniziato a 20° prosegue, portando una piccola componente di fine in vasca di raccolta. Si nota come il campione si sia allargato occupando gran parte della superficie dello scivolo.</p>
	<p><b>30°:</b> Il materiale si muove in maniera uniforme e circa il 45% dei ciottoli e 35% di matrice fine raggiungono la vasca di raccolta. Si nota una decisa espansione del fine sullo scivolo che tende a occuparne l'intera superficie, mentre i ciottoli vi si mantengono al centro.</p>
	<p><b>35°:</b> Gli elementi grossolani hanno raggiunto per più del 95 % la vasca di raccolta, mentre circa il 50 % di fine rimane adeso alla superficie dello scivolo; tale fenomeno determina in vasca una distribuzione granulometrica molto differente da quella iniziale del campione.</p>

## Valutazione del condizionamento per lo scavo con EPB in terreni con presenza di ciottoli

Di seguito si riporta la tabella con i valori ottenuti durante la prova e di seguito il grafico rappresentativo della percentuale di materiale in arrivo alle varie inclinazioni in vasca di raccolta.

Angolo	Ciottoli (g)	Fine (g)	Ciottoli (%)	Fine (%)
20,0	0,0	0,0	0,0	0,0
25,0	123,0	750,0	1,1	3,9
30,0	4935,0	6413,0	46,0	33,2
35,0	10515,0	10963,0	98,0	56,7
Totale	10727,0	19342,0	100,0	100,0

Tabella 28: Valori misurati nella prova n°9

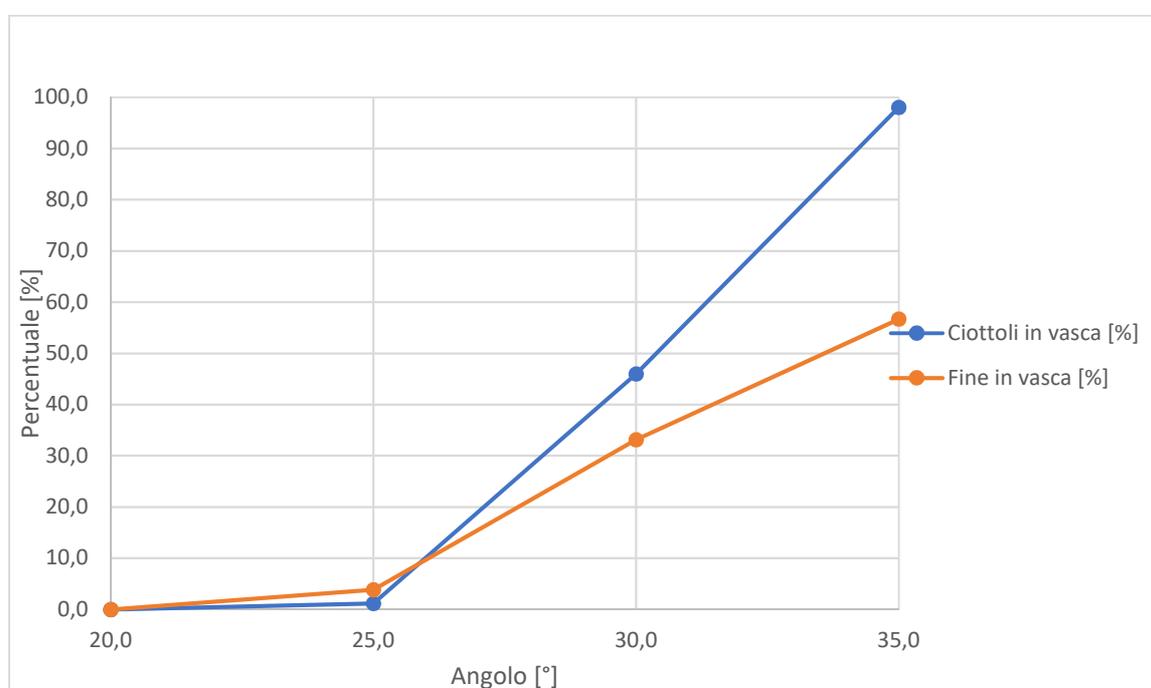


Figura 49: Percentuali in vasca di raccolta vs inclinazione scivolo prova n°9

## *Valutazione del condizionamento per lo scavo con EPB in terreni con presenza di ciottoli*

Durante la prova il comportamento risulta buono fino a 30°, gli elementi grossolani rimangono immersi nella matrice più fine e arrivano in vasca di raccolta in maniera uniforme e in percentuali simili; superati i 30° la collosità del materiale dovuta all'eccesso di schiuma determina un residuo del 50% di fine sullo scivolo, tale componente non è in grado di trattenere e controllare il movimento degli elementi grossolani.

### *5.4.3.10 PROVA N° 10*

La prova n° 10 è stata eseguita valutando il comportamento del campione in assenza di condizionamento con schiuma, al fine di valutare se la sola aggiunta di acqua conferisca al materiale le caratteristiche richieste per lo scavo. I parametri adottati risultano quindi i seguenti:

<i>C (%)</i>	<i>0,0</i>
<i>FER</i>	<i>0,0</i>
<i>FIR (%)</i>	<i>0,0</i>
<b><i>w<sub>tot</sub> (%)</i></b>	<b><i>9,0</i></b>

*Tabella 29: Parametri di condizionamento nella prova n°10*

Di seguito in figura 50 si riporta il campione nell'alloggiamento prima di iniziare la prova



*Figura 50: Campione n°10*

*Valutazione del condizionamento per lo scavo con EPB in terreni con presenza di ciottoli*



**20°:** Il materiale risulta asciutto, alcuni ciottoli si separano dalla matrice fine.



**25°:** la posizione del materiale rimane invariata rispetto a 20°.



**30°:** Il materiale risulta secco, alcuni ciottoli raggiungono la vasca ma il fine rimane per la maggior parte sullo scivolo.



**35°:** i ciottoli hanno raggiunto per la quasi totalità la vasca di raccolta, mentre il fine rimane sullo scivolo. Il comportamento non risulta sufficientemente plastico e la matrice non è in grado di trattenere i ciottoli.

## Valutazione del condizionamento per lo scavo con EPB in terreni con presenza di ciottoli

Di seguito si riporta la tabella con i valori misurati durante la prova e il grafico rappresentativo del comportamento del campione.

<b>Angolo</b>	<b>Ciottoli [g]</b>	<b>Fine [g]</b>	<b>ciottoli [%]</b>	<b>Fine [%]</b>
20,0	0,0	46,0	0,0	0,2
25,0	0,0	52,0	0,0	0,3
30,0	2643,0	517,0	25,9	2,7
35,0	9122,0	12233,0	89,4	63,2
Totale	10203,0	19342,0	100,0	100,0

Tabella 30: Valori misurati nella prova n°10

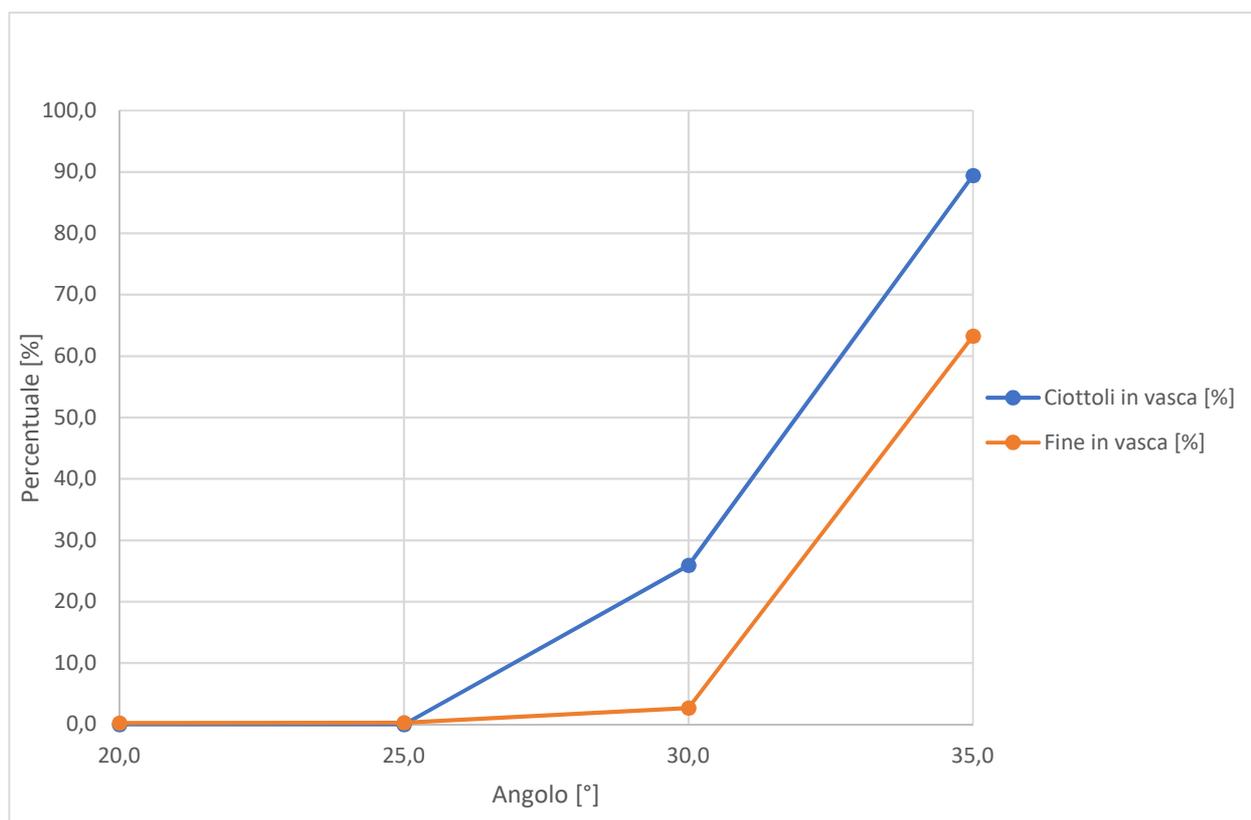


Figura 51: Percentuali in vasca di raccolta vs inclinazione scivolo prova n°10

### *Valutazione del condizionamento per lo scavo con EPB in terreni con presenza di ciottoli*

Osservando la prova, il materiale ha mostrato un comportamento rigido; un materiale con le caratteristiche del campione n°10 non permetterebbe lo scavo con EPB a causa dell'eccessivo attrito e della scarsa capacità di applicare la pressione al fronte di scavo.

#### *5.4.3.11 PROVA N° 11*

La prova n°11 è stata eseguita aumentando l'acqua totale del 2 % rispetto al valore ottimale. I parametri adottati risultano i seguenti.

<i>C (%)</i>	<i>0,0</i>
<i>FER</i>	<i>0,0</i>
<i>FIR (%)</i>	<i>0,0</i>
<b><i>w<sub>tot</sub> (%)</i></b>	<b><i>13,0</i></b>

*Tabella 31: Parametri di condizionamento nella prova n°11*

Di seguito in figura 52 si riporta il campione nell'alloggiamento prima di iniziare la prova.



*Figura 52: Campione n°11*

*Valutazione del condizionamento per lo scavo con EPB in terreni con presenza di ciottoli*



**20°:** il materiale risulta compatto, la posizione a 20° è stabile.



**25°:** il campione si comporta come un elemento unico, non si nota la separazione di elementi di grossolani dalla matrice fine.



**30°:** il cinematismo iniziato tra 20° e 25° prosegue con carattere viscoso, il materiale si espande poco sullo scivolo.



**35°:** il cinematismo si evolve rapidamente e porta buona parte dei ciottoli in vasca di raccolta; parte del fine rimane adeso allo scivolo.

## Valutazione del condizionamento per lo scavo con EPB in terreni con presenza di ciottoli

Di seguito si riportano la tabella e il grafico rappresentativo del comportamento del campione per la prova n°11.

<b>Angolo</b>	<b>Ciottoli</b>	<b>Fine</b>	<b>Ciottoli (%)</b>	<b>Fine (%)</b>
20,0	0,0	0,0	0,0	0,0
25,0	0,0	0,0	0,0	0,0
30,0	0,0	0,0	0,0	0,0
35,0	6717,0	4826,0	63,6	25,8
Totale	10563,0	18726,0	100,0	100,0

Tabella 32: Valori misurati nella prova n°11

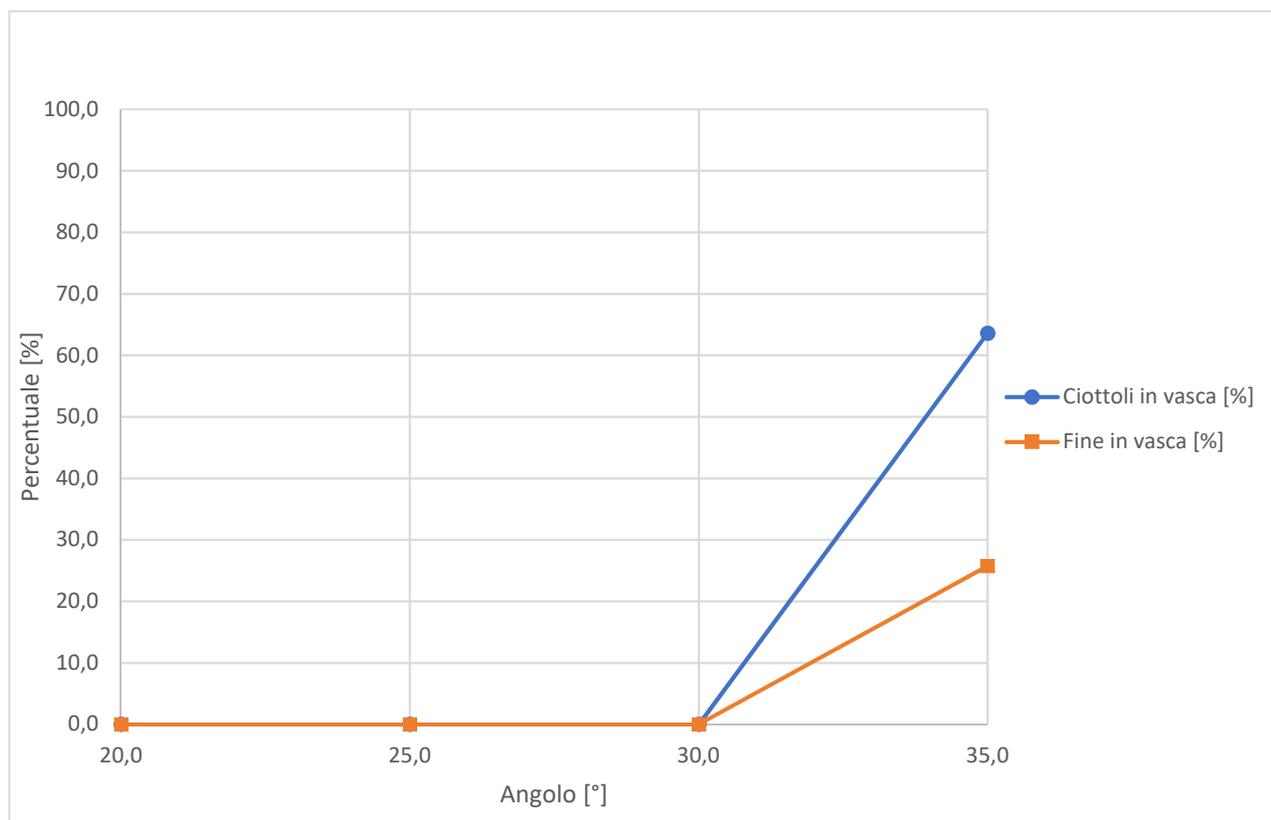


Figura 53: Percentuali in vasca di raccolta vs inclinazione scivolo prova n°11

## Valutazione del condizionamento per lo scavo con EPB in terreni con presenza di ciottoli

Osservando il campione sullo scivolo e i risultati ottenuti si nota una progressione omogenea del materiale sullo scivolo, senza segregazione di una classe rispetto all'altra. Tra 30° e 35° si ha però circa il 50% dei ciottoli che arriva in vasca di raccolta, mentre sullo scivolo rimane circa il 75 % di fine; risulta quindi a fine prova un'espansione ridotta del materiale sullo scivolo, ma il fine rimasto rimane concentrato in porzioni di spessore superiore ai 2 cm, indice di una scarsa plasticità della matrice.

### 5.4.3.12 PROVA N°12

Nella prova presentata di seguito si è deciso di aumentare ulteriormente l'acqua, aggiungendo un 4 % in eccesso rispetto all'ottimale.

