

ALLEGATO 5

Rapporto di prova finale delle “Prove comparative di condizionamento dei terreni” effettuate dal Politecnico di Torino – Luglio 2010



POLITECNICO DI TORINO

TUSC – Centro per le Gallerie e lo Spazio Sotterraneo

Dipartimento di Ingegneria del Territorio, dell’Ambiente e delle Geotecnologie

Contratto di Ricerca n°436/2010
Committente: SPEA Ingegneria Europea

**Prove comparative di condizionamento dei terreni
attraversati dalla galleria “Santa Lucia” per
l’applicazione dello scavo meccanizzato di gallerie con
tecnologia EPB**

RAPPORTO FINALE

Responsabile scientifico:

Prof. Ing. Daniele Peila

Gruppo di lavoro:

Prof. Ing. Daniele Peila

Prof. Ing. Sebastiano Pelizza

Dott. Ing. Luca Borio

Ing. Andrea Picchio

Luglio 2010



INDICE

1. Premessa	4
2. Caratteristiche del terreno indagato	5
2.1 Formazione di Sillano (SIL).....	5
2.2 Formazione di Monte Morello (MML).....	5
3. Prove per lo studio del condizionamento a mezzo di schiume.....	8
3.1 Generatore di schiuma adottato.....	8
3.2 Parametri di caratterizzazione della schiuma	9
3.3 Prova per la determinazione del tasso di espansione (Foam Expansion Ratio – FER).....	10
3.4 Caratterizzazione dell'agente schiumogeno utilizzato mediante determinazione del tempo di semivita della schiuma (t_{50}).....	10
4. Prove di slump per lo studio del condizionamento a mezzo di schiume.....	12
4.1 Test di caratterizzazione del materiale condizionato	12
4.2 Caratterizzazione del terreno condizionato con schiuma impostato secondo la procedura definita nel laboratorio TUSC	13
4.3 Prove di slump effettuate sulla formazione Monte Morello	14
4.3.1. Prove di slump realizzate con l'agente schiumogeno A.....	14
4.3.2. Conclusioni sulle prove di slump realizzate con l'agente schiumogeno A.	18
4.3.3. Prove di slump realizzate con l'agente schiumogeno B	19
4.3.4. Conclusioni sulle prove di slump realizzate con l'agente schiumogeno B.....	22
4.4 Prove di slump effettuate sulla formazione Sillano	23
4.4.1. Prove di slump realizzate con l'agente schiumogeno A	23
4.4.2. Conclusioni sulle prove di slump realizzate con l'agente schiumogeno A.	26
4.4.3. Prove di slump realizzate con l'agente schiumogeno C	28
4.4.4. Conclusioni sulle prove di slump realizzate con l'agente schiumogeno C.....	31
4.5 Diagrammi riassuntivi sulle prove di slump eseguite	32
5. Prove di estrazione controllata con coclea da camera in pressione.....	33
5.1. Caratteristiche dell'apparato sperimentale di estrazione mediante coclea.....	33
5.2. Prove di taratura dell'apparato sperimentale di estrazione	41
5.2.1. Pressioni all'interno della camera.....	42
5.2.2. Coppia della coclea	43
5.2.3. Spostamento del piattello di carico	44
5.2.4. Peso del materiale estratto	45
5.2.5. Pressioni lungo coclea	46
5.2.6. Conclusioni sulle prove di verifica	47
5.3. Prove di estrazione controllata sulla formazione Monte Morello.....	48
5.3.1 Parametri di condizionamento utilizzati per le prove di estrazione sulla formazione Monte Morello (MML).....	48
5.3.2 Risultati ottenuti dalle prove di estrazione controllata sulla formazione Monte Morello.....	48
5.3.3 Prova MML – A.....	49
5.3.4 Prova MML – B.....	54
5.3.5 Commenti finali e confronto delle prove effettuate sulla formazione Monte Morello.....	59
5.4. Prove di estrazione controllata sulla formazione Sillano	62



5.4.1 Parametri di condizionamento utilizzati per le prove di estrazione sulla formazione Sillano.....	62
5.4.2 Risultati ottenuti dalle prove di estrazione controllata sulla formazione Sillano	62
5.4.3 Prova SIL– A	63
5.4.4 Prova SIL– B	68
5.4.5 Commenti finali e confronto delle prove effettuate sulla formazione Sillano..	73
6. Prove di compattazione Proctor modificata	76
6.1 Prove Proctor modificata sulla formazione Monte Morello	76
6.1.1. Prove Proctor sulla formazione Monte Morello naturale	76
6.1.2. Prove Proctor sulla formazione “Monte Morello” condizionata per mezzo di schiume.	78
6.2 Prove Proctor modificata sulla formazione Sillano	80
6.2.1. Prove Proctor sulla formazione Sillano naturale	80
6.2.2. Prove Proctor sulla formazione Sillano condizionata per mezzo di schiume..	81
6.2.3. Prove Proctor sulla formazione Sillano condizionata per mezzo di schiume e stabilizzata con calce viva.....	83
7. Conclusioni.....	84
8. Bibliografia.....	86
ALLEGATO 1	88



1. Premessa

La presente relazione è stata sviluppata sulla base del contratto di ricerca tra SPEA Ingegneria Europea S.p.A. e il Politecnico di Torino, coordinato dal Prof. Daniele Peila e al quale hanno collaborato gli Ing. Luca Borio e Andrea Picchio e sotto la supervisione scientifica del Prof. Sebastiano Pelizza.

Le prove di laboratorio eseguite hanno seguito un procedura ampiamente consolidata e verificata dagli scriventi per numerose gallerie scavate o in fase di scavo con la tecnologia EPB nonché dalle ricerche comparative sviluppate da due tesi di dottorato e da numerose tesi di laurea presso il Politecnico di Torino.

Si è previsto quindi innanzitutto di eseguire una campagna di prove per differenti livelli di condizionamento per mezzo di schiume e contenuto d'acqua mediante prove di slump che sono, nella letteratura tecnica, riconosciute come una metodologia adeguata ad una valutazione preliminare della fattibilità del condizionamento dei terreni.

Successivamente i due terreni studiati (formazione del Monte Morello e formazione Sillano) sono stati sottoposti a prove di estrazione da camera in pressione mediante attrezzatura di estrazione con coclea sviluppata dal laboratorio TUSC – Gallerie e Opere in sotterraneo del Politecnico di Torino.

Queste prove consentono di verificare la capacità del terreno di applicare pressione nonché di riempire adeguatamente la coclea come richiesto per la corretta applicazione della tecnologia EPB. Ovviamente si tratta di prove a scala e pressioni ridotte rispetto alla situazione reale della macchina e quindi risentono necessariamente dei fattori di scala ed operativi (tempo e temperatura in camera di scavo) ma sono uno strumento efficace per indicare parametri e livelli di condizionamento di riferimento, che però devono sempre essere confermati durante le fasi operative della macchina mediante i sistemi di controllo di cui queste dispongono.

Questo anche in relazione al fatto che i terreni naturali variano lungo il tracciato ed è quindi sempre inevitabile adattare il condizionamento alle condizioni che via via si incontrano nella realtà. Si ritengono comunque i due campioni di materiali utilizzati rappresentativi del comportamento delle due principali formazioni che si incontreranno.

Si deve infine ricordare che le informazioni relative alla granulometria attesa del marino (la quale come ben noto influenza il condizionamento) sono derivate da informazioni bibliografiche fornite da alcuni casi reali che quindi, per quanto attendibili, potrebbero discostarsi rispetto a quello che sarà riscontrato durante lo scavo

I parametri che sono così definiti sono quindi da intendersi come un solido dato di partenza che consente di definire innanzitutto la fattibilità del condizionamento, indicando altresì i valori nell'intorno dei quali si dovrebbero ragionevolmente attestare i quantitativi di condizionante utilizzato, fatto salvo l'adattamento degli stessi in ragione di fattori di temperatura nella camera di scavo e di tempistiche operative.

Infine la ricerca ha previsto una serie di prove di compattazione dei terreni con e senza condizionamento, con e senza stabilizzazione a calce. Queste prove, forniscono indicazioni indiscutibili dell'evoluzione del sistema della bolle nel tempo, cioè dicono come e con che velocità il condizionamento decade, e danno indicazioni attendibili sulla possibilità di trattare il terreno condizionato con la calce prima della posa a rilevato.



2. Caratteristiche del terreno indagato

I terreni studiati sono rappresentativi delle due prevalenti formazioni geologiche che la galleria Santa Lucia attraverserà e sono rispettivamente la formazione argillitica denominata “Sillano” e la formazione calcarea denominata “Monte Morello”.

Di seguito si riporta una descrizione sintetica delle caratteristiche di entrambe le formazioni geologiche come trasmesso dai tecnici SPEA al Politecnico di Torino.

2.1 Formazione di Sillano (SIL)

Alternanza di argilliti prevalenti, marne grigie e nerastre, siltiti grigio scure con calcari e calcari marnosi grigi, calcareniti prevalentemente sottili, fini di colore grigio, grigio-verdastro, calcari silicei verdastri. Il colore di alterazione dei calcari e delle calcareniti è frequentemente bruno e/o verdastro con patine scure. Le argilliti presentano una struttura scagliosa. In alcuni sondaggi sono stati individuati dei livelli di breccie argillitiche. Frequentemente gli strati dei litotipi più competenti, a causa della tettonizzazione, non mostrano continuità laterale tale da permettere di tracciarne con certezza i limiti. Nei sondaggi eseguiti le porzioni marnoso siltose sono frequentemente molto foliate con diffusissime patine lucide e con fissilità simile a quella delle argilliti. Nell'area interessata dalla galleria Santa Lucia sono state distinte due litofacies, oltre al Sillano propriamente detto, come di seguito descritto:

Litofacies arenacea (SILar)

Alternanza pelitico arenacea di calcareniti ed arenarie in strati da sottili a spessi, marne argillose e siltose da compatte a foliate ed argilliti di color grigio e grigio scuro - nerastro. Subordinati calcari grigio chiari, al taglio fresco, e marrone giallastro con patine scure all'alterazione. Le calcareniti sono prevalentemente fini e subordinatamente medio - grossolane, di color grigio al taglio e marrone all'alterazione. Arenarie gradate da medio - fini a finissime, con impronte di fondo ben marcate abbastanza frequenti. Lo spessore della litofacies è di alcune decine di metri.

Litofacies marnoso - calcarea (SILmc)

Alternanza di marne grigie, grigio scure, calcari grigi ed argilliti. La continuità di questi corpi non è verificata ed i contatti con la Formazione di Sillano sono ritenuti tettonizzati.

2.2 Formazione di Monte Morello (MML)

Alternanza di calcari e calcari marnosi nocciola e grigio chiari da compatti a granulosi, talora con base calcarenitica, marne da avana a grigie e siltiti grigie talvolta scure. Localmente sono presenti calcilutiti e livelli di calcareniti, a grana fine o media, da sottili a medi, più frequenti verso la base della formazione, con impronte di fondo dovute a bioturbazione o ad impatto. I calcari e le marne mostrano un caratteristico colore biancastro all'alterazione. Talora sono presenti liste e livelli di selce scura. Nella successione tipica della formazione sono state riconosciute porzioni nelle quali la parte marnosa, spesso foliata, diventa prevalente; pertanto la formazione può anche essere costituita da un'alternanza di marne grigie e nerastre spesso molto foliate e siltiti, calcari grigi, argilliti scure e calcareniti subordinate. Talora all'interno della formazione sono segnalati spessori fino a decametrici di argilliti prevalenti, con calcareniti sottili e calcari subordinati.

Materiale prelevato ai fini delle prove

Per la formazione del Sillano, le prove hanno riguardato solo la frazione argillitica, prelevata dalla galleria Melarancio (in corso di costruzione nella Tratta B - Lotto 5 dell'Ampliamento alla Terza corsia dell'Autostrada A1 nel Tratto FI Nord-FI sud), eliminando eventuali elementi calcarei/arenacei, riservando ad un successivo affinamento lo studio delle condizioni di scavo mediante prelievo ed analisi di materiale costituito da, oltrech  da argilliti scagliose, anche da trovanti lapidei. (si ricorda infatti che, nel caso delle litofacies SILar e SILmc, la porzione litoide rappresenta un'importante componente)

Per la formazione Monte Morello le prove sono state eseguite su materiale prelevato dalla galleria Poggiosecco (in corso di costruzione nella Tratta B - Lotto 6 dell'Ampliamento alla Terza corsia dell'Autostrada A1 nel Tratto FI Nord-FI sud), miscelando uniformemente blocchi di soli calcari e marne, senza considerare le porzioni calcarenitiche che, sebbene non risultino prevalenti, possono essere presenti per  nella formazione tipica. Questa scelta non inficia comunque i risultati conseguiti dalle prove.

I campioni di roccia delle due formazioni da sottoporre a prova sono stati recapitati da parte di SPEA presso il Politecnico di Torino in blocchi di dimensioni decimetriche che sono stati ridotti di dimensione mediante frantumazione (manuale o con frantoio a mascelle) fino ad avere un contenuto di fine (< 1mm) dell'ordine del 12-15% (figure 1 e 2).

La curva granulometrica studiata rappresenta quella che potr  essere la "matrice" di roccia demolita dagli utensili (dischi) della testa di scavo con l'esclusione dei frammenti pi  grossolani che si creano durante lo scavo. Il contenuto di fine ottenuto mediante frantumazione   stato ritenuto in questa fase dello studio come rappresentativo delle caratteristiche del terreno che sar  abbattuto dalla macchina sulla base della ricerca bibliografica riportata in Allegato 1 ed   stata condivisa a seguito delle riunioni preliminari con i tecnici della SPEA. Le curve granulometriche dei campioni dopo la frantumazione sono quelle riportate nei grafici 2.1 e 2.2. Il contenuto d'acqua delle rocce recapitate al laboratorio   stato determinato per mezzo di prove di umidit  ed ammonta a circa il 4% per la formazione del Sillano ed   praticamente assente nella formazione del Monte Morello.



Figura 2.1 – Aspetto visivo della formazione del Sillano prima della frantumazione (sinistra) e dopo (destra)

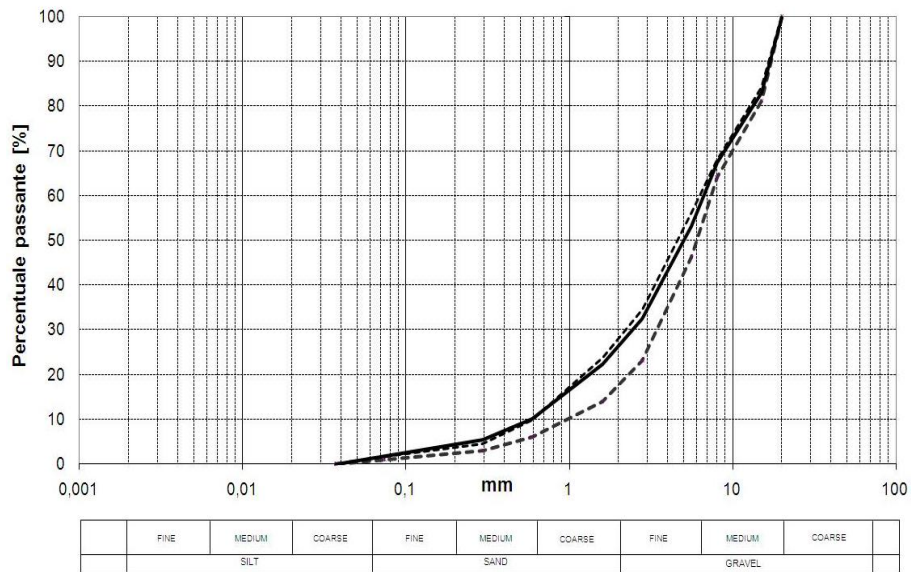


Gráfico 2.1 – Curves granulometriche della formazione del Sillano dopo la frantumazione.