<i>C (%)</i>	<i>0</i>
<i>FER</i>	<i>0</i>
<i>FIR (%)</i>	<i>0</i>
<b><i>w<sub>tot</sub> (%)</i></b>	<b><i>15</i></b>

Figura 54: Parametri di condizionamento nella prova n°12

Il campione immesso nell'alloggiamento in testa allo scivolo prima di iniziare la prova è riportato in figura 55.



Figura 55: Campione n°12

*Valutazione del condizionamento per lo scavo con EPB in terreni con presenza di ciottoli*



**20°:** Il materiale fluisce sullo scivolo; si nota una parte di fine che tende a separarsi e a fluire più velocemente rispetto ai ciottoli.



**25°:** il cinematismo iniziato a 20° si evolve rapidamente, anche se in maniera uniforme, per poi arrestarsi



**30°:** Il cinematismo si evolve portando più del 90 % dei ciottoli in vasca di raccolta.



**35°:** a fine prova rimangono solamente un paio di ciottoli e una grande quantità di fine adeso.

Di seguito si riportano la tabella e il grafico relativi alla prova n° 12.

Angolo	Ciottoli	Fine	Ciottoli (%)	Fine (%)
20,0	0,0	0,0	0,0	0,0
25,0	565,0	2403,0	5,4	12,9
30,0	9455,0	7434,0	90,4	39,9
35,0	10071,0	7723,0	96,3	41,5
Totale	10462,0	18614,0	100,0	100,0

Tabella 33: Valori misurati nella prova n°12

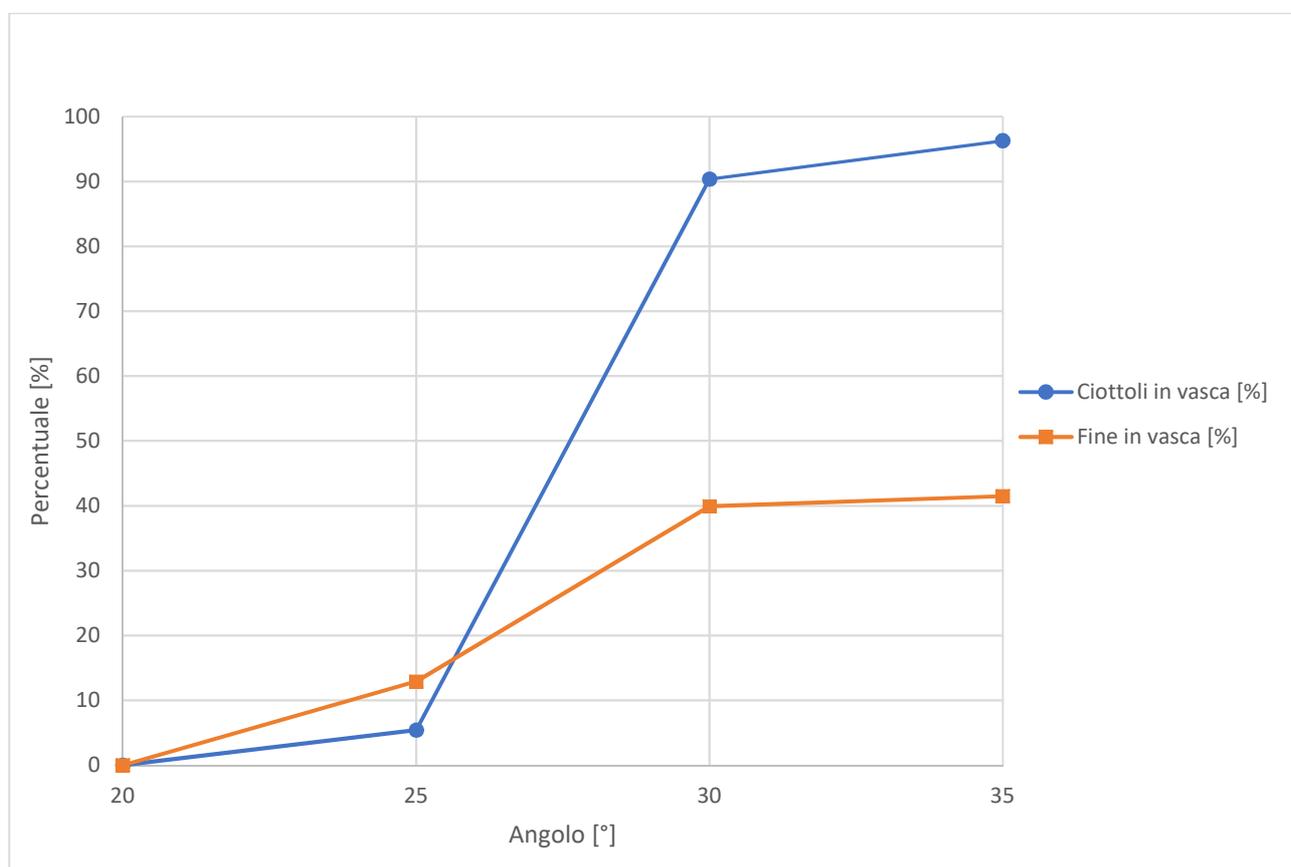


Figura 56: Percentuali in vasca di raccolta vs inclinazione scivolo prova n°12.

## *Valutazione del condizionamento per lo scavo con EPB in terreni con presenza di ciottoli*

Dalla prova si nota come l'eccesso di acqua abbia portato ad una rapida evoluzione del cinematismo tra i 25° e 30°; il fine non riesce a trattenere correttamente i ciottoli che si separano per più dell'80 % al momento del superamento della resistenza per attrito tra i ciottoli e il fine. Al termine della prova rimane più del 60 % di fine sullo scivolo, ad evidenziare come l'eccesso d'acqua abbia aumentato la separazione delle due classi.

### *5.4.3.13 PROVA N°13*

Dopo aver valutato il comportamento al variare dell'acqua senza aggiungere schiuma, si è deciso di indagare l'influenza della variazione di FER sul comportamento del campione.

I parametri adottati per la prova n°13 sono i seguenti.

<i>C (%)</i>	<i>1,1</i>
<b><i>FER</i></b>	<b><i>15</i></b>
<i>FIR (%)</i>	<i>30</i>
<i>W<sub>tot</sub> (%)</i>	<i>11</i>

*Tabella 34: Parametri di condizionamento nella prova n°13*

Di seguito in figura 57 si riporta il campione nell'alloggiamento prima di iniziare la prova.



*Figura 57: Campione n°13*

*Valutazione del condizionamento per lo scavo con EPB in terreni con presenza di ciottoli*



**20°:** Il campione esibisce un comportamento buono, le due classi granulometriche sono solidali, lo scorrimento è di tipo viscoso.



**25°:** Il movimento avviene in maniera progressiva, le due classi rimangono legate e nessun elemento raggiunge la vasca



**30°:** tra 25° e 30° ha inizio un rapido cinematismo che porta gran parte dei ciottoli e poco fine in vasca.



**35°:** I ciottoli raggiungono per la maggior parte la vasca, mentre il fine rimane consistentemente adeso allo scivolo.

## Valutazione del condizionamento per lo scavo con EPB in terreni con presenza di ciottoli

Di seguito si riportano la tabella con i valori misurati e il grafico rappresentativo dell'evoluzione della prova n°13.

Angolo	Ciottoli	Fine	Ciottoli (%)	Fine (%)
20,0	0,0	0,0	0,0	0,0
25,0	0,0	0,0	0,0	0,0
30,0	7820,0	5396,0	73,4	32,1
35,0	9966,0	6570,0	93,6	39,1
Totale	10648,0	16804,0	100,0	100,0

Tabella 35: Valori misurati nella prova n°13

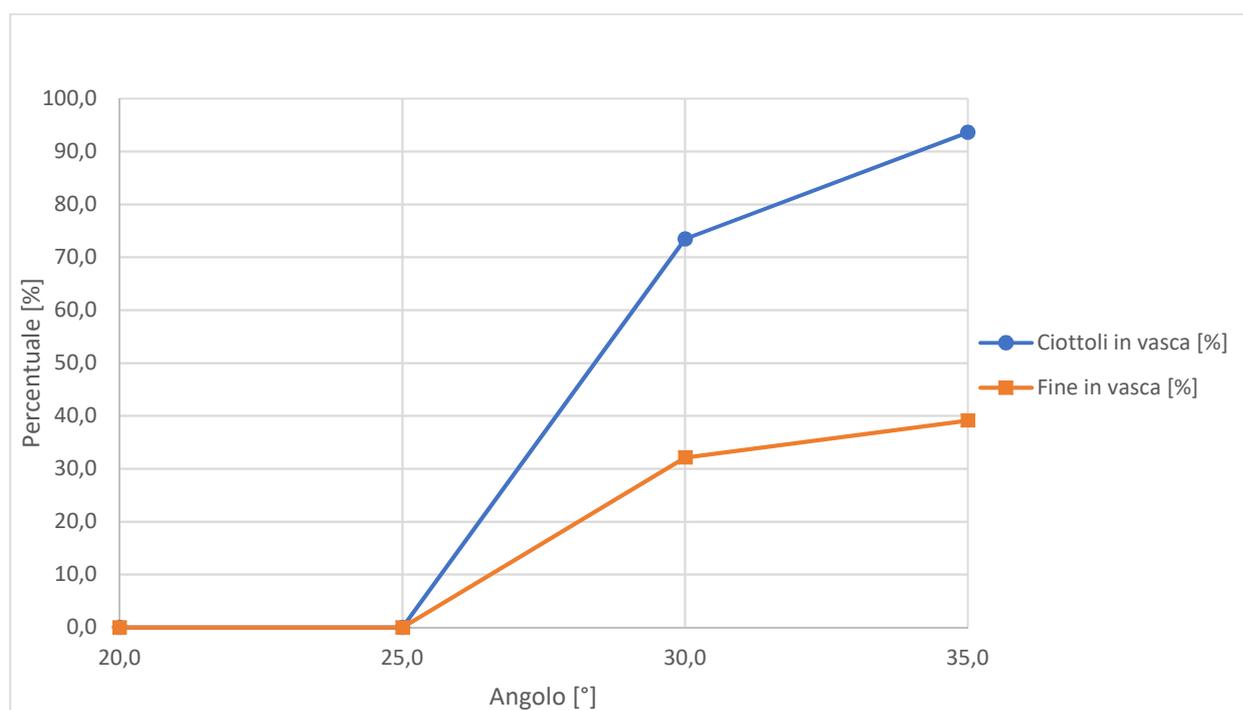


Figura 58: Percentuali in vasca di raccolta vs inclinazione scivolo prova n°13.

## *Valutazione del condizionamento per lo scavo con EPB in terreni con presenza di ciottoli*

Osservando il comportamento del campione, si nota come durante la prima parte della prova il fine riesca a trattenere e controllare il movimento dei ciottoli e l'insieme si muove uniformemente sullo scivolo, mentre tra 25° e 30° si abbia una rapida evoluzione del cinematismo con separazione dei ciottoli che tendono a scivolare in vasca di raccolta e la matrice fine che rimane in gran parte adesa sullo scivolo; a fine prova si trova circa il 60 % del fine sulla superficie metallica dello scivolo.

### *5.4.3.14 PROVA N° 14*

La seguente prova ha previsto la riduzione del FER di 10 punti rispetto all'ottimale; i parametri adottati sono stati i seguenti.

<i>C (%)</i>	<i>1,1</i>
<b><i>FER</i></b>	<b><i>10</i></b>
<i>FIR (%)</i>	<i>30</i>
<i>W<sub>tot</sub> (%)</i>	<i>11</i>

*Tabella 36: Parametri di condizionamento nella prova n°14.*

Il campione di terreno condizionato prima di iniziare la prova è riportato di seguito in figura 59.



*Figura 59: Campione n°14*

*Valutazione del condizionamento per lo scavo con EPB in terreni con presenza di ciottoli*

	<p><b>20°:</b> il campione fluisce sullo scivolo e si ha una parte della componente fine che si separa dalla massa iniziale.</p>
	<p><b>25°:</b> le due classi rimangono solidali e si riversano progressivamente in vasca di raccolta senza separarsi</p>
	<p><b>30°:</b> tra 25° e 30° ha inizio un rapido cinematisimo che porta gran parte dei ciottoli e poco fine in vasca.</p>
	<p><b>35°:</b> tra 30° e 35° i ciottoli rimasti raggiungono la vasca di raccolta mentre il fine rimane per una buona percentuale sullo scivolo.</p>

## Valutazione del condizionamento per lo scavo con EPB in terreni con presenza di ciottoli

Di seguito si riportano la tabella con i valori misurati durante la prova e il grafico relativo all'andamento della prova n°14.

Angolo	Ciottoli	Fine	Ciottoli (%)	Fine (%)
20°	0	50	0	0,3
25°	712	2721	6,5	15,1
30°	9348	8946	85,6	49,6
35°	10694	9769	97,9	54,2
Totale	10925	18021	100	100

Tabella 37: Valori misurati nella prova n°14

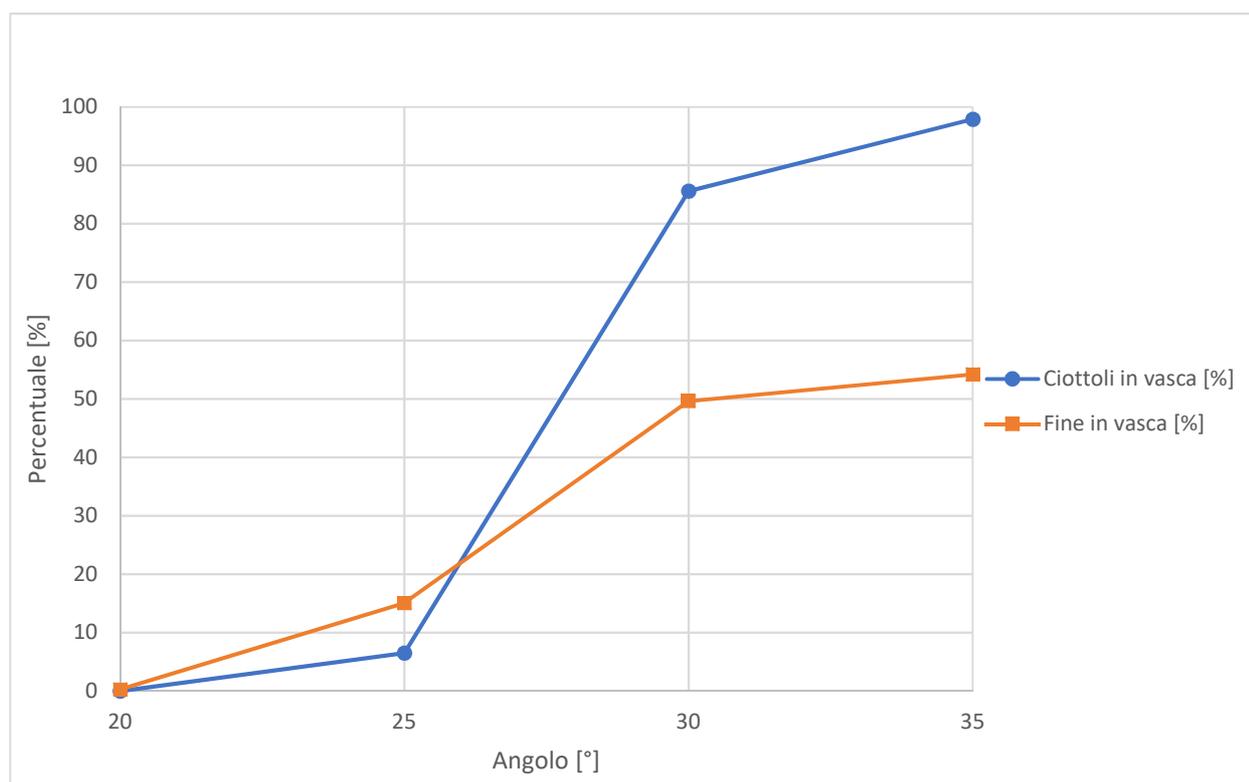


Figura 60: Percentuali in vasca di raccolta vs inclinazione scivolo prova n°14

## *Valutazione del condizionamento per lo scavo con EPB in terreni con presenza di ciottoli*

L'osservazione della prova e i risultato ottenuti denotano un comportamento buono del materiale sullo scivolo; alla transizione da 20° a 25° si ha il cinematismo principale che porta più del 70% dei ciottoli in vasca e nello stesso intervallo arriva in vasca anche la maggior quantità di fine in vasca pari a circa il 30%.

### *5.4.3.15 PROVA N°15*

Dopo aver ridotto il FER di 5 e poi 10 punti mantenendo costanti i parametri propri del condizionamento ottimale, si è deciso di valutare a FER 10 e FER 15 l'influenza delle variazioni di FIR sul comportamento del campione.

La prova n° 15 è stata condotta riducendo il FER di 10 punti e il FIR del 10%; i parametri di condizionamento risultano i seguenti.