Figura 2.2 – Aspetto visivo della formazione Monte Morello prima della frantumazione (sinistra) e dopo (destra)

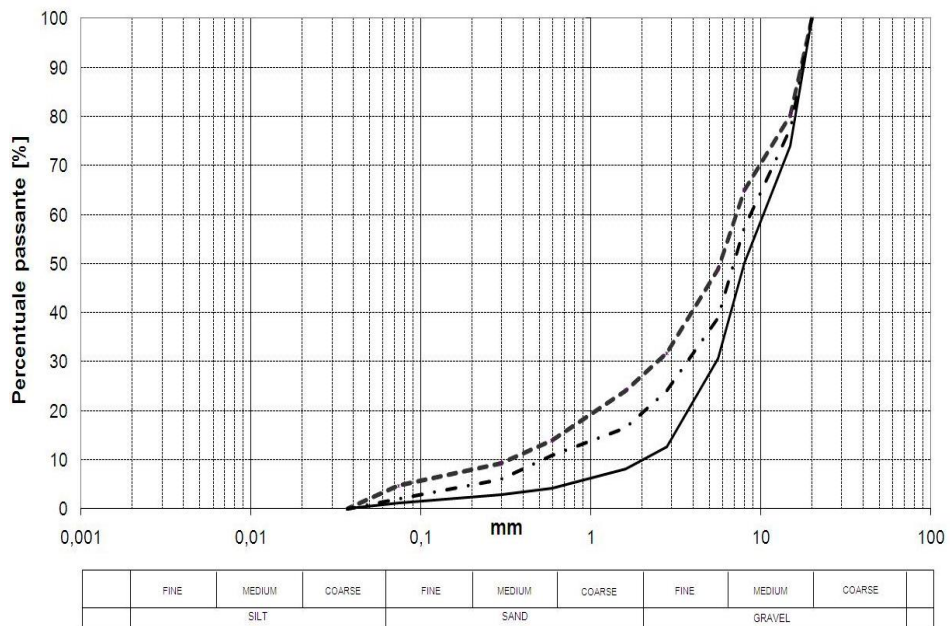


Gráfico 2.2 – Curves granulometriche della formazione Monte Morello dopo la frantumazione.

3. Prove per lo studio del condizionamento a mezzo di schiume.

3.1 Generatore di schiuma adottato

Il generatore di schiuma utilizzato presso il laboratorio Gallerie e Opere Sotterranee (TUSC) del DITAG è di tipo industriale, fornito dalla SPOILMASTER LIMITED, Berwick-upon-Tweed (UK).

Il sistema permette il controllo della portata di acqua (portata massima di 15 l/min) e della portata di aria (portata massima di 150 n.l/min), nonché un controllo elettronico del dosaggio dell'agente schiumogeno. Una volta impostati i parametri di funzionamento, a meno di oscillazioni modeste, è possibile ottenere campioni regolari di schiuma con tasso di espansione definito a priori. I parametri di controllo visualizzati dall'unità di generazione di schiuma sono, oltre le portate di acqua, di additivo e di aria, le pressioni dell'aria in entrata, a seguito della regolazione e all'uscita, la pressione dell'acqua in uscita e la pressione del flusso, in ingresso e in uscita, all'interno del corpo poroso di generazione di schiuma.

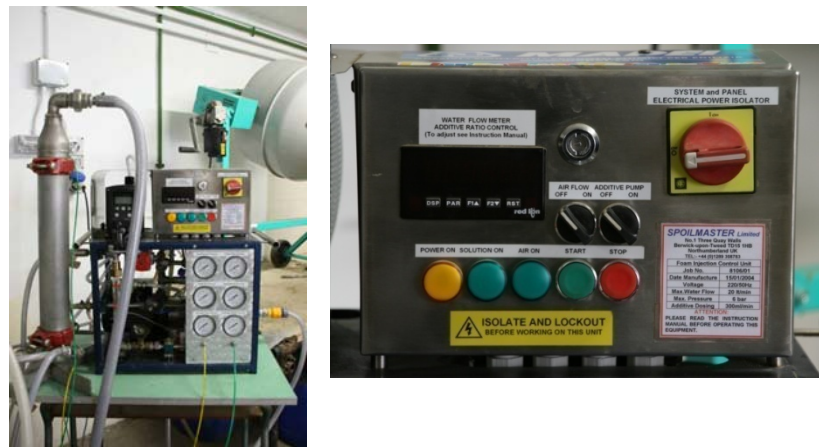


Figura 3.1 - Generatore di schiuma utilizzato presso il laboratorio TUSC del DITAG. Unità di generazione di schiuma (sinistra). Pannello di controllo dei parametri di generazione schiuma (destra).

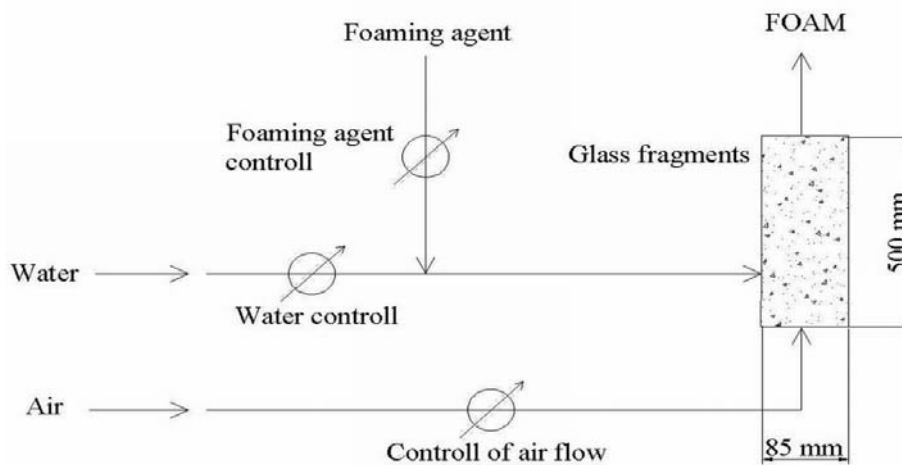


Figura 3.2 – Schema logico di generazione della schiuma.



3.2 Parametri di caratterizzazione della schiuma

Le caratteristiche principali che descrivono le schiume utilizzate nell'ambito del condizionamento del terreno per scavo con EPB sono:

- 1) **Concentrazione dell'agente schiumogeno (c):** percentuale di sostanza schiumogena presente nel liquido generatore di schiuma, formato da acqua e sostanza schiumogena stessa. Il range usuale per questo parametro è 0,5 – 5%. La scelta del valore da utilizzare in fase di generazione della schiuma dipende soprattutto dalle caratteristiche dell'agente schiumogeno stesso e da fattori tecnologici di applicazione (tipologia e caratteristiche del generatore di schiuma, chimismo dell'acqua utilizzata, ecc.), pertanto si suggerisce che il valore di progetto venga definito in sede operativa.
Nelle prove si è utilizzato sia il valore del 2% sia quello del 2,5%, idoneo per i condizionanti utilizzati nella ricerca, definiti e scelti sulla base delle esperienze del Politecnico di Torino, dai tecnici SPEA sotto la supervisione dei tecnici dei produttori degli agenti schiumogeni.
- 2) **Tasso di espansione (Foam Expansion Ratio – FER):** rapporto tra il volume finale raggiunto dalla schiuma e il volume iniziale di liquido generatore utilizzato. Per tale parametro si considera usualmente un range “bagnato” (dalla dizione anglosassone “wet”) pari a circa 8 – 10, e un range “asciutto” (“dry”), nell'ordine 14 – 20.
- 3) **Tasso di iniezione del terreno (Foam Injection Ratio - FIR):** rapporto tra il volume di schiuma immesso per condizionare il terreno e il volume del terreno stesso.
- 4) **Tempo di semivita della schiuma (t_{50}):** tempo necessario alla schiuma per drenare il 50% del liquido generatore utilizzato (EFNARC, 2005) Si ricorda però che la stabilità della schiuma quando miscelata con il terreno è di gran lunga superiore rispetto al valore ottenuto con la procedura di calcolo del tempo di semivita. Tale prova quindi ha funzione comparativa tra diversi agenti schiumogeni e diversi tassi di espansione.

Gli agenti schiumogeni utilizzati nel corso della ricerca sono riportati nel presente elaborato con la dicitura agente A, agente B ed agente C e sono stati forniti da due diversi produttori. L'agente A, fornito da un primo produttore, è stato utilizzato su entrambe le rocce, gli agenti B e C forniti da un secondo produttore sono stati utilizzati rispettivamente per il Monte Morello, agente B, e per il Sillano, agente C. Dalle specifiche tecniche fornite dal produttore per quel che riguarda la concentrazione dell'agente schiumogeno risulta consigliato l'intervallo 2 - 4%. Nelle prove la concentrazione dell'agente schiumogeno è stata del 2% o del 2,5% per tutti i prodotti..

Non essendo note in maniera univoca le condizioni di umidità del materiale abbattuto da condizionare ed essendo in possesso solamente dei dati di umidità naturale ricavati dai campioni misurati presso il Politecnico di Torino, le prove di slump sono state eseguite con tassi di espansione (FER) variabili, con valori compresi tra 6 e 15, aggiungendo ai diversi materiali una quantità d'acqua, oltre quella naturale, compresa tra lo 0% e il 5% per il Monte Morello e compresa tra il 3% e il 13% per il Sillano



3.3 Prova per la determinazione del tasso di espansione (Foam Expansion Ratio – FER)

Procedura per la determinazione:

- 1) il generatore viene impostato ad una certa portata di liquido;
- 2) viene aggiunto il flusso d'aria ad una certa pressione e portata;
- 3) dopo qualche minuto di produzione di schiuma viene prelevato un campione con un contenitore di volume e peso noti;
- 4) il campione viene pesato e il valore viene registrato;
- 5) il FER è calcolato come

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

3.4 Caratterizzazione dell'agente schiumogeno utilizzato mediante determinazione del tempo di semivita della schiuma (t_{50})

Procedura per la determinazione:

- 1) viene prelevato un campione come secondo i punti (1), (2) e (3) della procedura per la determinazione del FER, avendo cura di utilizzare un contenitore che presenti la possibilità di spillare liquido in maniera controllata dal fondo;
- 2) viene determinato il volume del liquido generatore ottenuto come differenza tra il peso del campione e il peso del contenitore vuoto;
- 3) attraverso l'utilizzo di un cronometro vengono registrati i tempi via via impiegati dal liquido che drena dal contenitore per cadere in un cilindro graduato a intervalli di volume scelti;
- 4) viene costruito il grafico del tempo di drenaggio del liquido riferito alla percentuale di volume drenato;
- 5) viene determinato graficamente il tempo richiesto per drenare il 50% del liquido generatore iniziale.

Di seguito vengono riportati i risultati dei test di semivita effettuati sui diversi agenti schiumogeni.

Tabella 3.1 – Tempi di semivita ottenuti per le diverse schiume a differenti valori di FER.

	FER			
	≈7	≈10	≈13	≈17
Agente schiumogeno A	124s	143s	225s	340s
Agente schiumogeno B	120s	≈180s	≈240s	360s
Agente schiumogeno C	203s	532s	≈800s	≈1200s

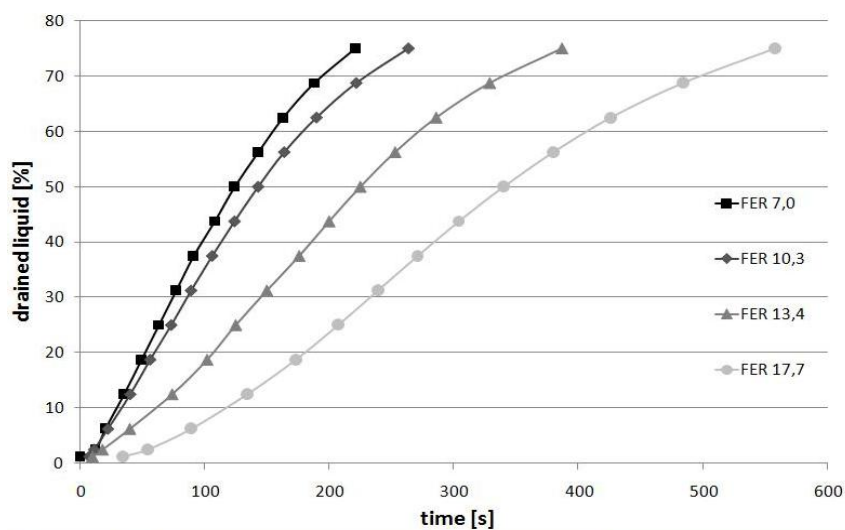


Grafico 3.1 - Tempo di semivita dell'agente schiumogeno A con concentrazione 2%.

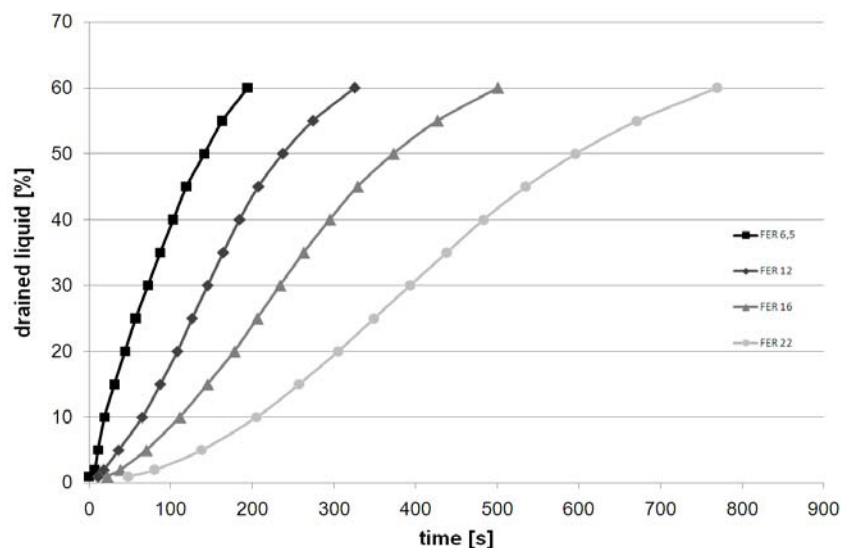


Grafico 3.2 - Tempo di semivita dell'agente schiumogeno B con concentrazione 2%.

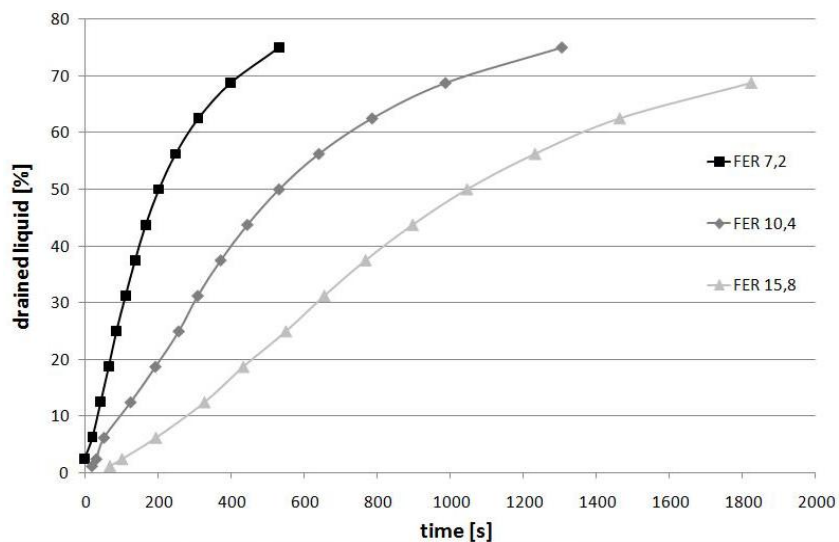


Grafico 3.3 - Tempo di semivita dell'agente schiumogeno C con concentrazione 2%.