<i>C (%)</i>	<i>1,1</i>
<b><i>FER</i></b>	<b><i>10</i></b>
<b><i>FIR (%)</i></b>	<b><i>20</i></b>
<i>W<sub>tot</sub> (%)</i>	<i>11</i>

*Tabella 38: Parametri di condizionamento nella prova n°15*

Il campione prima di iniziare la prova è riportato in figura 61.



*Figura 61: Campione n°15*

*Valutazione del condizionamento per lo scavo con EPB in terreni con presenza di ciottoli*



**20°:** Il campione si presenta compatto in un blocco unico, appare asciutto e non tende a disperdersi sullo scivolo.



**25°:** il fine e gli elementi grossolani rimangono solidali, il movimento è uniforme e la superficie dello scivolo rimane praticamente priva di materiale dopo lo scivolamento.



**30°:** parte del materiale finisce in vasca di raccolta, la massa rimane comunque compatta e i ciottoli non si separano dal fine.



**35°:** Tra 30° e 35° si sviluppa un cinematismo che porta gran parte del blocco di materiale in vasca. La restante parte rimasta sullo scivolo, dimostra una buona capacità del fine di trattenere i ciottoli anche a 35°

## Valutazione del condizionamento per lo scavo con EPB in terreni con presenza di ciottoli

Di seguito si riportano la tabella e il grafico relativi ai risultati ottenuti nella prova n°15.

Angolo	Ciottoli	Fine	Ciottoli (%)	Fine (%)
20	0	0	0	0
25	605	950	5,923242608	5,616981021
30	6660	9002	65,20462111	53,22532963
35	9082	13600	88,91717251	80,41151777
Totale	10214	16913	100	100

Tabella 39: Valori misurati nella prova n°15

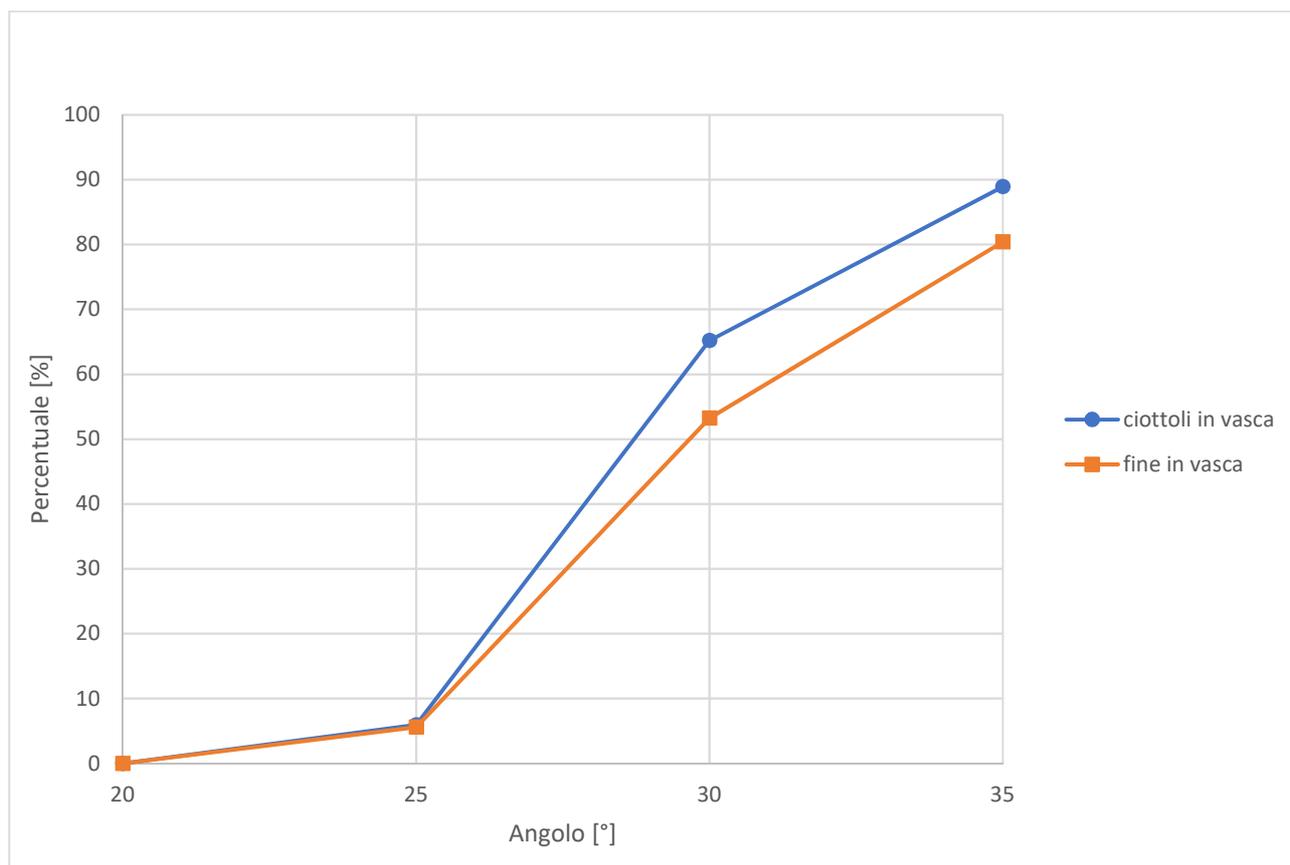


Figura 62: Percentuali in vasca di raccolta vs inclinazione scivolo prova n°15.

Osservando la prova, il campione ha mostrato un comportamento corretto in quanto la massa di materiale è rimasta compatta da inizio a fine prova, il fine ha trattenuto i ciottoli e non ne ha permesso la separazione. Tale considerazione è confermata dall'osservazione visiva della prova e dai valori misurati.

#### *5.4.3.16 PROVA N°16*

La seguente prova è stata condotta aumentando il FIR del 10% rispetto all'ottimale, con FER pari 10. I parametri di condizionamento sono stati i seguenti.

<i>C (%)</i>	<i>1,1</i>
<b><i>FER</i></b>	<b><i>10</i></b>
<b><i>FIR (%)</i></b>	<b><i>40</i></b>
<i>w<sub>tot</sub> (%)</i>	<i>11</i>

*Tabella 40: Parametri di condizionamento nella prova n°16*

Il campione prima di iniziare la prova è riportato di seguito in figura 63.



*Figura 63: Campione n°16*

*Valutazione del condizionamento per lo scavo con EPB in terreni con presenza di ciottoli*



**20°:** Il materiale tende a fluire sullo scivolo, si nota un eccesso di schiuma che tende a segregare dalla matrice fine.



**25°:** i ciottoli rimangono solidali al fine che ne frena il movimento; il comportamento risulta piuttosto fluido.



**30°:** Tra 25° e 30° gran parte dei ciottoli raggiunge la vasca di raccolta, rimane sullo scivolo una parte consistente di fine adeso.



**35°:** i pochi ciottoli rimasti hanno raggiunto la vasca ma il fine rimane adeso allo scivolo

## Valutazione del condizionamento per lo scavo con EPB in terreni con presenza di ciottoli

Di seguito si riportano i valori misurati e il grafico rappresentativo del comportamento del campione.

Angolo	Ciottoli (g)	Fine (g)	Ciottoli (%)	Fine (%)
20°	0	0	0	0
25°	324	686	3,1	4,3
30°	9662	8314	93,9	51,8
35°	10290	8757	100	54,6
Totale	10290	16051	100	100

Tabella 41: Valori misurati nella prova n°16

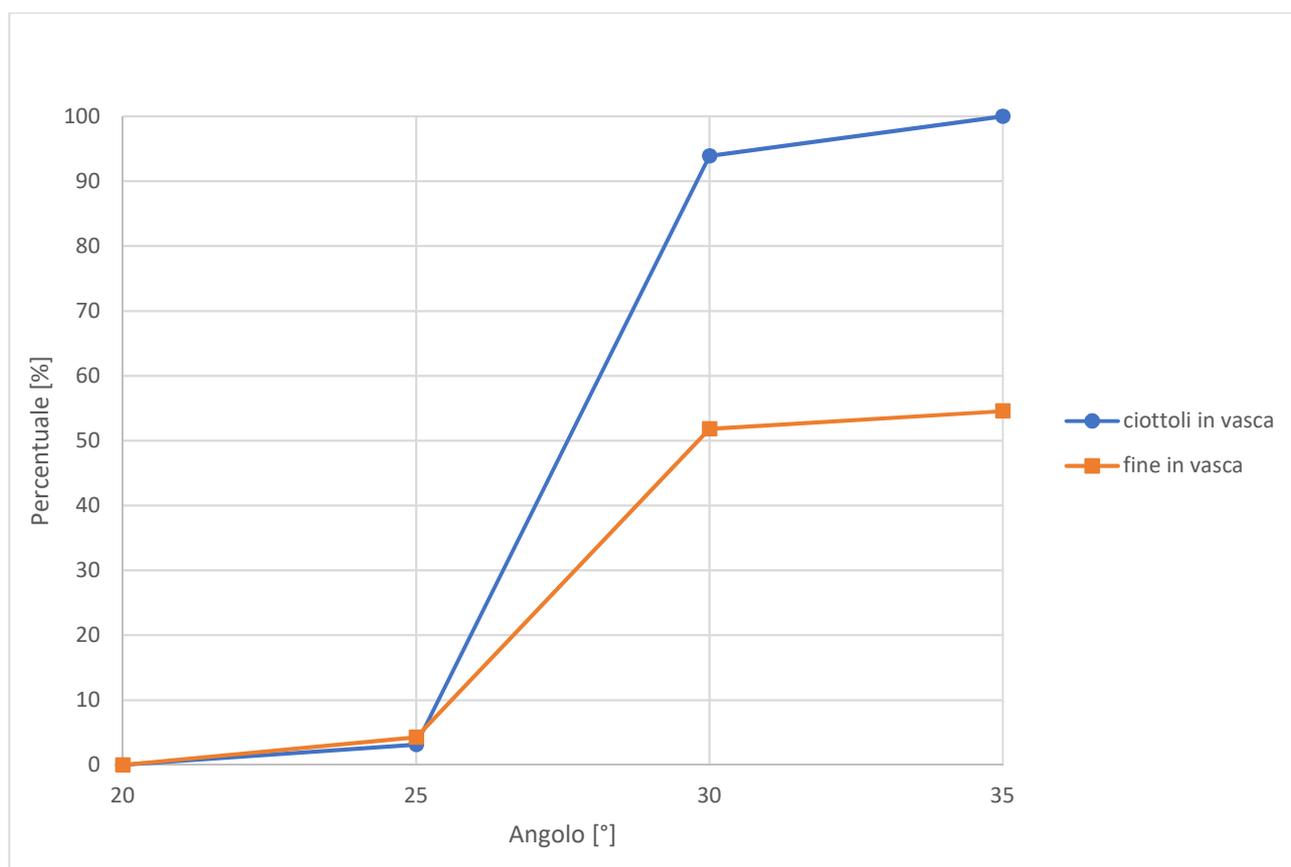


Figura 64: Percentuali in vasca di raccolta vs inclinazione scivolo prova n°16

## *Valutazione del condizionamento per lo scavo con EPB in terreni con presenza di ciottoli*

Durante la prova n° 16, la matrice fine ha mostrato una buona capacità di trattenere i ciottoli fino a 30°, dove si è sviluppato un cinematismo che ha portato più del 90% dei ciottoli e il fine da essi trasportato, in vasca. Dai risultati si nota come l'eccesso di schiuma porti ad una maggiore adesione del fine allo scivolo a fine prova.

### *5.4.3.17 PROVA N°17*

Dopo aver valutato le variazioni nel comportamento del campione a FER pari 10 e variando il FIR, si è deciso di ripetere le prove con FER pari a 15. I parametri di condizionamento sono stati i seguenti.

<i>C (%)</i>	<i>1,1</i>
<b><i>FER</i></b>	<b><i>15</i></b>
<b><i>FIR (%)</i></b>	<b><i>20</i></b>
<i>W<sub>tot</sub> (%)</i>	<i>11</i>

*Tabella 42: Parametri di condizionamento nella prova n°17*

Il campione n°17 prima di iniziare la prova è riportato di seguito in figura 65.



*Figura 65: Campione n°17*

*Valutazione del condizionamento per lo scavo con EPB in terreni con presenza di ciottoli*



**20°:** Già a 20° il materiale fluisce velocemente sullo scivolo, parte del fine si separa dalla massa.



**25°:** il movimento del materiale avviene in maniera uniforme, con i ciottoli che vengono trattenuti dalla matrice fine.



**30°:** tra 25° e 30° si verifica il movimento che porta quasi tutti i ciottoli e il fine ad essi adeso in vasca di raccolta.



**35°:** la situazione rimane invariata rispetto a 30° a meno della caduta in vasca degli ultimi ciottoli rimasti

## Valutazione del condizionamento per lo scavo con EPB in terreni con presenza di ciottoli

Di seguito si riportano i valori misurati durante la prova e il grafico rappresentativo del comportamento del campione sullo scivolo.

<b>Angolo</b>	<b>Ciottoli</b>	<b>Fine</b>	<b>Ciottoli (%)</b>	<b>Fine (%)</b>
20	0	0	0	0
25	1733	1480	16,9	8,8
30	8575	5187	83,9	30,7
35	10215	7126	100	42,2
Totale	10215	16880	100	100

Tabella 43: Valori misurati nella prova n°17

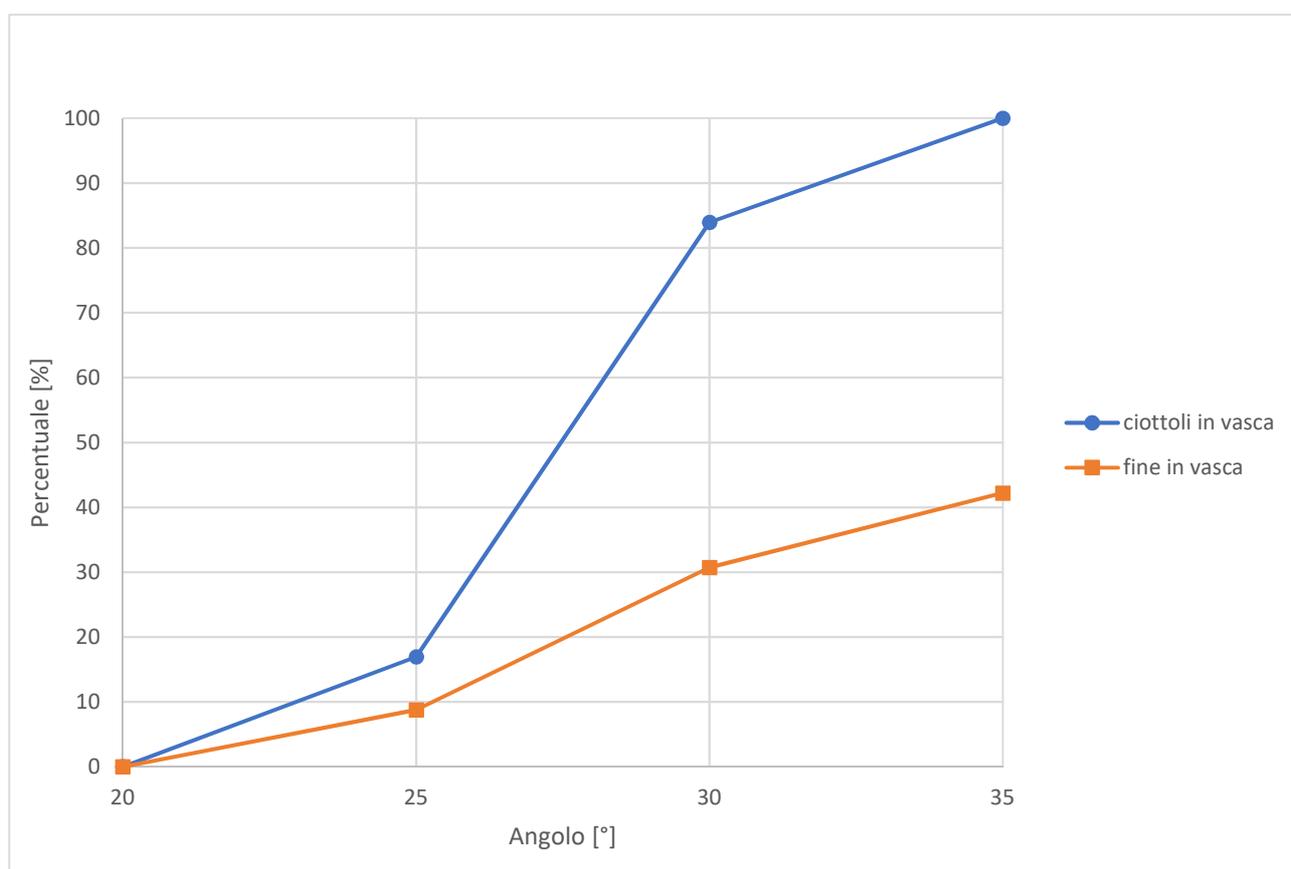


Figura 66: Percentuali in vasca di raccolta vs inclinazione scivolo prova n°17

## *Valutazione del condizionamento per lo scavo con EPB in terreni con presenza di ciottoli*

La prova ha mostrato un comportamento positivo del materiale sullo scivolo, confermato anche dai valori misurati che crescono uniformemente per le due classi; si ritrova a fine prova una percentuale elevata di fine sullo scivolo.

### *5.4.3.18 PROVA N°18*

La seguente prova è stata condotta a FER 15 ma aumentando il FIR del 10% rispetto al valore ottimale. I valori di condizionamento adottati sono di seguito riportati.

<i>C (%)</i>	<i>1,1</i>
<b>FER</b>	<b>15</b>
<b>FIR (%)</b>	<b>40</b>
<i>w<sub>tot</sub> (%)</i>	<i>11</i>

*Tabella 44: Parametri di condizionamento nella prova n°18*

Il campione n°18 prima di iniziare la prova è riportato di seguito in figura 67.



*Figura 67: Campione n°18*

*Valutazione del condizionamento per lo scavo con EPB in terreni con presenza di ciottoli*



**20°:** Il campione appare fluido e tende ad espandersi sullo scivolo, con parte di fine che si separa dalla massa iniziale



**25°:** si sviluppa un cinematismo in cui fine e ciottoli rimangono solidali



**30°:** il cinematismo iniziato precedentemente si sviluppa portando in vasca di raccolta buona parte dei ciottoli e il fine ad essi adeso



**35°:** Gli ultimi ciottoli rimasti sullo scivolo arrivano in vasca di raccolta, mentre una consistente quota di fine rimane adesa allo scivolo.

## Valutazione del condizionamento per lo scavo con EPB in terreni con presenza di ciottoli

Di seguito si riportano i valori misurati e il grafico rappresentativo dell'andamento della prova.

Angolo	Ciottoli (g)	Fine (g)	Ciottoli (%)	Fine (%)
20°	0	0	0	0
25°	0	785	0	4,6
30°	7864	6075	77,1	35,8
35°	9941	8612	97,5	50,8
Totale	10196	16948	100	100

Tabella 45: Valori misurati nella prova n°18

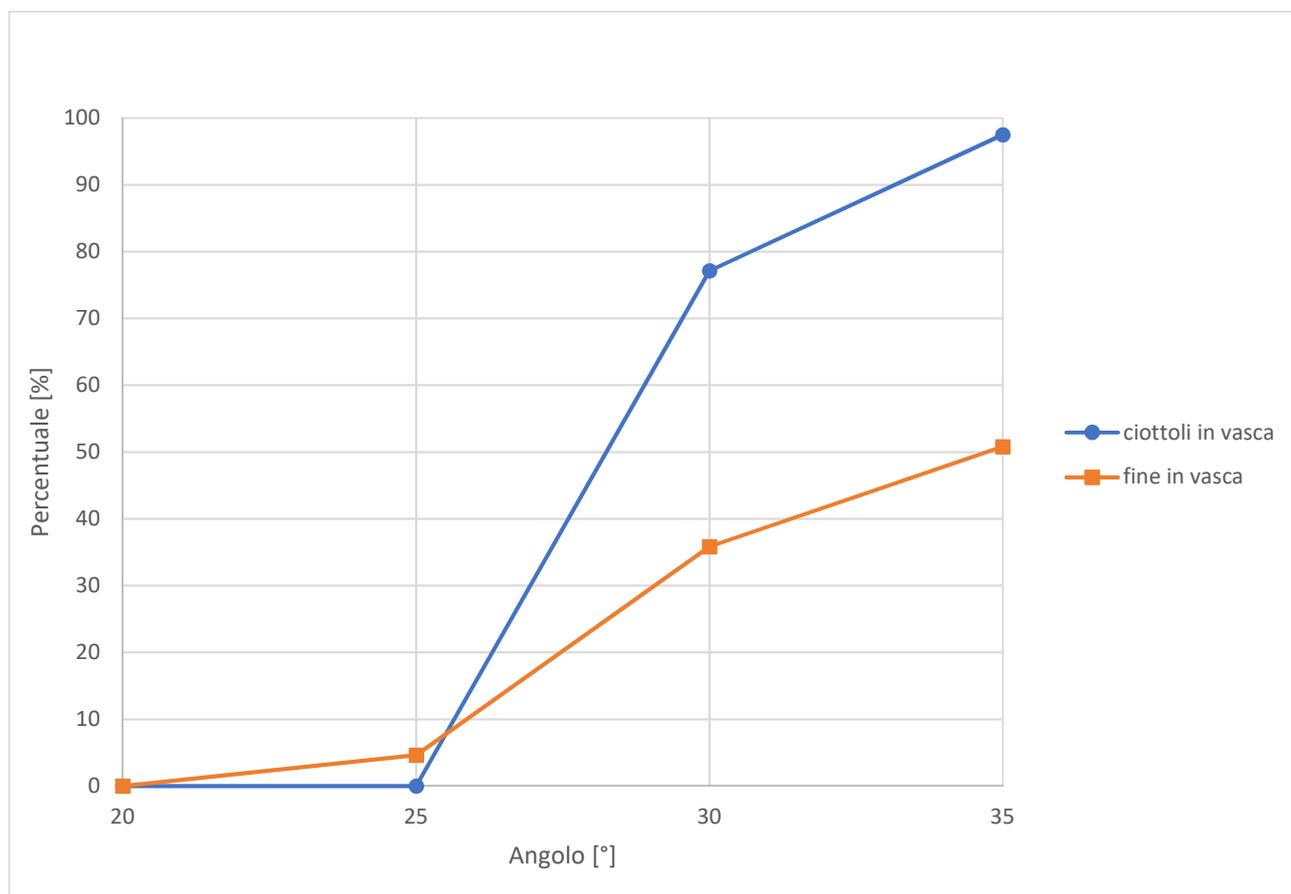


Figura 68: Percentuali in vasca di raccolta vs inclinazione scivolo prova n°18

## *Valutazione del condizionamento per lo scavo con EPB in terreni con presenza di ciottoli*

Osservando i risultati della prova si può notare come il fine sia in grado di trattenere correttamente i ciottoli anche se il comportamento risulta leggermente troppo fluido.

### *5.4.3.19 PROVA N°19*

Dopo aver effettuato le prove miste al variare del FER e del FIR, si è deciso di effettuare due ulteriori prove variando FIR e contenuto d'acqua. I parametri adottati per la prova n°19 sono stati i seguenti.

<i>C (%)</i>	<i>1,1</i>
<i>FER</i>	<i>20</i>
<b><i>FIR (%)</i></b>	<b><i>20</i></b>
<b><i>w<sub>tot</sub> (%)</i></b>	<b><i>13</i></b>

*Tabella 46: Parametri di condizionamento nella prova n°19*

Il campione n°19 prima di iniziare la prova è riportato di seguito in figura 69.



*Figura 69: Campione n°19*

*Valutazione del condizionamento per lo scavo con EPB in terreni con presenza di ciottoli*

	<p><b>20°:</b> Il comportamento del materiale risulta fluido, parte del fine scivola precedendo la massa del campione.</p>
	<p><b>25°:</b> Si sviluppa un cinematismo a carattere fluido dove i ciottoli vengono correttamente trattenuti dalla matrice fine</p>
	<p><b>30°:</b> nella transizione tra 25° e 30° si riversa in vasca la gran parte di ciottoli e sullo scivolo rimane</p>
	<p><b>35°:</b> la situazione rimane invariata rispetto a 30° a meno di una piccola quota di fine che raggiunge la vasca.</p>

## Valutazione del condizionamento per lo scavo con EPB in terreni con presenza di ciottoli

Di seguito si riportano i valori misurati e il grafico rappresentativo del comportamento del campione durante la prova n°19.

Angolo	Ciottoli (g)	Fine (g)	Ciottoli (%)	Fine (%)
20	0	0	0	0
25	0	264	0	1,5
30	7780	6525	69,1	36,6
35	10900	9795	96,8	54,9
Totale	11265	17852	100	100

Tabella 47: Valori misurati nella prova n°19

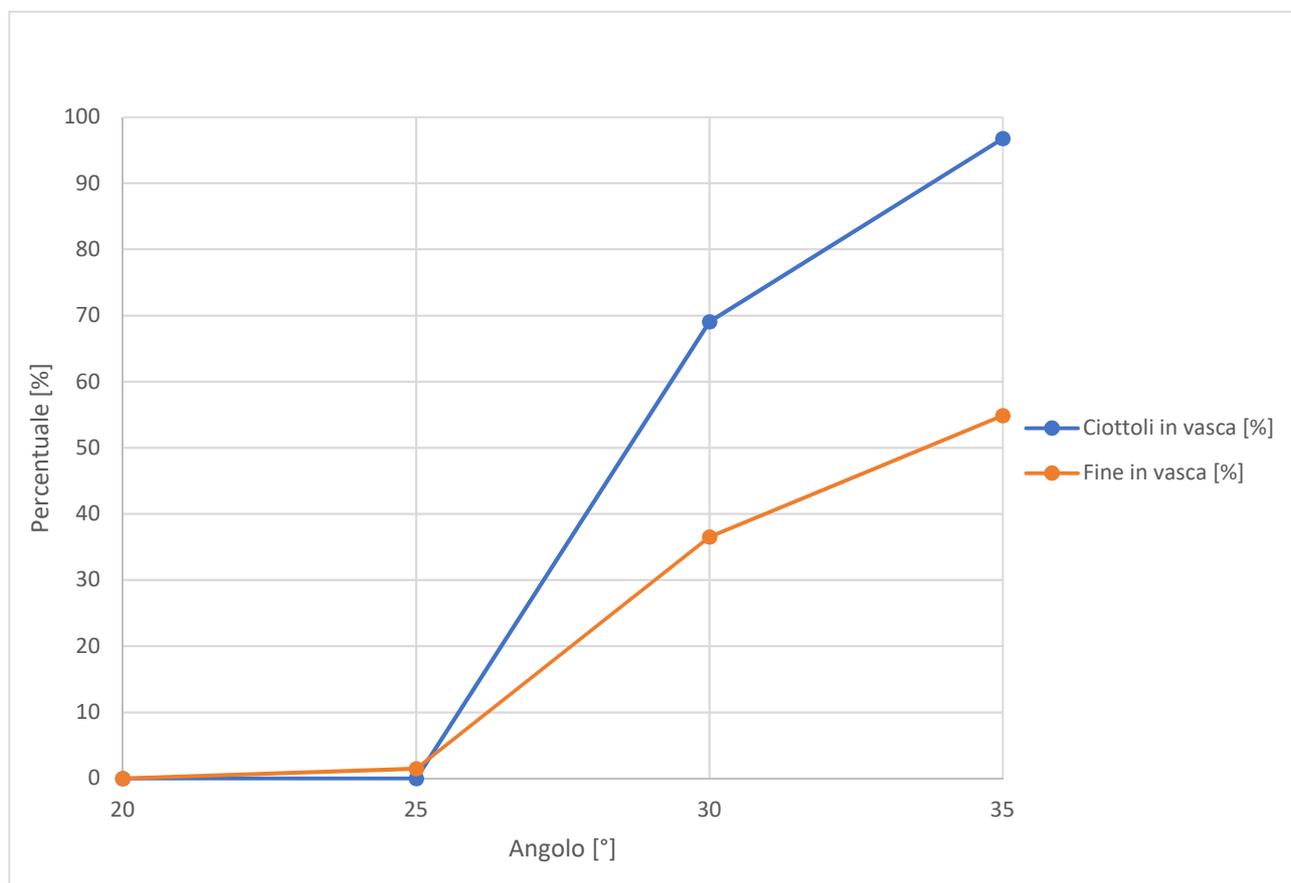


Figura 70: Percentuali in vasca di raccolta vs inclinazione scivolo prova n°19

## *Valutazione del condizionamento per lo scavo con EPB in terreni con presenza di ciottoli*

Dall'osservazione della prova, il comportamento del campione risulta uniforme, le due classi non si separano e arrivano in vasca in maniera solidale; rimane circa il 50% di materiale fine sullo scivolo al termine della prova.

### *5.4.3.20 PROVA N°20*

La prova n° 20 è stata condotta riducendo sia il contenuto d'acqua che il FIR rispetto al valore ottimale. Di seguito in tabella si riportano i valori di condizionamento adottati.

<i>C (%)</i>	<i>1,1</i>
<i>FER</i>	<i>20</i>
<b><i>FIR (%)</i></b>	<b><i>20</i></b>
<b><i>w<sub>tot</sub> (%)</i></b>	<b><i>9</i></b>

*Tabella 48: Parametri di condizionamento nella prova n°20*

Il campione n°20 prima di iniziare la prova è riportato di seguito in figura 71.



*Figura 71: Campione n°20*

*Valutazione del condizionamento per lo scavo con EPB in terreni con presenza di ciottoli*

	<p><b>20°:</b> Il campione risulta asciutto, alcuni ciottoli si separano dal blocco di materiale.</p>
	<p><b>25°:</b> La situazione rimane invariata rispetto a 30°</p>
	<p><b>30°:</b> Il materiale presenta un comportamento disuniforme, le due classi sono separate e non solidali</p>
	<p><b>35°:</b> i ciottoli raggiungono per la maggior parte la vasca di raccolta, mentre il fine rimane adeso e raccolto su porzioni diverse dello scivolo</p>

## Valutazione del condizionamento per lo scavo con EPB in terreni con presenza di ciottoli

Di seguito si riportano i valori misurati e il grafico rappresentativo del comportamento del campione durante la prova n°20.

Angolo	Ciottoli (g)	Fine (g)	Ciottoli (%)	Fine (%)
20	272	120	2,631833575	0,683176772
25	272	165	2,631833575	0,939368061
30	3408	802	32,97532656	4,565898093
35	8798	11470	85,12820513	65,30031312
Totale	10335	17565	100	100

Tabella 49: Valori misurati nella prova n°20

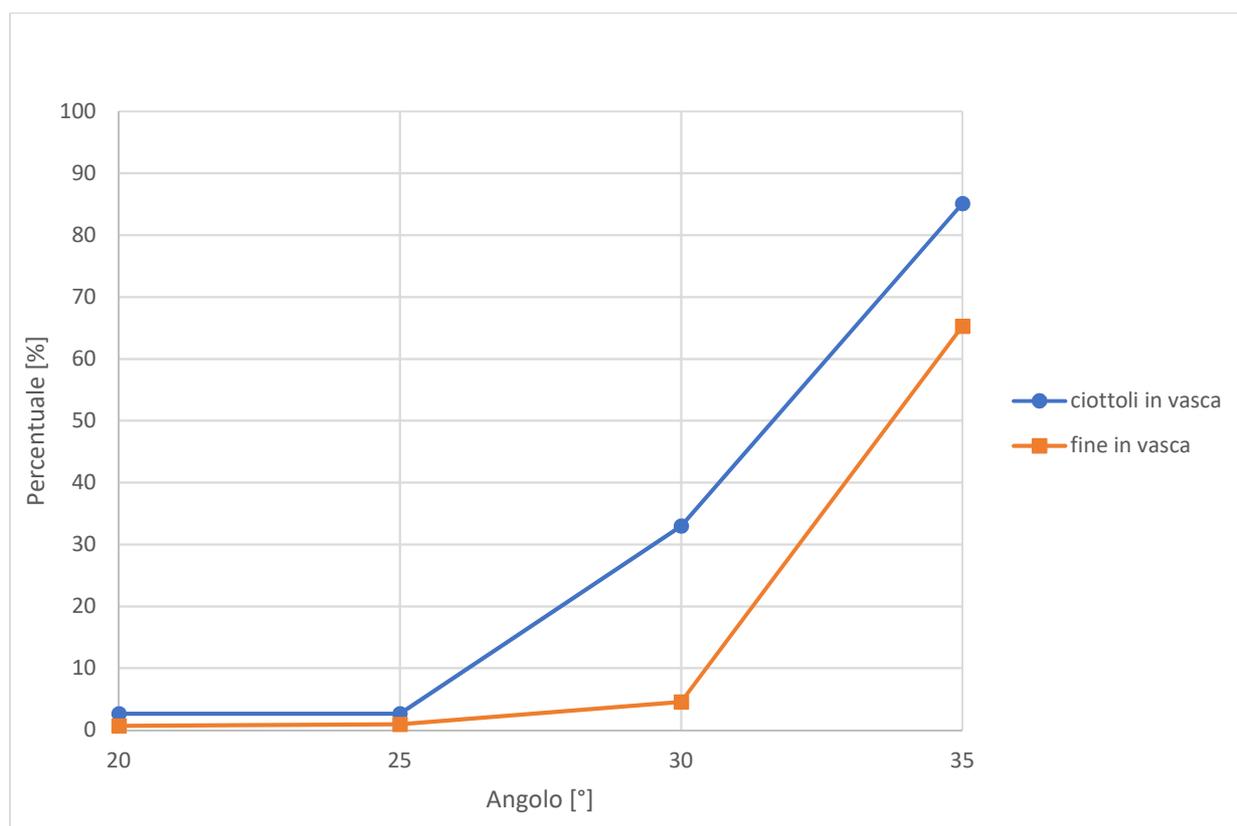


Figura 72: Percentuali in vasca di raccolta vs inclinazione scivolo prova n°20

La prova ha mostrato un comportamento asciutto del campione con le due classi che tendono a separarsi; il fine arriva in vasca in quantità elevate grazie alla riduzione di acqua che ne limita la collosità.