4. Prove di slump per lo studio del condizionamento a mezzo di schiume

4.1 Test di caratterizzazione del materiale condizionato

Sulla base delle numerose esperienze sviluppate presso il laboratorio TUSC con l'esecuzione di specifiche ricerche finalizzate alla definizione di un protocollo di prova del materiale condizionato e sulla base di indicazioni di letteratura anche in assenza di specifiche normative sui test da eseguire per la caratterizzazione del materiale condizionato, ovvero il mix di materiale frantumato additivato con l'agente schiumogeno, fatte salve alcune raccomandazioni dell'EFNARC ("Specification and Guidelines for the use of specialist products for Mechanized Tunnelling (TBM) in Soft Ground and Hard Rock", 2005), le quali indicano le prove riguardo la caratterizzazione della schiuma, il tempo di drenaggio della schiuma quando miscelata con il terreno e un certo grado di plasticità finale del materiale riferibile al comportamento dello stesso sulla tavola vibrante. Nel presente studio è stata utilizzata la procedura messa a punto presso il TUSC che utilizza il cono di Abrams per le prove di slump sui calcestruzzi proiettati. Per l'interpretazione dei risultati ottenuti dalle prove di slump è stata usata la tabella interpretativa proposta qui di seguito, già utilizzata in numerosi lavori e pubblicazioni del Politecnico di Torino e determinata anche sulla base delle esperienze riportate in letteratura tecnica, dove il valore di slump accettabile per un buon condizionamento cade tra i 12 e i 20 cm.










 ↑ FIR [%]	No creation of the paste - Foam loss 		Too fluid - water and foam loss 
	Borderline - Stiff behaviour 	Suitable 	Too fluid 
	No creation of the paste - Dry mix 		No creation of the paste - Water loss 
			 w [%]

Figura 4.1 – Tabella comparativa per la definizione del comportamento del terreno condizionato utilizzando le prove di slump.

In dettaglio nelle prove sono state analizzati i seguenti aspetti tecnici che sono ritenuti essenziali per un buon comportamento dei materiali condizionati per nell'uso di un EPB:

- 1) la presenza di plasticità che renda idoneo il terreno condizionato alla trasmissione delle pressioni in camera di scavo e lungo la coclea, nonché all'estrazione controllata con la coclea stessa;
- 2) la presenza di un basso livello di attrito interno del materiale stesso per ridurre sia la potenza della testa di scavo, che deve poter girare immersa nel materiale scavato, sia l'usura delle parti che vengono a contatto con il terreno;
- 3) la persistenza delle caratteristiche di cui ai punti 1 e 2 nel tempo per permettere manovre di scavo ricorrenti, quali la posa in opera dell'anello di conci del rivestimento, o eccezionali, quali fermi macchina per qualunque motivo, in piena sicurezza relativamente alla stabilità del fronte di scavo.

4.2 Caratterizzazione del terreno condizionato con schiuma impostato secondo la procedura definita nel laboratorio TUSC

Procedura seguita:

- 1) un quantitativo di materiale naturale pari a 10 kg viene posizionato nel dispositivo di miscelazione ed un campione di materiale è prelevato per la determinazione del contenuto di acqua e per una analisi granulometrica;
- 2) viene generata la schiuma impostando sull'unità di generazione i parametri necessari per ottenere il tasso di espansione richiesto;
- 3) viene scelto il tasso di iniezione con il quale vuole essere realizzata la prova;
- 4) stabilito il tasso di iniezione da testare, viene campionato, pesandolo, il volume necessario di schiuma per ottenere il rapporto di miscelazione voluto e viene aggiunto al materiale naturale nel dispositivo di miscelazione;
- 5) il materiale ottenuto a seguito della miscelazione viene immesso in un cono di slump standard il quale viene sollevato immediatamente. Viene registrata la misura dell'abbassamento al cono;
- 6) la procedura viene ripetuta interamente per ogni combinazione di FIR, FER da testare.



Il terreno viene miscelato con l'agente schiumogeno nel mixer



Una volta creato il mix vengono riempiti i coni di slump



Il cono viene sollevato e l'abbassamento allo slump misurato

Figura 4.2 - Fasi della procedura seguita per la campagna di prove di slump.

4.3 Prove di slump effettuate sulla formazione Monte Morello



4.3.1. Prove di slump realizzate con l'agente schiumogeno A

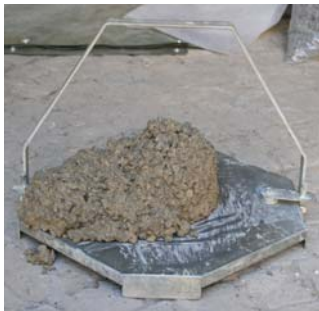



I risultati delle prove di slump nel seguito riportati, si riferiscono ai test effettuati sulla formazione Monte Morello utilizzando l'agente schiumogeno A, ad una concentrazione fissa del 2%. Al contrario sono state fatti variare i parametri relativi all'acqua aggiunta oltre all'umidità naturale (w_{agg}), al FER ed al FIR.

Una prima tabella riporta i risultati ottenuti sugli slump effettuati subito dopo il condizionamento del terreno, mentre la seconda riporta ulteriori prove di slump realizzata al fine di indagare, in prima istanza, i possibili effetti del tempo e della temperatura sulla stabilità del mix terreno-schiuma.

Tutti i campioni di materiale testati presentano una umidità naturale di base del 0% circa e un peso specifico del materiale sciolto di $1,5 \text{ kg/dm}^3$. E' stata realizzata a margine di queste prove una ulteriore prova, utilizzando un materiale con una percentuale di fine (< 1mm) del 5% contro il 12% degli altri campioni, al fine di valutarne l'influenza.

Tabella 4.1 - Prove di slump sulla formazione Monte Morello, utilizzando l'agente schiumogeno A.

Acqua aggiunta [%]	Acqua aggiunta [l/m^3]	FER	FIR	Additivo aggiunto [l/m^3]	Slump	Commenti	Foto
0	0	..	..	..	22 cm	Il materiale risulta del tutto incoerente	
3	45	10	30	0,6	14 cm	Discreta pastosità del materiale condizionato	

3	45	15	40	0,55	15 cm	Discreta pastosità del materiale condizionato	
5	75	15	30	0,4	13 cm	Condizionamento discreto per carenza di schiuma per la realizzazione della pasta.	
3	45	15	40	0,55	19 cm	Percentuale di fine (<1mm) del 5%. Eccesso di schiuma in rapporto al fine presente. Non possibile ottenere una buona pastosità	
5	75	15	20	0,26	16 cm	Condizionamento discreto, ma schiuma non sufficiente. Prevalente azione dell'acqua.	