## Valutazione del condizionamento per lo scavo con EPB in terreni con presenza di ciottoli

### 5.4.4 Analisi dei dati ottenuti nelle prove TST

Dopo aver acquisito i dati relativi alle 20 prove eseguite, si è deciso di analizzare le prove dividendole per gruppi dove ogni gruppo è caratterizzato dalla variazione di un parametro.

#### 5.4.4.1 Prove con variazione acqua totale ( $w_{tot}$ )

Il primo gruppo è caratterizzato dalla variazione di acqua totale  $w_{tot}$ ; le prove sono evidenziate nella tabella

ID. Prova	$W_{TOT}$ (%)	FIR (%)	FER	C (%)
1	11	30	20	1,1
2	13	30	20	1,1
3	15	30	20	1,1
4	9	30	20	1,1
5	11	0	0	0
6	11	50	20	1,1
7	11	10	20	1,1
8	11	20	20	1,1
9	11	40	20	1,1
10	9	0	0	0
11	13	0	0	0
12	15	0	0	0
13	11	30	15	1,1
14	11	30	10	1,1
15	11	20	10	1,1
16	11	40	10	1,1
17	11	20	15	1,1
18	11	40	15	1,1
19	13	20	20	1,1
20	9	20	20	1,1

Tabella 50: Prove effettuate variando l'acqua totale ( $w_{tot}$ )

Si riportano di seguito i grafici rappresentativi del comportamento dei ciottoli e poi del fine al variare dell'inclinazione dello scivolo.

### Ciottoli in vasca al variare del contenuto d'acqua totale

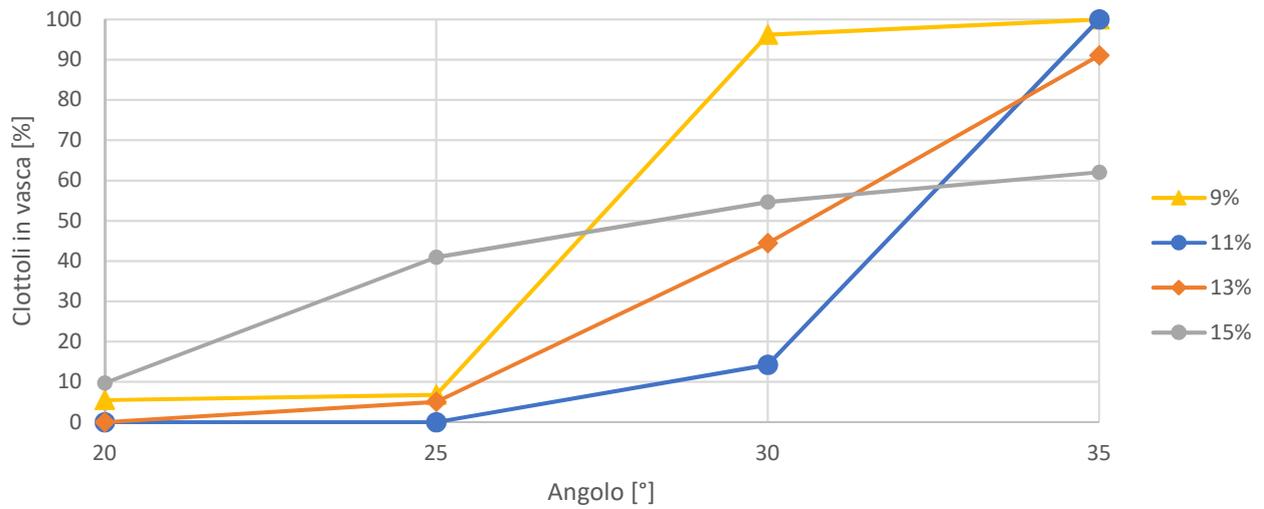


Figura 73: Ciottoli in vasca al variare del contenuto d'acqua totale ( $w_{tot}$ )

### Fine in vasca al variare del contenuto d'acqua

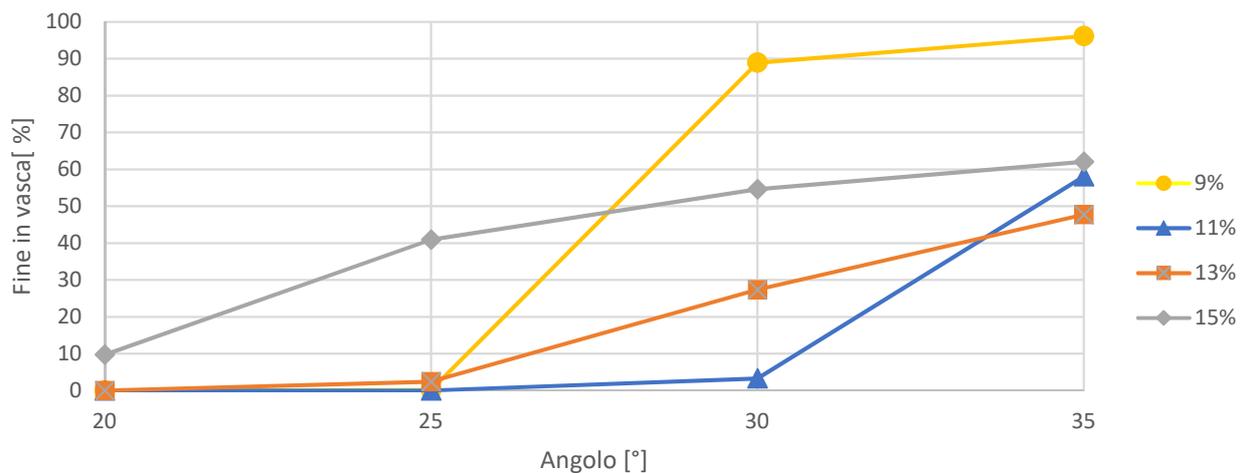


Figura 74: Fine in vasca al variare del contenuto d'acqua totale ( $w_{tot}$ )

Osservando i due grafici in figura 68,69 si nota come al variare dell'acqua totale i ciottoli tendano ad arrivare per il 90% circa mentre il fine nelle prove dove il comportamento è stato migliore, rimane per circa il 50% sullo scivolo a fine prova.

5.4.4.2 Prove con variazione del FIR

Dopo aver analizzato le variazioni d'acqua si è analizzato il gruppo con variazione del FIR, evidenziate nella seguente tabella.

<b>ID. Prova</b>	<b><math>W_{TOT}</math> (%)</b>	<b>FIR (%)</b>	<b>FER</b>	<b>C (%)</b>
1	11	30	20	1,1
2	13	30	20	1,1
3	15	30	20	1,1
4	9	30	20	1,1
5	11	0	0	0
6	11	50	20	1,1
7	11	10	20	1,1
8	11	20	20	1,1
9	11	40	20	1,1
10	9	0	0	0
11	13	0	0	0
12	15	0	0	0
13	11	30	15	1,1
14	11	30	10	1,1
15	11	20	10	1,1
16	11	40	10	1,1
17	11	20	15	1,1
18	11	40	15	1,1
19	13	20	20	1,1
20	9	20	20	1,1

Tabella 51: Prove effettuate variando il FIR

Si riportano di seguito i grafici rappresentativi del comportamento dei ciottoli e poi del fine al variare dell'inclinazione dello scivolo.

### Ciottoli in vasca al variare del FIR

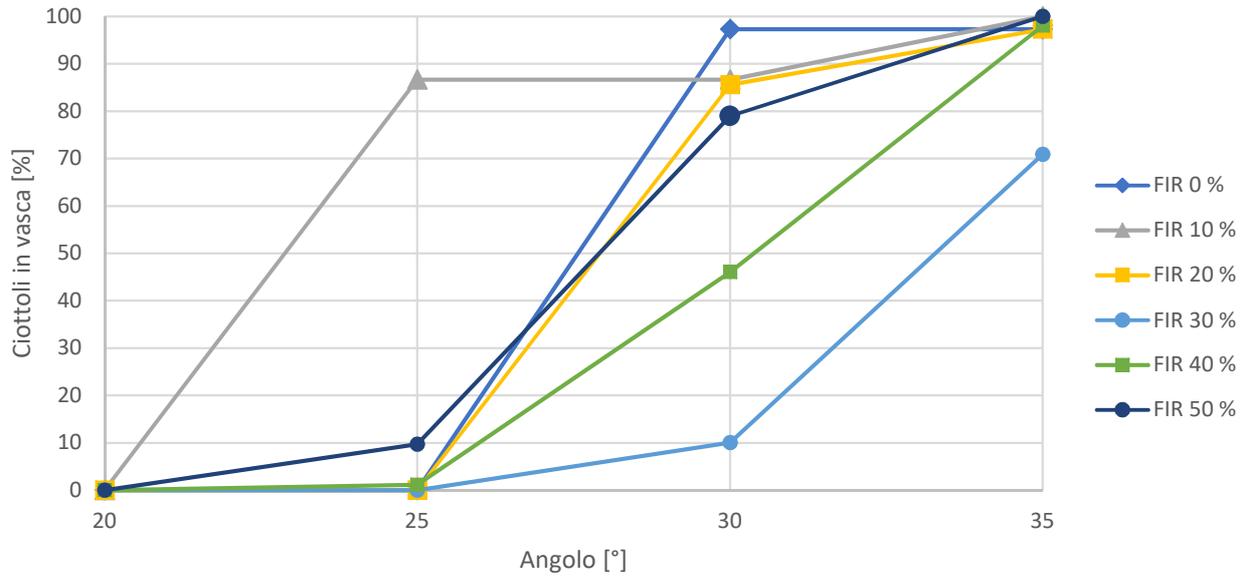


Figura 75: Ciottoli in vasca al variare del FIR

### Fine in vasca al variare del FIR

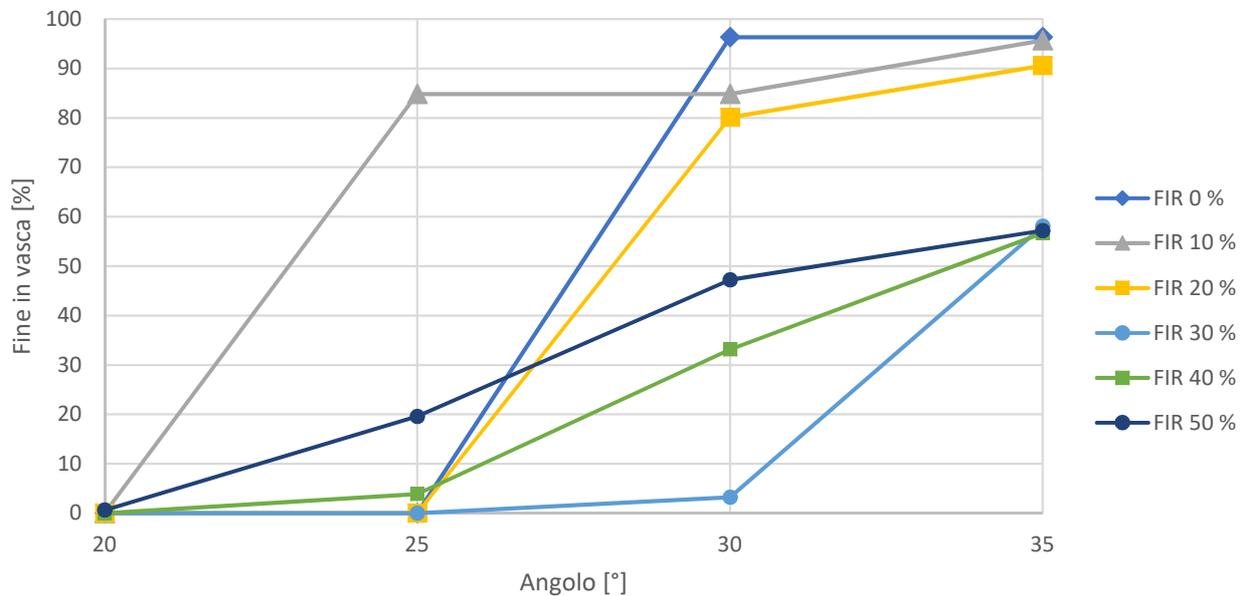


Figura 76: Fine in vasca al variare del FIR

Ponendo a confronto le prove con variazione del FIR si nota per quanto riguarda i ciottoli le prove con comportamento migliore risultano quelle a FIR 30% e 40%, le altre mostrano un comportamento

### Valutazione del condizionamento per lo scavo con EPB in terreni con presenza di ciottoli

rigido; il fine invece mostra una netta distinzione tra le prove rigide a FIR 0%,10%,20%, mentre le prove con comportamento positivo mostrano circa il 50%-60% di fine sullo scivolo a fine prova.

#### 5.4.4.3 Prove con variazione dell'acqua totale senza schiuma

Si evidenziano di seguito le prove effettuate variando solamente l'acqua e senza aggiungere schiuma.

ID. Prova	$W_{TOT}$ (%)	FIR (%)	FER	C (%)
1	11	30	20	1,1
2	13	30	20	1,1
3	15	30	20	1,1
4	9	30	20	1,1
5	11	0	0	0
6	11	50	20	1,1
7	11	10	20	1,1
8	11	20	20	1,1
9	11	40	20	1,1
10	9	0	0	0
11	13	0	0	0
12	15	0	0	0
13	11	30	15	1,1
14	11	30	10	1,1
15	11	20	10	1,1
16	11	40	10	1,1
17	11	20	15	1,1
18	11	40	15	1,1
19	13	20	20	1,1
20	9	20	20	1,1

Tabella 52: Prove effettuate variando l'acqua totale, senza schiuma

Si riportano di seguito i grafici rappresentativi del comportamento dei ciottoli e poi del fine al variare dell'inclinazione dello scivolo.

**Ciottoli in vasca al variare dell'acqua totale (senza schiuma)**

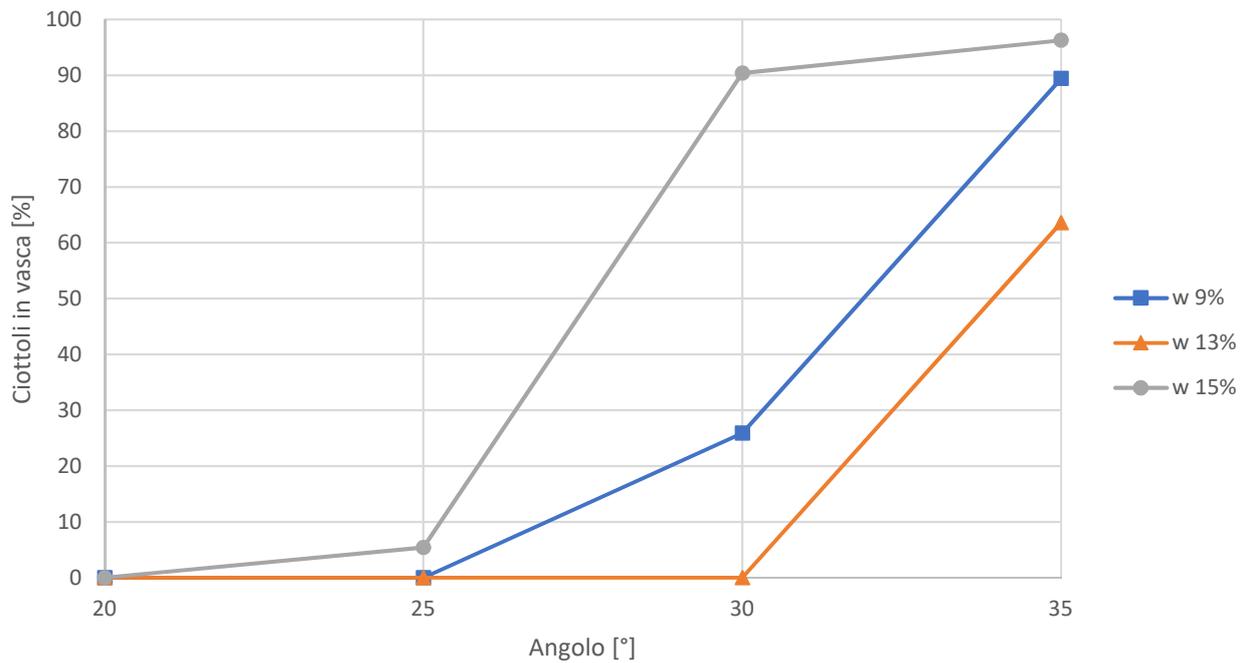


Figura 77: Ciottoli in vasca al variare dell'acqua totale, senza schiuma

**Fine in vasca al variare dell'acqua totale (senza schiuma)**

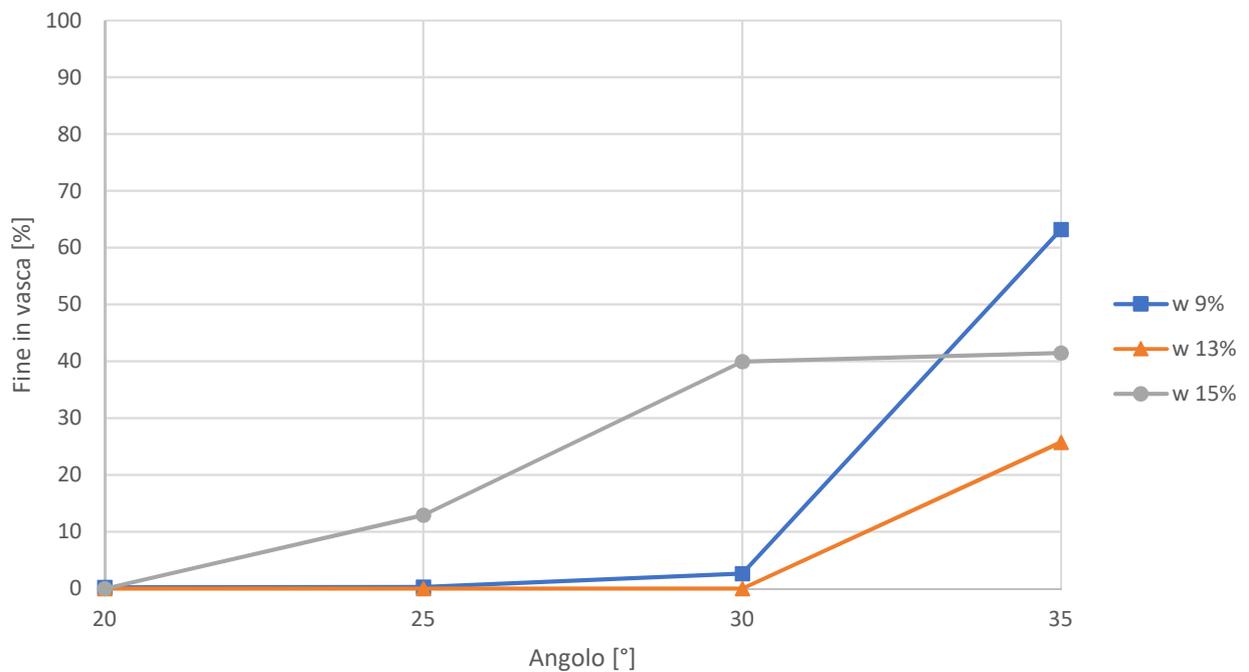


Figura 78: Fine in vasca al variare dell'acqua totale, senza schiuma

### Valutazione del condizionamento per lo scavo con EPB in terreni con presenza di ciottoli

Le prove senza schiuma hanno fornito risultati non soddisfacenti, a parte la prova al 13% d'acqua che mostra comunque un comportamento leggermente rigido; i ciottoli arrivano in vasca in percentuale compresa tra 60% e 100%, mentre il fine in percentuale inferiore al 50% nella prova significativa.

#### 5.4.4.4 Prove con variazione del FER

Si evidenziano di seguito le prove effettuate variando solamente il FER.

ID. Prova	$W_{TOT}$ (%)	FIR (%)	FER	C (%)
1	11	30	20	1,1
2	13	30	20	1,1
3	15	30	20	1,1
4	9	30	20	1,1
5	11	0	0	0
6	11	50	20	1,1
7	11	10	20	1,1
8	11	20	20	1,1
9	11	40	20	1,1
10	9	0	0	0
11	13	0	0	0
12	15	0	0	0
13	11	30	15	1,1
14	11	30	10	1,1
15	11	20	10	1,1
16	11	40	10	1,1
17	11	20	15	1,1
18	11	40	15	1,1
19	13	20	20	1,1
20	9	20	20	1,1

Tabella 53: Prova con variazione del FER

Si riportano di seguito i grafici rappresentativi del comportamento dei ciottoli e poi del fine al variare dell'inclinazione dello scivolo.

### Ciottoli in vasca al variare del FER

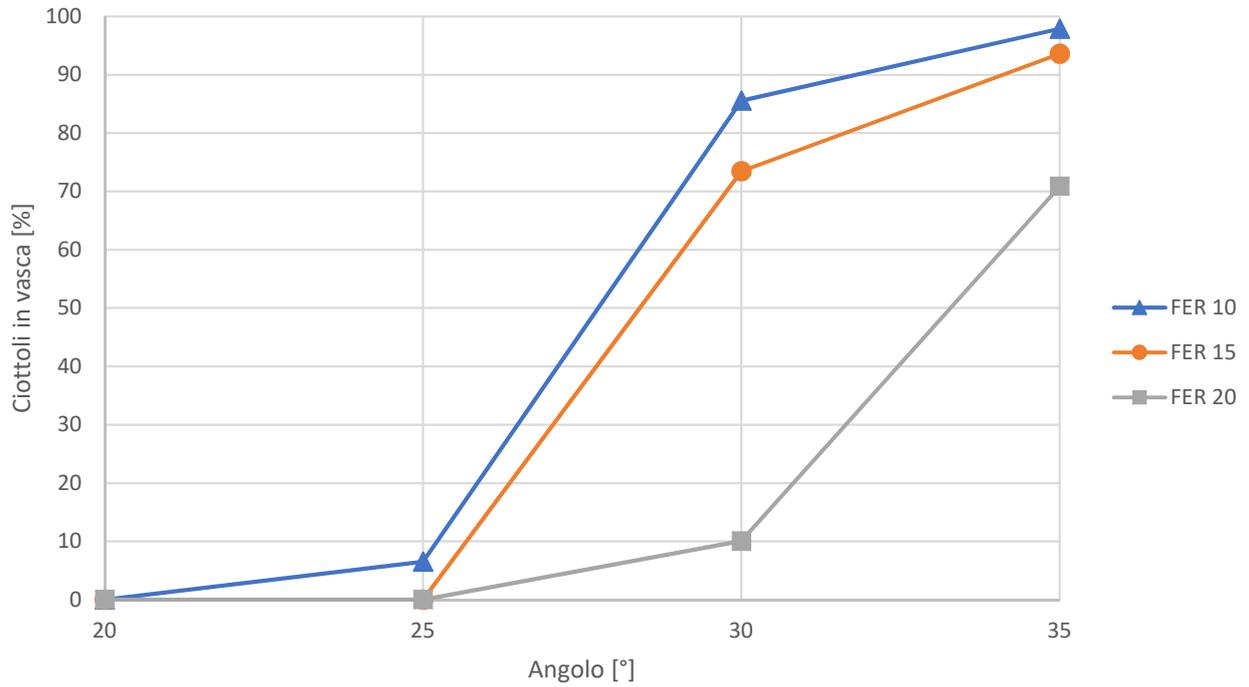


Figura 79: Ciottoli in vasca al variare del FER

### Fine in vasca al variare del FER

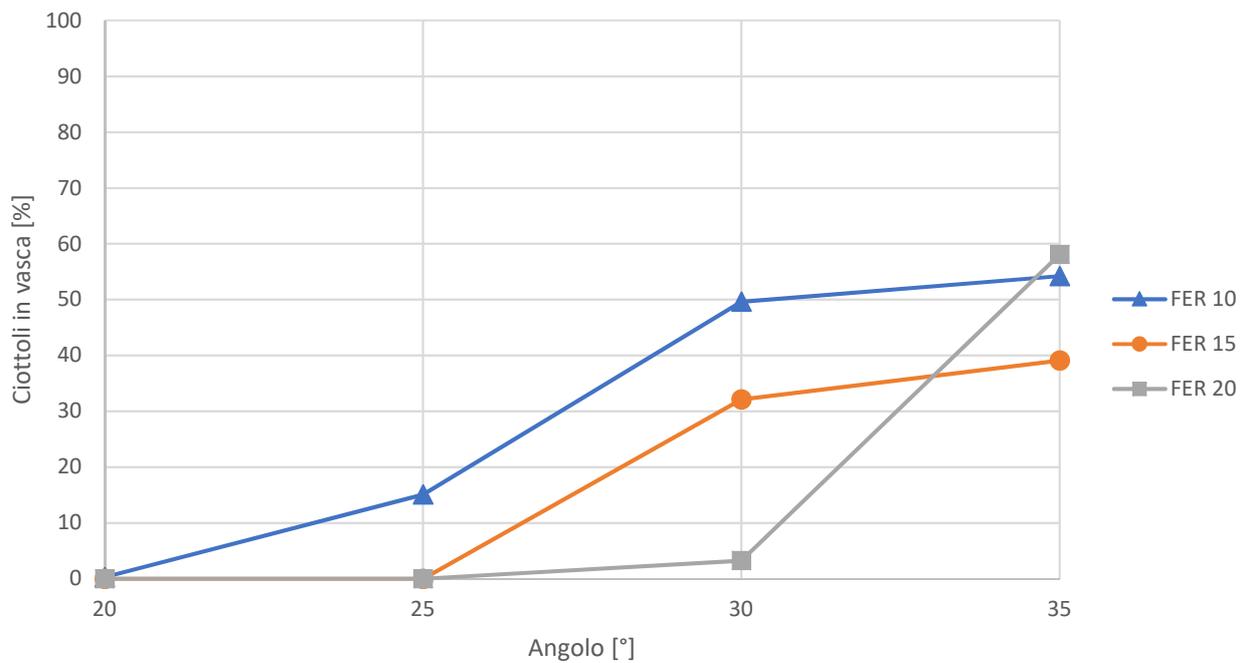


Figura 80: Fine in vasca al variare del FER

### Valutazione del condizionamento per lo scavo con EPB in terreni con presenza di ciottoli

Le prove con variazione di FER mostrano, se comparate, un miglior comportamento a FER 20 rispetto a 10 e 15 dove invece risulta rigido.

#### 5.4.4.5 Prove con variazione del FIR con FER 15

Si evidenziano di seguito le prove effettuate variando il FIR a FER 15

ID. Prova	$W_{TOT}$ (%)	FIR (%)	FER	C (%)
1	11	30	20	1,1
2	13	30	20	1,1
3	15	30	20	1,1
4	9	30	20	1,1
5	11	0	0	0
6	11	50	20	1,1
7	11	10	20	1,1
8	11	20	20	1,1
9	11	40	20	1,1
10	9	0	0	0
11	13	0	0	0
12	15	0	0	0
<b>13</b>	<b>11</b>	<b>30</b>	<b>15</b>	<b>1,1</b>
14	11	30	10	1,1
15	11	20	10	1,1
16	11	40	10	1,1
<b>17</b>	<b>11</b>	<b>20</b>	<b>15</b>	<b>1,1</b>
<b>18</b>	<b>11</b>	<b>40</b>	<b>15</b>	<b>1,1</b>
19	13	20	20	1,1
20	9	20	20	1,1

Tabella 54: Prove con variazione di FIR a FER 15

Si riportano di seguito i grafici rappresentativi del comportamento dei ciottoli e poi del fine al variare dell'inclinazione dello scivolo.

### Ciottoli in vasca al variare del FIR con FER 15

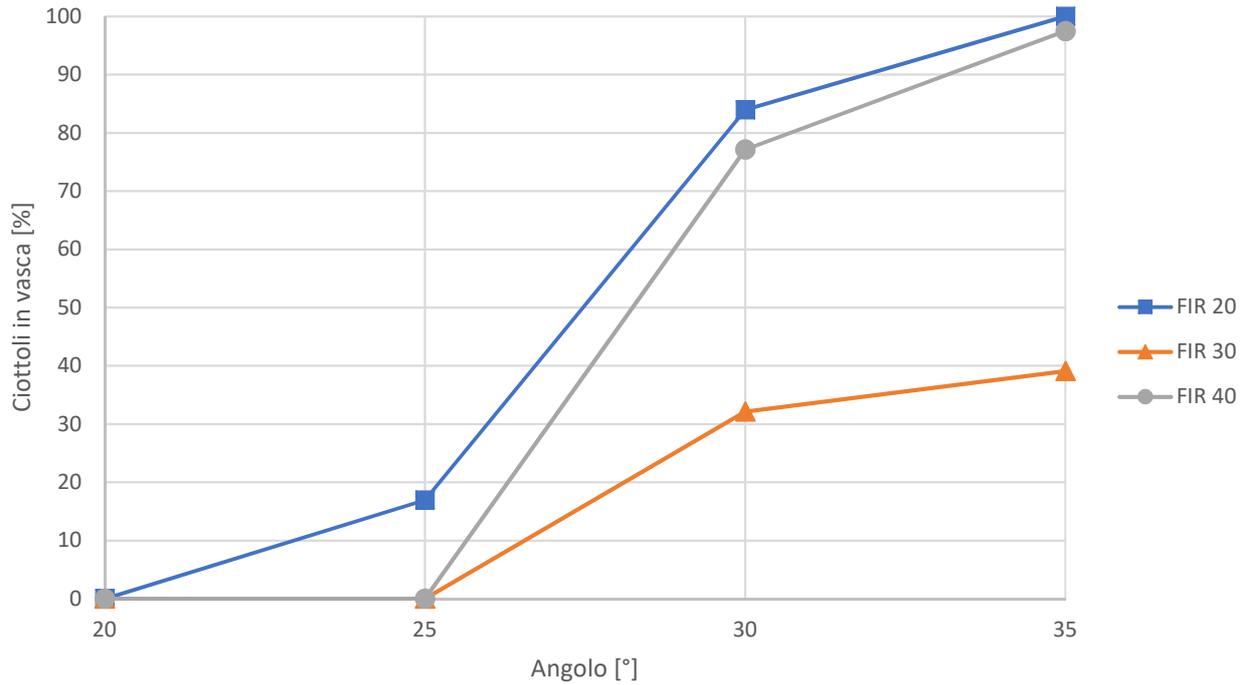


Figura 81: Ciottoli in vasca al variare del FIR con FER 15

### Fine in vasca al variare del FIR con FER 15

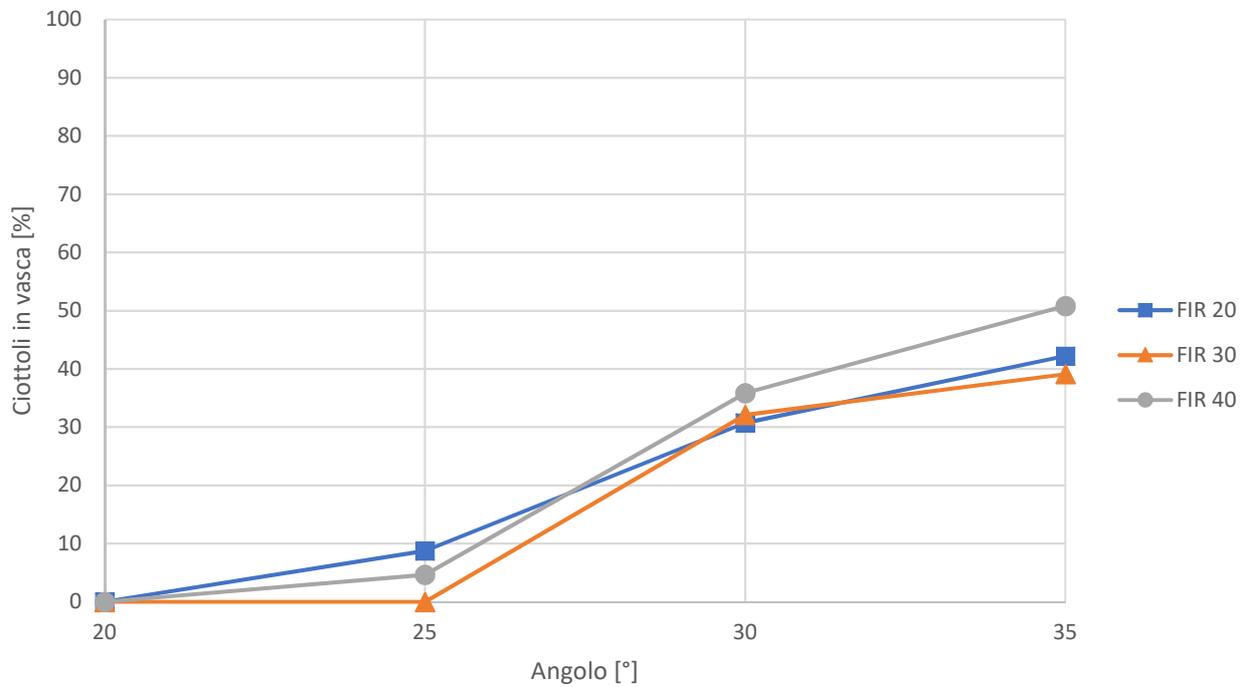


Figura 82: Fine in vasca al variare del FIR con FER 15

### Valutazione del condizionamento per lo scavo con EPB in terreni con presenza di ciottoli

Osservando le prove comparate si nota che il fine che al termine della prova rimane sullo scivolo risulta intorno al 50% , mentre i ciottoli si ritrovano in vasca per il 100% nelle prove a FIR 20% e 40% mentre per il 50% nella prova a FIR 30%.