3	45	15	25	0,33	17 cm	Discreto condizionamento, materiale discretamente pastoso	
3	45	15	35	0,46	17 cm	Comportamento buono, è presente un limitato eccesso di schiuma	
2	30	15	50	0,66	19 cm	Eccesso di schiuma nell'impasto, comportamento fluido del mix schiuma-terreno	

Tabella 4.2 - Prove di slump sulla formazione Monte Morello, utilizzando l'agente schiumogeno A. Test su tempo e temperatura

Acqua aggiunta [%]	Acqua aggiunta [l/m ³]	FER	FI R	Additivo aggiunto [l/m ³]	Slump	Commenti	Foto
3	45	15	35	0,46	17 cm	Comportamento buono, è presente un limitato eccesso di schiuma	

3	45	15	35	0,46	17 cm	Stesso mix della prova precedente ma mantenuto nel cono 30 minuti. Il comportamento rimane buono, le bolle permangono	
3	45	15	35	0,46	19 cm	Stesso mix delle due prove precedenti ma mantenuto nel mixer in funzione 30 min. Schiuma asciugata e materiale sciolto	
2	30	15	50	0,66	19 cm	Eccesso di schiuma nell'impasto, comportamento fluido del mix schiuma-terreno	
2	30	15	50	0,66	14 cm	Stesso mix della prova precedente ma mantenuto nel cono 30 minuti. Il comportamento è buono, le bolle permangono	
2	30	15	50	0,66	14 cm	Stesso mix delle due prove precedenti ma mantenuto in forno a 50°C per 30 min. Materiale molto asciugato, non più pastoso	

4.3.2. Conclusioni sulle prove di slump realizzate con l'agente schiumogeno A.

Dall'analisi dei risultati delle prove di slump effettuate sulla formazione Monte Morello utilizzando l'agente schiumogeno A è possibile concludere che:

- l'aggiunta di schiuma è assolutamente necessaria per il condizionamento del terreno poiché l'introduzione della sola acqua non è sufficiente per fornire al materiale un comportamento pastoso;
- la percentuale di acqua aggiunta per un buon condizionamento a tempo immediato deve essere compresa tra il 2% ed il 5%, oltre queste percentuali il fine presente nel terreno non risulta essere in grado di assorbire l'acqua in eccesso e non è più possibile fornire al terreno un comportamento pastoso;
- la percentuale di schiuma, con FER=15, da introdurre nel terreno per ottenere un discreto comportamento del mix subito dopo il condizionamento è di circa il 40%: oltre questo valore il materiale inizia a presentare una eccessiva fluidità;
- i fattori tempo e temperatura suggeriscono di incrementare la quantità di schiuma, in quanto dopo 30 minuti di permanenza nel mixer, oppure in forno a 50 °C, il materiale definito buono subito dopo l'aggiunta di schiuma ha perso buona parte delle sue caratteristiche di pastosità. Questo incremento è valutabile in un ulteriore 20% di FIR da inserire nel materiale.

Di seguito è presentato il grafico riassuntivo delle prove realizzate.

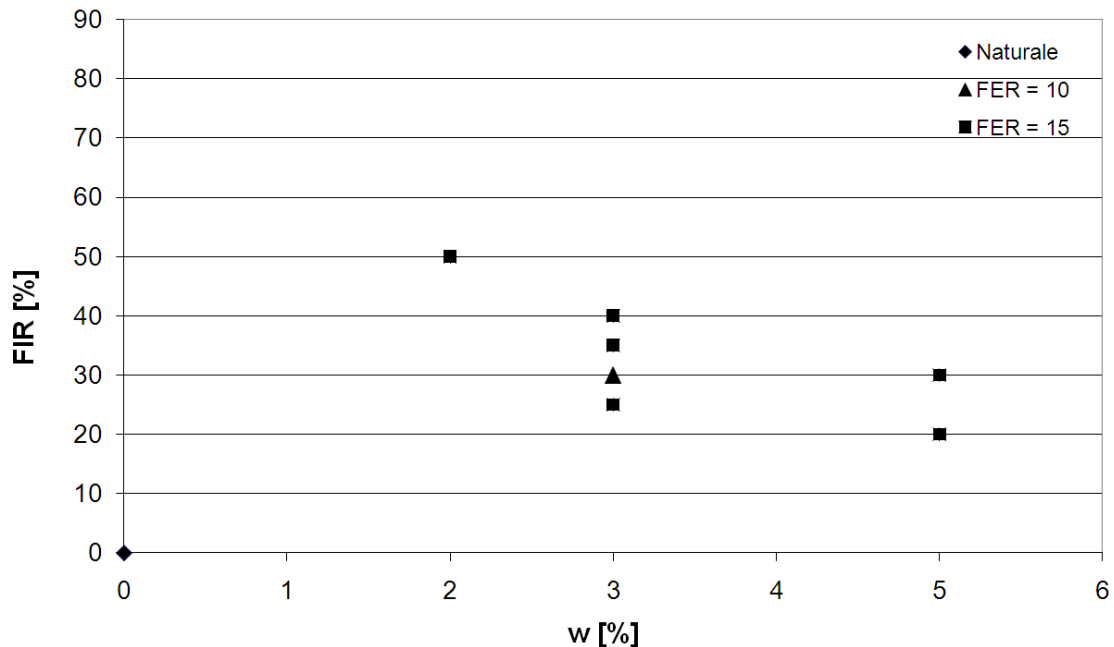


Grafico 4.1 – Quadro riassuntivo slump effettuati a t_0 sulla formazione Monte Morello con l'agente A.




4.3.3. Prove di slump realizzate con l'agente schiumogeno B

I risultati delle prove di slump nel seguito riportati, si riferiscono ai test effettuati sulla formazione Monte Morello utilizzando l'agente schiumogeno B, ad una concentrazione fissa del 2%. Al contrario sono state fatti variare i parametri relativi all'acqua aggiunta oltre all'umidità naturale (w_{agg}), al FER ed al FIR.

Una prima tabella riporta i risultati ottenuti sugli slump effettuati subito dopo il condizionamento del terreno, mentre la seconda riporta ulteriori prove di slump realizzata al fine di indagare, in prima istanza, i possibili effetti del tempo e della temperatura sulla stabilità del mix terreno-schiuma.

Tutti i campioni di materiale testati presentano una umidità naturale di base del 0% circa e un peso specifico del materiale sciolto di $1,5 \text{ kg/dm}^3$.

Tabella 4.3 - Prove di slump sulla formazione Monte Morello, utilizzando l'agente schiumogeno B.

Acqua aggiunta [%]	Acqua aggiunta [l/m ³]	FER	FIR	Additivo aggiunto [l/m ³]	Slump	Commenti	Foto
4	60	15	40	0,53	20 cm	Comportamento non ottimale, schiuma e/o acqua in eccesso	
2	30	15	30	0,4	16 cm	Discreto comportamento, creazione della pasta non ottimale	
0	0	15	80	1,07	15 cm	Buon condizionamento del materiale	










2	30	15	40	0,53	18 cm	Discreto condizionamento del materiale, difficoltà nell'attribuire caratteristiche di pastosità	
2	30	15	50	0,66	21 cm	Schiuma in eccesso, ma non si nota eccessiva perdita di liquido dal materiale	
2	30	15	40	0,53	19 cm	Presenza di schiuma in eccesso, condizionamento non buono Utilizzato un diverso agente schiumogeno poi accantonato	
2	30	15	30	0,4	18 cm	Condizionamento discreto del materiale Utilizzato un diverso agente schiumogeno poi accantonato	

Tabella 4.4 - Prove di slump sulla formazione Monte Morello, utilizzando l'agente schiumogeno B. Test su tempo e temperatura.

Acqua aggiunta [%]	Acqua aggiunta [l/m ³]	FER	FIR	Additivo aggiunto [l/m ³]	Slump	Commenti	Foto
2	30	15	50	0,66	21 cm	Schiuma in eccesso, ma non si nota eccessiva perdita di liquido dal materiale	
2	30	15	50	0,66	20 cm	Materiale di cui sopra mantenuto 30 min nel mixer. Meno schiuma libera ma ancora un po' troppo liquido	
2	30	15	50	0,66	20 cm	Materiale di cui alle due prove precedenti ma mantenuto 30 min nel cono. Meno schiuma libera ma ancora troppo liquido	
2	30	15	50	0,66	20 cm	Materiale delle tre prove precedenti ma fatto girare in betoniera pulita. Schiuma completamente asciugata e materiale sciolto.	