#### 5.4.4.6 Prove con variazione del FIR con FER 10

Si evidenziano di seguito le prove effettuate variando il FIR a FER 10

ID. Prova	$W_{TOT}$ (%)	FIR (%)	FER	C (%)
1	11	30	20	1,1
2	13	30	20	1,1
3	15	30	20	1,1
4	9	30	20	1,1
5	11	0	0	0
6	11	50	20	1,1
7	11	10	20	1,1
8	11	20	20	1,1
9	11	40	20	1,1
10	9	0	0	0
11	13	0	0	0
12	15	0	0	0
13	11	30	15	1,1
<b>14</b>	<b>11</b>	<b>30</b>	<b>10</b>	<b>1,1</b>
<b>15</b>	<b>11</b>	<b>20</b>	<b>10</b>	<b>1,1</b>
<b>16</b>	<b>11</b>	<b>40</b>	<b>10</b>	<b>1,1</b>
17	11	20	15	1,1
18	11	40	15	1,1
19	13	20	20	1,1
20	9	20	20	1,1

Tabella 55: Prove con variazione di FIR a FER 10

Si riportano di seguito i grafici rappresentativi del comportamento dei ciottoli e poi del fine al variare dell'inclinazione dello scivolo.

**Ciottoli in vasca al variare del FIR con FER 10**

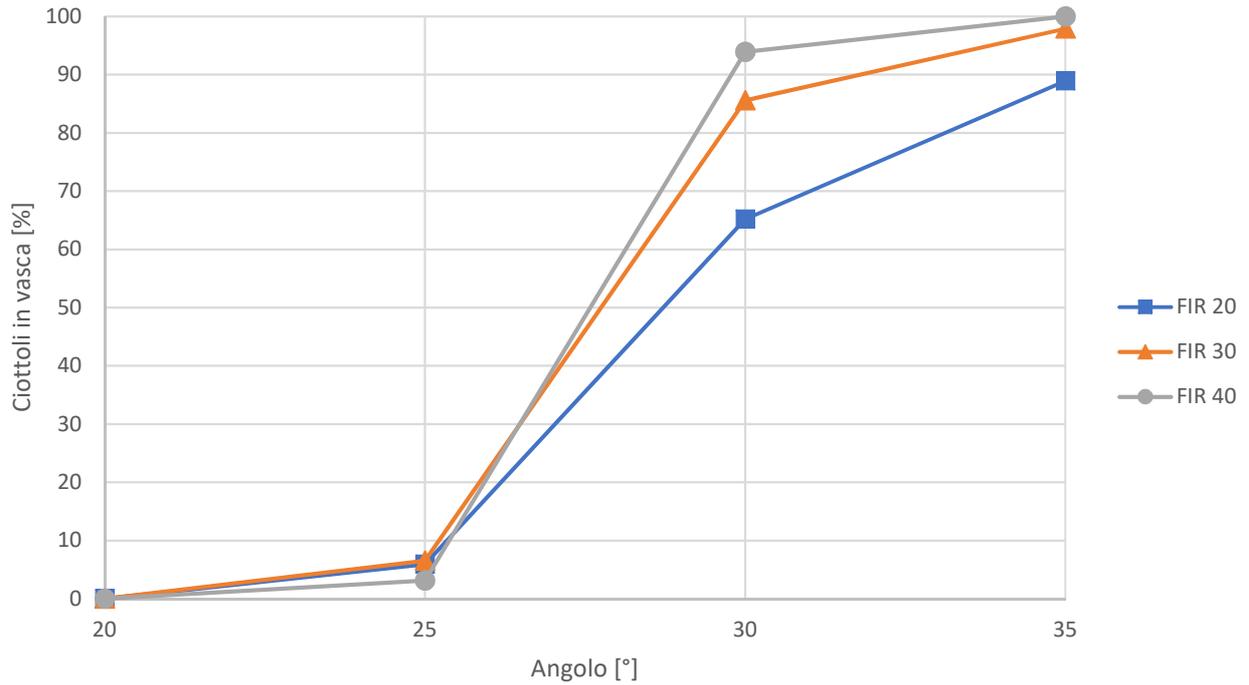


Figura 83: Ciottoli in vasca al variare del FIR con FER 10

**Fine in vasca al variare del FIR con FER 10**

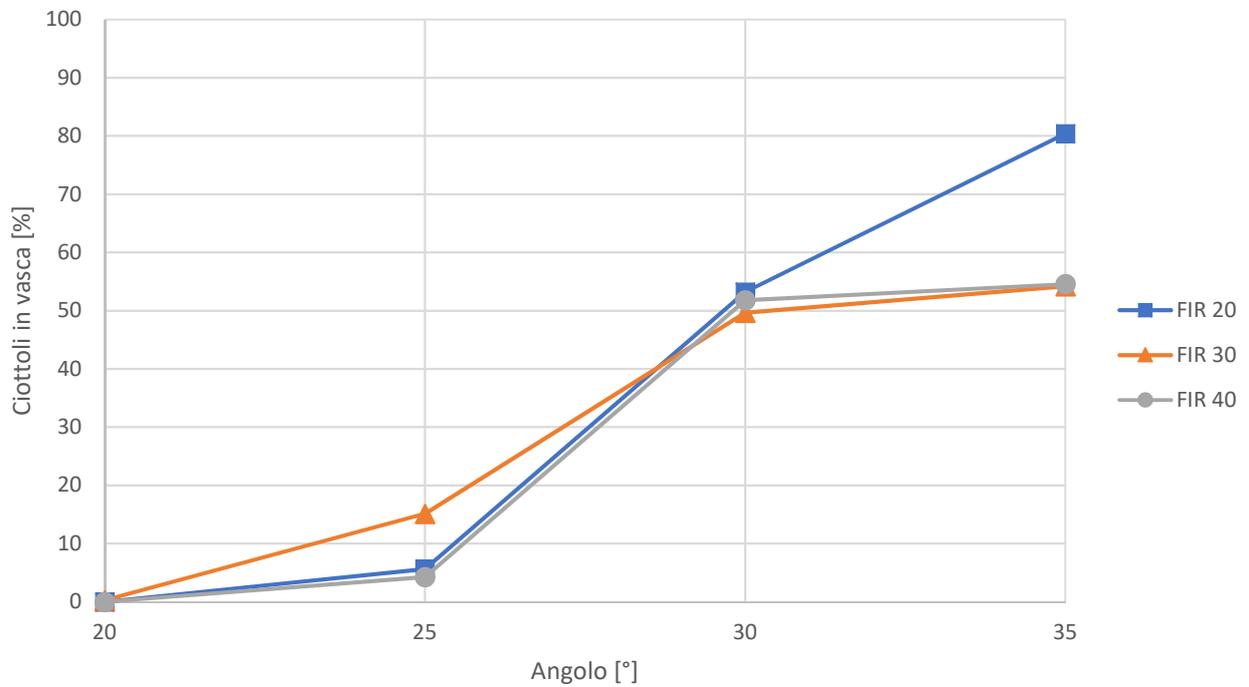


Figura 84: Fine in vasca al variare del FIR con FER 10

Dalle prove si nota come i ciottoli siano scesi in vasca in percentuali simili, mentre il fine tra 50% e 60% a FIR 30% e 40% mentre circa 80% nella prova a FIR 20%.

La riduzione di FIR ha quindi causato un aumento di fine in vasca, che tende a solidarizzarsi maggiormente ai ciottoli e ad essere trasportato in vasca più facilmente.

#### 5.4.5 Definizione di un criterio di valutazione

Dopo aver effettuato tutte le prove, sulla base dei risultati ottenuti si sono individuati alcuni indici caratteristici del comportamento del campione; i primi sono indici di moto,  $IM_c$  relativo ai ciottoli ed  $IM_f$  relativo al fine. Si definisce il materiale cumulato giunto in vasca in percentuale rispetto al totale tramite la seguenti equazioni, con C associato ai ciottoli ed F al fine:

$$\%F_i = \frac{\sum_{i=1}^j f_i}{\sum_{i=1}^5 f_i} \cdot 100$$

$$\%C_i = \frac{\sum_{i=1}^j c_i}{\sum_{i=1}^5 c_i} \cdot 100$$

Dove:

- $f_i$  = quantità misurata in grammi di fine che ha raggiunto la vasca all'i-esima inclinazione
- $c_i$  = quantità misurata in grammi di ciottoli che hanno raggiunto la vasca all'i-esima inclinazione
- $i=0$  corrispondente a 20°,  $i=1$  corrispondente a 25°,  $i=2$  corrispondente a 30° , $i=4$  corrispondente a 35° e  $i=5$  corrispondente al totale del campione dato da materiale rimasto sullo scivolo a fine prova sommato al materiale che ha raggiunto la vasca.

Di seguito si riportano le relazioni che definiscono gli indici di moto  $IM_f$  ed  $IM_c$  .

$$\%IM_f = \%F_3 - \%F_2$$

$$\%IM_c = \%C_3 - \%C_2$$

L'indice IM descrive la differenza espressa in percentuale tra il fine giunto in vasca a 30° e 25° e tra i ciottoli giunti in vasca a 25° e 30°; si è scelta tale transizione in quanto è risultata, nelle prove a comportamento rigido, soggetta ad una differenza elevata tra il fine cumulato in vasca a 30° e 25° e lo stesso per quanto riguarda i ciottoli. Tale caratteristica si manifesta quando il moto del campione avviene sotto forma di blocco unico e nel momento in cui viene superato l'angolo d'attrito tra il blocco e lo scivolo, si ha lo scivolamento rapido delle massa in vasca. Il valore limite di  $\%IM_c$  è stato definito pari a 75 mentre per  $\%IM_f$  è pari a 60.

Un altro indicatore importante della qualità del comportamento del campione è legato alla percentuale di fine che ha raggiunto la vasca a fine prova; si è individuato il seguente limite in cui deve ricadere la percentuale di fine per ottenere un comportamento accettabile. Si definisce il fine cumulato giunto in vasca in percentuale rispetto al totale tramite la seguente equazione:

$$\%F_i = \frac{\sum_{i=1}^j f_i}{\sum_{i=1}^5 f_i} \cdot 100$$

Dove:

i=1 corrisponde a 20°

i=2 corrisponde a 25°

i=3 corrisponde a 30°

i=4 corrisponde a 35° (fine prova)

i=5 corrisponde al totale dato dal materiale rimasto sullo scivolo sommato al materiale in vasca

Di seguito si riporta il limite individuato per la percentuale di materiale fine che ha raggiunto la vasca al termine della prova.

$$\%F_4 < 70$$

Se non si rispetta questa condizione si incorre in un comportamento rigido dove il fine e i ciottoli costituiscono un blocco unico e di conseguenza raggiungono la vasca in maniera concorde in un rapido cinematismo al superamento dell'angolo di attrito all'interfaccia tra scivolo e blocco.

L'ultima prova per determinare l'idoneità del campione testato sullo scivolo è lo Slump Test; si è deciso di eseguire un test di slump per ognuna delle prove TST in modo da confrontare il

*Valutazione del condizionamento per lo scavo con EPB in terreni con presenza di ciottoli*

comportamento dello stesso campione nelle due diverse prove. Tale scelta ha permesso di aggiungere un termine di valutazione ulteriore rispetto agli indici di rigidità e sul fine e di poter determinare l' idoneità del campione di materiale condizionato analizzato.

Di seguito si riporta la tabella con le prove eseguite, con gli indici caratteristici e il valore di slump ottenuto; per ognuno dei campioni se ne definisce l' idoneità o l' inadeguatezza. Tutti i test TST eseguiti con i relativi slump test sono riportati nei report riassuntivi dalla tabella n° 57 alla n° 77.

Valutazione del condizionamento per lo scavo con EPB in terreni con presenza di ciottoli

PROVA	%IM <sub>C</sub>	%IM <sub>F</sub>	%F <sub>4</sub>	SLUMP	Idoneità
1	10,1	3,2	58	16	si
2	39,4	25	48	23	si
3	25,9	13,7	62	25	no
4	<b>89,5</b>	<b>88,8</b>	<b>96</b>	<b>10</b>	<b>no</b>
5	<b>97,3</b>	<b>96,3</b>	<b>96</b>	<b>4</b>	<b>no</b>
6	69,2	27,6	57	16	si
7	0	0	<b>96</b>	<b>x</b>	<b>no</b>
8	<b>85,6</b>	<b>80,1</b>	<b>91</b>	<b>2</b>	<b>no</b>
9	44,9	29,3	57	21	si
10	25,9	2,4	63	<b>x</b>	<b>no</b>
11	0	0	26	<b>14</b>	<b>no</b>
12	<b>85</b>	27	41	23	<b>no</b>
13	<b>73,4</b>	32,1	39	21	<b>no</b>
14	<b>79</b>	34,5	54	23	<b>no</b>
15	59,3	47,6	<b>80</b>	<b>14</b>	<b>no</b>
16	<b>90,7</b>	47,5	55	23	<b>no</b>
17	67	22	42	22	si
18	<b>77,1</b>	31,2	51	23	<b>no</b>
19	69,1	35,1	55	21	si
20	30,3	3,6	65	<b>x</b>	<b>no</b>

Tabella 56: Classificazione delle prove TST

Di seguito si riporta un report riassuntivo con le immagini e i parametri relativi ad ogni prova.

Valutazione del condizionamento per lo scavo con EPB in terreni con presenza di ciottoli

<b>Prova n°1</b>				
<b>%IM<sub>C</sub></b>	<b>%IM<sub>F</sub></b>	<b>%F<sub>4</sub></b>	<b>SLUMP (cm)</b>	<b>Idoneità</b>
10.1	3.2	58	16	si
<b>Report fotografico</b>				
<b>20°</b>	<b>25°</b>	<b>30°</b>	<b>35°</b>	<b>Slump Test</b>
				

Tabella 57: Report riassuntivo prova n°1

<b>Prova n°2</b>				
<b>%IM<sub>C</sub></b>	<b>%IM<sub>F</sub></b>	<b>%F<sub>4</sub></b>	<b>SLUMP (cm)</b>	<b>Idoneità</b>
39.4	25	48	23	si
<b>Report fotografico</b>				
<b>20°</b>	<b>25°</b>	<b>30°</b>	<b>35°</b>	<b>Slump Test</b>
				

Tabella 58: Report riassuntivo prova n°2

Valutazione del condizionamento per lo scavo con EPB in terreni con presenza di ciottoli

<b>Prova n°3</b>				
<b>%IM<sub>C</sub></b>	<b>%IM<sub>F</sub></b>	<b>%F<sub>4</sub></b>	<b>SLUMP (cm)</b>	<b>Idoneità</b>
25.9	13.7	62	25	no
<b>Report fotografico</b>				
<b>20°</b>	<b>25°</b>	<b>30°</b>	<b>35°</b>	<b>Slump Test</b>
				

Tabella 59: Report riassuntivo prova n°3

<b>Prova n°4</b>				
<b>%IM<sub>C</sub></b>	<b>%IM<sub>F</sub></b>	<b>%F<sub>4</sub></b>	<b>SLUMP (cm)</b>	<b>Idoneità</b>
89.5	88.8	96	10	no
<b>Report fotografico</b>				
<b>20°</b>	<b>25°</b>	<b>30°</b>	<b>35°</b>	<b>Slump Test</b>
				

Tabella 60: Report riassuntivo prova n°4

Valutazione del condizionamento per lo scavo con EPB in terreni con presenza di ciottoli

<b>Prova n°5</b>				
<b>%IM<sub>C</sub></b>	<b>%IM<sub>F</sub></b>	<b>%F<sub>4</sub></b>	<b>SLUMP (cm)</b>	<b>Idoneità</b>
<b>97.3</b>	<b>96.3</b>	<b>96</b>	<b>4</b>	<b>no</b>
<b>Report fotografico</b>				
<b>20°</b>	<b>25°</b>	<b>30°</b>	<b>35°</b>	<b>Slump Test</b>
				

Tabella 61: Report riassuntivo prova n°5

<b>Prova n°6</b>				
<b>%IM<sub>C</sub></b>	<b>%IM<sub>F</sub></b>	<b>%F<sub>4</sub></b>	<b>SLUMP (cm)</b>	<b>Idoneità</b>
<b>69.2</b>	<b>27.6</b>	<b>57</b>	<b>16</b>	<b>si</b>
<b>Report fotografico</b>				
<b>20°</b>	<b>25°</b>	<b>30°</b>	<b>35°</b>	<b>Slump Test</b>
				

Tabella 62: Report riassuntivo prova n°6

Valutazione del condizionamento per lo scavo con EPB in terreni con presenza di ciottoli

<b>Prova n°7</b>				
<b>%IM<sub>C</sub></b>	<b>%IM<sub>F</sub></b>	<b>%F<sub>4</sub></b>	<b>SLUMP (cm)</b>	<b>Idoneità</b>
0	0	96	x	no
<b>Report fotografico</b>				
<b>20°</b>	<b>25°</b>	<b>30°</b>	<b>35°</b>	<b>Slump Test</b>
				

Tabella 63: Report riassuntivo prova n°7

<b>Prova n°8</b>				
<b>%IM<sub>C</sub></b>	<b>%IM<sub>F</sub></b>	<b>%F<sub>4</sub></b>	<b>SLUMP (cm)</b>	<b>Idoneità</b>
85.6	80.1	91	2	no
<b>Report fotografico</b>				
<b>20°</b>	<b>25°</b>	<b>30°</b>	<b>35°</b>	<b>Slump Test</b>
				

Tabella 64: Report riassuntivo prova n°8

Valutazione del condizionamento per lo scavo con EPB in terreni con presenza di ciottoli

<b>Prova n°9</b>				
<b>%IM<sub>C</sub></b>	<b>%IM<sub>F</sub></b>	<b>%F<sub>4</sub></b>	<b>SLUMP (cm)</b>	<b>Idoneità</b>
44.9	29.3	57	21	si
<b>Report fotografico</b>				
<b>20°</b>	<b>25°</b>	<b>30°</b>	<b>35°</b>	<b>Slump Test</b>
				

Tabella 65: Report riassuntivo prova n°9

<b>Prova n°10</b>				
<b>%IM<sub>C</sub></b>	<b>%IM<sub>F</sub></b>	<b>%F<sub>4</sub></b>	<b>SLUMP (cm)</b>	<b>Idoneità</b>
25.9	2.4	63	x	no
<b>Report fotografico</b>				
<b>20°</b>	<b>25°</b>	<b>30°</b>	<b>35°</b>	<b>Slump Test</b>
				

Tabella 66: Report riassuntivo prova n°10

Valutazione del condizionamento per lo scavo con EPB in terreni con presenza di ciottoli

<b>Prova n°11</b>				
<b>%IM<sub>C</sub></b>	<b>%IM<sub>F</sub></b>	<b>%F<sub>4</sub></b>	<b>SLUMP (cm)</b>	<b>Idoneità</b>
0	0	26	14	no
<b>Report fotografico</b>				
<b>20°</b>	<b>25°</b>	<b>30°</b>	<b>35°</b>	<b>Slump Test</b>
				

Tabella 67: Report riassuntivo prova n°11

<b>Prova n°12</b>				
<b>%IM<sub>C</sub></b>	<b>%IM<sub>F</sub></b>	<b>%F<sub>4</sub></b>	<b>SLUMP (cm)</b>	<b>Idoneità</b>
85	27	41	23	no
<b>Report fotografico</b>				
<b>20°</b>	<b>25°</b>	<b>30°</b>	<b>35°</b>	<b>Slump Test</b>
				

Tabella 68: Report riassuntivo prova n°12

Valutazione del condizionamento per lo scavo con EPB in terreni con presenza di ciottoli

<b>Prova n°13</b>				
<b>%IM<sub>C</sub></b>	<b>%IM<sub>F</sub></b>	<b>%F<sub>4</sub></b>	<b>SLUMP (cm)</b>	<b>Idoneità</b>
73.4	32.1	39	21	si
<b>Report fotografico</b>				
<b>20°</b>	<b>25°</b>	<b>30°</b>	<b>35°</b>	<b>Slump Test</b>
				

Tabella 69: Report riassuntivo prova n°13

<b>Prova n°14</b>				
<b>%IM<sub>C</sub></b>	<b>%IM<sub>F</sub></b>	<b>%F<sub>4</sub></b>	<b>SLUMP (cm)</b>	<b>Idoneità</b>
79	34.5	54	23	no
<b>Report fotografico</b>				
<b>20°</b>	<b>25°</b>	<b>30°</b>	<b>35°</b>	<b>Slump Test</b>
				

Tabella 70: Report riassuntivo prova n°14

Valutazione del condizionamento per lo scavo con EPB in terreni con presenza di ciottoli

<b>Prova n°15</b>				
<b>%IM<sub>C</sub></b>	<b>%IM<sub>F</sub></b>	<b>%F<sub>4</sub></b>	<b>SLUMP (cm)</b>	<b>Idoneità</b>
59.3	47.6	80	14	no
<b>Report fotografico</b>				
<b>20°</b>	<b>25°</b>	<b>30°</b>	<b>35°</b>	<b>Slump Test</b>
				

Tabella 71: Report riassuntivo prova n°15

<b>Prova n°16</b>				
<b>%IM<sub>C</sub></b>	<b>%IM<sub>F</sub></b>	<b>%F<sub>4</sub></b>	<b>SLUMP (cm)</b>	<b>Idoneità</b>
90.7	47.5	55	23	no
<b>Report fotografico</b>				
<b>20°</b>	<b>25°</b>	<b>30°</b>	<b>35°</b>	<b>Slump Test</b>
				

Tabella 72: Report riassuntivo prova n°16

Valutazione del condizionamento per lo scavo con EPB in terreni con presenza di ciottoli

<b>Prova n°17</b>				
<b>%IM<sub>C</sub></b>	<b>%IM<sub>F</sub></b>	<b>%F<sub>4</sub></b>	<b>SLUMP (cm)</b>	<b>Idoneità</b>
67	22	42	22	si
<b>Report fotografico</b>				
<b>20°</b>	<b>25°</b>	<b>30°</b>	<b>35°</b>	<b>Slump Test</b>
				

Tabella 73: Report riassuntivo prova n°17

<b>Prova n°18</b>				
<b>%IM<sub>C</sub></b>	<b>%IM<sub>F</sub></b>	<b>%F<sub>4</sub></b>	<b>SLUMP (cm)</b>	<b>Idoneità</b>
77.1	31.2	51	23	no
<b>Report fotografico</b>				
<b>20°</b>	<b>25°</b>	<b>30°</b>	<b>35°</b>	<b>Slump Test</b>
				

Tabella 74: Report riassuntivo prova n°18

Valutazione del condizionamento per lo scavo con EPB in terreni con presenza di ciottoli

<b>Prova n°19</b>				
<b>%IM<sub>C</sub></b>	<b>%IM<sub>F</sub></b>	<b>%F<sub>4</sub></b>	<b>SLUMP (cm)</b>	<b>Idoneità</b>
69.1	35.1	55	21	si
<b>Report fotografico</b>				
<b>20°</b>	<b>25°</b>	<b>30°</b>	<b>35°</b>	<b>Slump Test</b>
				

Tabella 75: Report riassuntivo prova n°19

<b>Prova n°20</b>				
<b>%IM<sub>C</sub></b>	<b>%IM<sub>F</sub></b>	<b>%F<sub>4</sub></b>	<b>SLUMP (cm)</b>	<b>Idoneità</b>
30.3	3.6	65	x	no
<b>Report fotografico</b>				
<b>20°</b>	<b>25°</b>	<b>30°</b>	<b>35°</b>	<b>Slump Test</b>
				

Tabella 76: Report riassuntivo prova n°20

## 6 Conclusioni

Nel presente lavoro di tesi lo scopo è stato quello di individuare i parametri caratteristici dei Tilt Sliding Test al fine di valutare la possibilità di scavo con TBM-EPB in terreni con presenza di elementi grossolani; si è proceduto quindi con la valutazione del condizionamento ottimale eseguita sulla componente passante a 20 mm tramite slump test, successivamente si è deciso di indagare il comportamento del materiale con i Tilt Sliding Test al variare del condizionamento, nell'intorno delle condizioni ottimali, modificando inizialmente un parametro di condizionamento e successivamente fino ad un massimo di due rispetto all'ottimale nell'esecuzione delle prove.

Si è deciso durante la campagna di prove di eseguire per ogni campione oltre al Tilt Sliding Test, parallelamente lo slump test sulla componente passante a 20 mm dello stesso campione, in modo da associare ad una prova come il TST con una scarsa base di dati, una prova con maggiore affidabilità come lo slump test. Tale impostazione delle prove ha permesso di individuare alcuni indici caratteristici della prova TST e di riconoscere quindi come durante tali prove, per ottenere un materiale con caratteristiche adatte allo scavo con EPB dove la matrice fine trattiene i ciottoli e ne determina il comportamento, sia necessario ottenere i seguenti risultati:

- differenza di ciottoli in vasca tra 25° e 30° non superiore al 75% definita con l'indice  $\%IM_c$
- differenza di fine in vasca tra 25° e 30° non superiore al 60% definita con l'indice  $\%IM_f$
- percentuale di fine cumulato in vasca al termine della prova non superiore al 70% definita con l'indice  $\%F_4$ .
- slump test con risultato non inferiore a 15 cm.

Se tali condizioni non vengono completamente rispettate il campione viene classificato come non idoneo allo scavo con EPB; un materiale condizionato che non rientra nei limiti dei suddetti indici risulta rappresentativo di un comportamento rigido, quindi eccessivamente abrasivo per i componenti dell'EPB, oppure di un materiale in cui i ciottoli si separano dal fine e segregano in camera di scavo impedendone l'avanzamento e causando gravi problemi di gestione della macchina.

Tale risultato ha mostrato come la prova TST permetta di valutare il comportamento dinamico del campione escludendo i campioni non idonei e come sia complementare alla prova di slump nella definizione del condizionamento ottimale in terreni con presenza di elementi grossolani; le due prove se eseguite parallelamente garantiscono migliore precisione nell'analisi dei dati in quanto

alcune prove che non sono idonee nella prova di slump possono invece rispettare gli indici della prova TST e lo stesso può accadere a parti invertite.

Il risultato di questa tesi fornisce una procedura per impostare una campagna di condizionamento in caso di terreno con la presenza di elementi grossolani; per ulteriori sviluppi della prova TST sarà necessario effettuare campagne di test su terreni differenti in modo da ampliare la base di dati disponibile e definire nuovi indici o affinare quelli già individuati, tali campagne dovranno comunque prevedere, per una migliore affidabilità della prova, l'esecuzione di uno slump test sul passante a 20 mm per ogni Tilt Sliding Test eseguito.

## 7 Bibliografia

Use the "Insert Citation" button to add citations to this document.

Peila, D., Oggeri, C., & Borio, L. (2009). Using the slump test to assess the behavior of conditioned soil for EPB tunneling. *Environmental and Engineering Geoscience*, 15(3), 167–174.

<https://doi.org/10.2113/gseegeosci.15.3.167>

Zhang, Y.-J., Hu, C.-M., Mei, Y., Ye, Z.-W., & Liu, Z. (2017). *Research on soil conditioning experiments of EPB shield by excavating sandy cobble strata. Journal of the Balkan Tribological Association* (Vol. 23).

Thewes, M., Budach, C., & Bezuijen, A. (2012). Foam conditioning in EPB tunnelling. *Geotechnical Aspects of Underground Construction in Soft Ground*, (September), 127–135.

<https://doi.org/10.1201/b12748-19>

Magistrale, L., Prof, D. E. L., Pelizza, S., Sebastiano, P., Magistrale, L., Prof, D. E. L., & Pelizza, S. (2011). La Geo-ingegneria al Politecnico di Torino Earth Pressure Balance e condizionamento del terreno.

Maidl, B., Thewes, M., & Maidl, U. (2013). Mechanised tunnelling. *Handbook of Tunnel Engineering, I: Structu*, 285–378.

Efnarc. (2005). Specification and Guidelines for the use of specialist products for Mechanised Tunnelling ( TBM ) in Soft Ground and Hard Rock, 44(April), 1–45.

Zhou, H., Gao, Y., Zhang, C., Yang, F., Hu, M., Liu, H., & Jiang, Y. (2018). *A 3D model of coupled hydro-mechanical simulation of double shield TBM excavation. Tunnelling and Underground Space Technology* (Vol. 71). <https://doi.org/10.1016/j.tust.2017.07.012>

Mohammed, J. (2017). *NUMERICAL MODELLING FOR CIRCLE TUNNEL UNDER STATIC AND DYNAMIC LOADS FOR DIFFERENT DEPTH. RESEARCH JOURNAL OF MINING* (Vol. 1).

Hammerer, N. (n.d.). Influence of steering actions by the machine operator on the interpretation of TBM performance data.

Langmaack, L. (2000). Advanced Technology of Soil Conditioning in EPB Shield Tunnelling. *North American Tunneling*, 0(1), 1–18. Retrieved from <http://langmaacks.eu/assets/paper-mbt.pdf>

Barbero, M., Peila, D., & Mignelli, C. (2012). Test procedure for assessing the influence of soil conditioning for EPB tunneling on the tool wear Test procedure for assessing the influence of soil conditioning for EPB tunneling on the tool wear, (April).

Jiang, H.-T., Gong, Q.-M., & Du, X.-L. (2013). *Experimental study on soil conditioning in cobble layer by use of earth pressure balanced machine. Yantu Gongcheng Xuebao/Chinese Journal of Geotechnical Engineering* (Vol. 35).

(partial shield) supports the rock behind the cutterhead. (n.d.), 3000.

Tunnelling, T. B. M. (2012). A General Overview on Tunnel Boring Machines, (January), 1–27.

First-use-in-tunnelling-of-a-vacuum-segment-erector @ [www.tunneltalk.com](http://www.tunneltalk.com). (n.d.). Retrieved from <https://www.tunneltalk.com/First-use-in-tunnelling-of-a-vacuum-segment-erector.php>

Thewes, M., & Budach, C. (2010). *Parameters for Soil Conditioning with Foam in Coarse-Grained Soils with EPB-Shields. Proceedings of World Tunnel Congress 2010.*

Zumsteg, R., & Langmaack, L. (2017). Mechanized Tunneling in Soft Soils: Choice of Excavation Mode and Application of Soil-Conditioning Additives in Glacial Deposits. *Engineering*, 3(6), 863–870. <https://doi.org/10.1016/j.eng.2017.11.006>

Jancsecz, S., Krause, R., & Langmaack, L. (1999). Advantages of soil conditioning in shield tunnelling: experiences of LRTS Izmir. *Proceedings ITA-AITES World Tunnel Congress*, (January 1999), 1–11.

## 8 Ringraziamenti

Al termine dei due anni di laurea magistrale sento di dover ringraziare di cuore la mia famiglia, in particolare papà, mamma e mio fratello che mi hanno sempre sostenuto, permettendomi di seguire il percorso che da sempre ho desiderato. Ringrazio inoltre tutti i miei compagni di corso con cui ho condiviso questo bellissimo periodo della mia vita, in particolare Pietro e Edoardo con cui ho condiviso tutto il percorso di studi, e grazie ai quali ho potuto affrontare il percorso universitario superando insieme le difficoltà che si sono presentate.

Al termine di questo viaggio che mi ha portato alla Laurea Magistrale voglio ringraziare anche Giovanni e Gabriele e tutti gli amici della montagna con cui ho condiviso gran parte del mio tempo libero negli ultimi anni.

Durante il periodo di scrittura della tesi sono stato inserito nel gruppo di ricerca del Professor Peila, che ringrazio per il supporto e la possibilità di sperimentare l'attività di ricerca del laboratorio TUSC; in particolare voglio ringraziare Andrea C. che con la sua disponibilità mi è stato vicino nella stesura della tesi e nelle prove di laboratorio e ringrazio anche Daniele, Andrea L. e Carmine.

Infine voglio ringraziare la mia ragazza Margherita, che mi è sempre stata vicina in questo percorso sopportandomi e supportandomi nelle difficoltà e nei bei momenti che questo stupendo percorso mi ha regalato.