2	30	15	50	0,66	19 cm	<p>Materiale delle prove precedenti ma mantenuto in forno a 50°C per 30 min. Materiale molto asciugato, non più pastoso.</p>	
---	----	----	----	------	-------	--	---

4.3.4. Conclusioni sulle prove di slump realizzate con l'agente schiumogeno B.

Dall'analisi dei risultati delle prove di slump sulla formazione Monte Morello utilizzando l'agente schiumogeno B, è possibile constatare che il comportamento del materiale condizionato è del tutto simile a quello rilevato utilizzando l'agente condizionante A, sia in termini di acqua aggiunta (2%) che di FIR, che anche in questo caso si attesta intorno ad una valore del 40% per gli slump effettuati subito dopo il condizionamento e richiede un ulteriore 20% quando entrano in gioco gli effetti del tempo e della temperatura.

In questa occasione è stata realizzata una prova senza aggiunta di acqua e il FIR necessario per un buon condizionamento è stato dell'80%.

In tutte le prove il FER è stato mantenuto costante ad un valore di 15.

La tabella seguente riassume i test eseguiti.

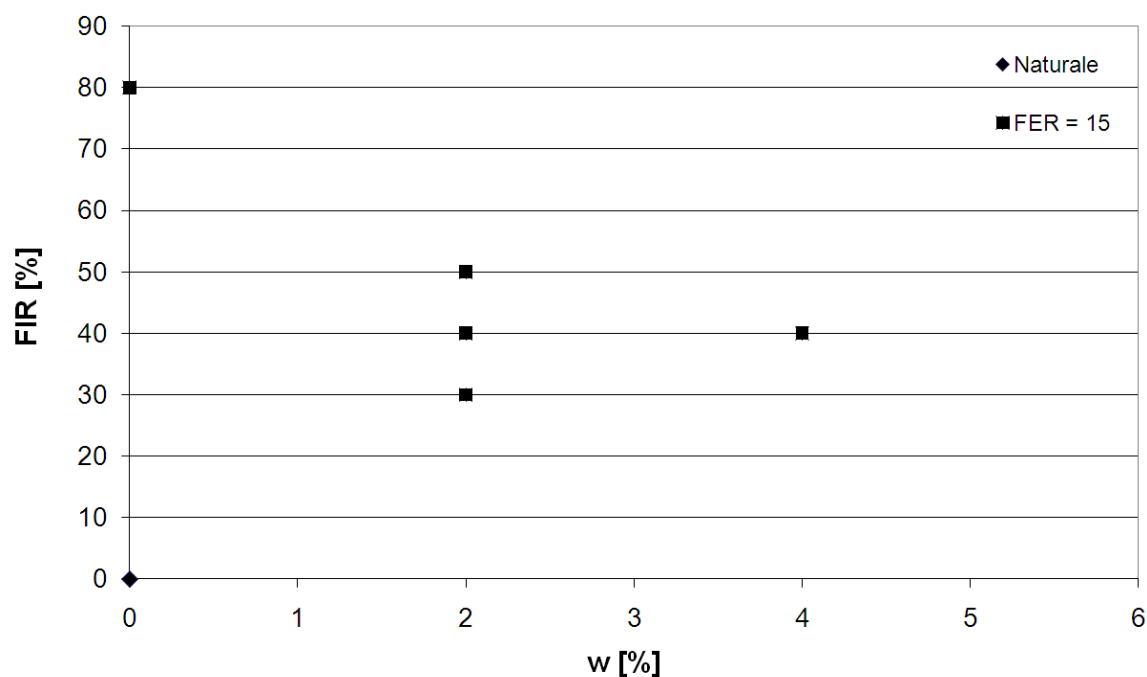


Grafico 4.2 – Quadro riassuntivo slump effettuati a t_0 sulla formazione Monte Morello con l'agente B.

4.4 Prove di slump effettuate sulla formazione Sillano




4.4.1. Prove di slump realizzate con l'agente schiumogeno A





I risultati delle prove di slump nel seguito riportati, si riferiscono ai test effettuati sulla formazione Sillano utilizzando l'agente schiumogeno A, ad una concentrazione fissa del 2%. Al contrario sono state fatti variare i parametri relativi all'acqua aggiunta oltre all'umidità naturale (w_{agg}), al FER ed al FIR.

Una prima tabella riporta i risultati ottenuti sugli slump effettuati subito dopo il condizionamento del terreno, mentre la seconda riporta ulteriori prove di slump realizzata al fine di indagare, in prima istanza, i possibili effetti del tempo e della temperatura sulla stabilità del mix terreno-schiuma.

Tutti i campioni di materiale testati presentano una umidità naturale di base del 5% circa e un peso specifico del materiale sciolto di $1,5 \text{ kg/dm}^3$.

Tabella 4.5 - Prove di slump sulla formazione Sillano, utilizzando l'agente schiumogeno A.

Acqua aggiunta [%]	Acqua aggiunta [l/m^3]	FER	FIR	Additivo aggiunto [l/m^3]	Slump	Commenti	Foto
3	45	..	..	...	23 cm	Il materiale risulta del tutto incoerente	
0	0	6	55	1,8	13 cm	Umidità del terreno non sufficiente a fornire pastosità al materiale	
3	45	6	20	1	19 cm	Buon condizionamento e discrete caratteristiche di pastosità del materiale, no eccesso di schiuma	

5	75	10	50	1	20 cm	Discreta pastosità ma eccesso di schiuma con parziale separazione del fine	
3	45	15	40	0,58	15 cm	Discreta pastosità ma probabilmente necessaria una maggior quantità di schiuma.	
7	105	15	55	0,7	10 cm	Condizionamento non sufficiente, rottura del cono e materiale non omogeneo	
7	105	10	40	0,8	16 cm	Buon condizionamento, preferibile una ulteriore aggiunta di schiuma	









7	105	10	60	1,2	17 cm	Buon condizionamento, minima quantità di schiuma in eccesso	
10	150	15	100	1,3	21 cm	Eccessiva quantità di schiuma, materiale troppo fluido	

Tabella 4.6 - Prove di slump sulla formazione Sillano, utilizzando l'agente schiumogeno A. Test su tempo e temperatura.

Acqua aggiunta [%]	Acqua aggiunta [l/m ³]	FER	FIR	Additivo aggiunto [l/m ³]	Slump	Commenti	Foto
7	105	10	60	1,2	17 cm	Buon condizionamento, minima quantità di schiuma in eccesso	
7	105	10	60	1,2	1 cm	Stesso mix della prova precedente, ma mantenuto 15 minuti in betoniera. Perdita totale di plasticità, comportamento rigido.	

7	105	10	60	1,2	17 cm	Stesso mix delle due prove precedenti, ma mantenuto 30 minuti nel cono. Comportamento discreto del materiale.	
10	150	15	100	1,3	21 cm	Eccessiva quantità di schiuma, materiale troppo fluido	
10	150	15	100	1,2	0 cm	Stesso mix della prova precedente, ma mantenuto 20 minuti in betoniera. Perdita totale di plasticità, comportamento rigido.	
10	150	15	100	1,3	15 cm	Stesso mix delle due prove precedenti, ma mantenuto 30 minuti in forno a 50°C. Comportamento discreto del materiale, non molto pastoso.	

4.4.2. Conclusioni sulle prove di slump realizzate con l'agente schiumogeno A.

Dall'analisi dei risultati delle prove di slump sulla formazione Sillano utilizzando l'agente schiumogeno A è possibile concludere che:

- l'aggiunta di schiuma è assolutamente necessaria per il condizionamento del terreno in quanto l'introduzione della sola acqua non attribuisca al materiale un comportamento pastoso;

- la percentuale di acqua aggiunta deve essere compresa tra il 7% ed il 10% se si utilizzano FER di 10-15, mentre può essere ridotta intorno al 3-5% se il FER della schiuma utilizzata assume valori nell'intorno di 6;
- la percentuale di schiuma con FER=15 e con acqua aggiunta del 7%, da inserire nel terreno per ottenere un buon comportamento del mix subito dopo il condizionamento è di circa il 60%, oltre questo valore il materiale inizia a presentare una eccessiva fluidità;
- i fattori tempo e temperatura suggeriscono di incrementare la quantità di schiuma, in quanto dopo 30 minuti di permanenza nel mixer oppure in forno a 50 °C il materiale, definito buono (vedi punto precedente) subito dopo l'aggiunta di schiuma, ha perso le sue caratteristiche di pastosità. Questo incremento dai test realizzati è valutabile in un ulteriore 40% - 50% di FIR da inserire nel materiale ed un ulteriore 3% di acqua aggiunta;
- risulta possibile fornire alla formazione Sillano per mezzo del condizionamento una consistenza pastosa, prestando però attenzione alla possibilità di impaccamento del materiale argilloso che lo costituisce nel caso di permanenza in camera con movimento rotatorio continuo e costante.

Di seguito è presentato il grafico riassuntivo delle prove realizzate.

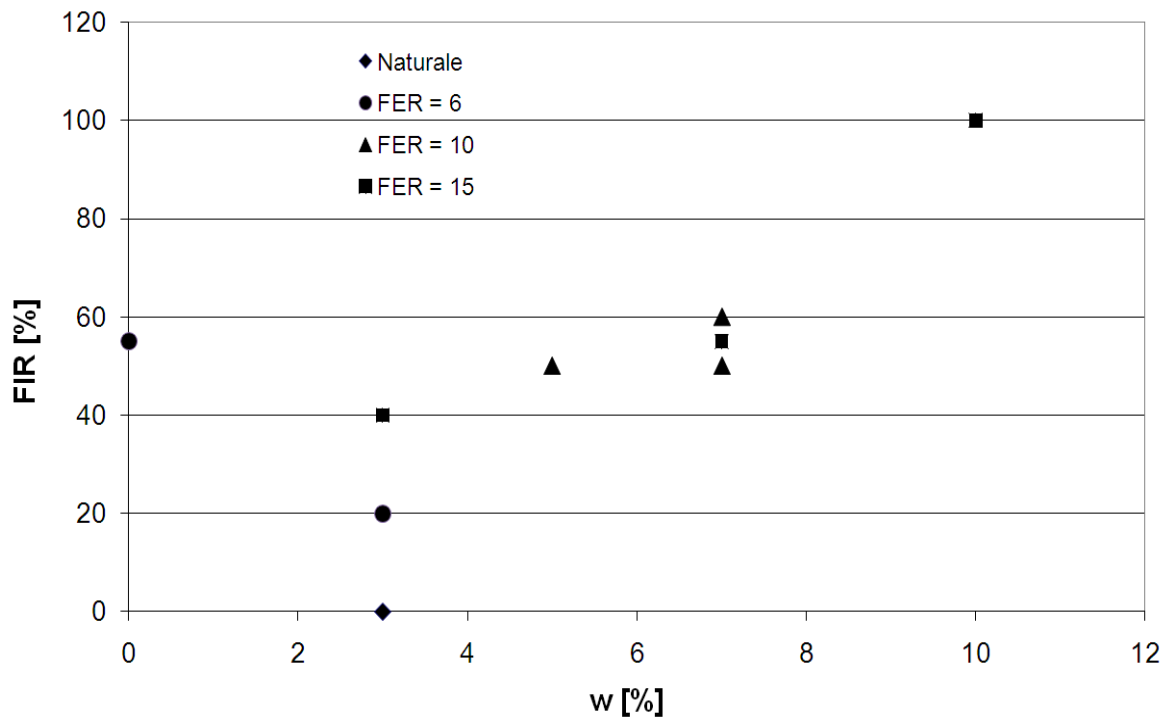


Grafico 4.3 – Quadro riassuntivo slump effettuati a t_0 sulla formazione Sillano con l'agente A




4.4.3. Prove di slump realizzate con l'agente schiumogeno C

I risultati delle prove di slump nel seguito riportati, si riferiscono ai test effettuati sulla formazione Sillano utilizzando l'agente schiumogeno C, ad una concentrazione fissa del 2%. Al contrario sono stati fatti variare i parametri relativi all'acqua aggiunta oltre all'umidità naturale (w_{agg}), al FER ed al FIR.

Una prima tabella riporta i risultati ottenuti sugli slump effettuati subito dopo il condizionamento del terreno, mentre la seconda riporta ulteriori prove di slump realizzata al fine di indagare, in prima istanza, i possibili effetti del tempo e della temperatura sulla stabilità del mix terreno-schiuma.

Tutti i campioni di materiale testati presentano una umidità naturale di base del 5% circa e un peso specifico del materiale sciolto di $1,5 \text{ kg/dm}^3$.

Tabella 4.7 - Prove di slump sulla formazione Sillano, utilizzando l'agente schiumogeno C.

Acqua aggiunta [%]	Acqua aggiunta [l/m ³]	FER	FIR	Additivo aggiunto [l/m ³]	Slump	Commenti	Foto
5	75	15	50	0,66	10 cm	Condizionamento non sufficiente, rottura del cono e materiale non condizionato in modo omogeneo	
8	120	15	70	0,93	18 cm	Buon condizionamento ed omogeneità del materiale	
8	120	15	50	0,66	14 cm	Buon condizionamento nonostante la rottura del cono	









3	45	10	50	1	9 cm	Condizionamento non sufficiente, rottura del cono e materiale non condizionato in modo omogeneo	
8	120	15	60	0,8	21cm	Troppa schiuma nel materiale. Non si ottiene la pasta.	
10	150	15	100	1,3	22 cm	Troppa schiuma e comportamento fluido del materiale	Foto non disponibile

Tabella 4.8 - Prove di slump sulla formazione Sillano, utilizzando l'agente schiumogeno C. Test su tempo e temperatura.

Acqua aggiunta [%]	Acqua aggiunta [l/m ³]	FER	FIR	Additivo aggiunto [l/m ³]	Slump	Commenti	Foto
8	120	15	60	0,8	21cm	Troppa schiuma nel materiale. Non si ottiene la pasta.	

8	120	15	60	0,8	21 cm	<p>Materiale dello slump precedente tenuto 30 minuti nel cono.</p> <p>Comportamento ancora troppo liquido.</p>	
8	120	15	60	0,8	15 cm	<p>Materiale dei due slump precedenti tenuto 30 minuti nel mixer.</p> <p>Comportamento rigido del cono, poco plastico.</p>	
10	150	15	100	1,3	15 cm	<p>Materiale condizionato e poi mantenuto 30 min nel mixer.</p> <p>Buon condizionamento, materiale un po' troppo "colloso"</p>	
13	195	15	100	1,3	18 cm	<p>Stesso materiale della prova precedente a cui viene aggiunto un 3% di acqua.</p> <p>Buon comportamento globale</p>	
10	120	15	100	1,3	16 cm	<p>Stesso materiale delle prove precedenti inserito in forno a 50°C per 30 minuti subito dopo il condizionamento.</p> <p>Materiale asciugato poco plastico.</p>	

4.4.4. Conclusioni sulle prove di slump realizzate con l'agente schiumogeno C.

Dall'analisi dei risultati delle prove di slump effettuate sulla formazione Sillano utilizzando l'agente schiumogeno C è possibile concludere che:

- l'aggiunta di schiuma è necessaria per il condizionamento del terreno, l'introduzione della sola acqua non è sufficiente per fornire al materiale un comportamento pastoso;
- la percentuale di acqua aggiunta non deve essere inferiore all'8%, in quanto percentuali minori di acqua aggiunta non hanno fornito buoni risultati;
- la percentuale di schiuma, con FER=15 ed acqua aggiunta dell'8%, da inserire nel terreno per ottenere un discreto comportamento del mix subito dopo il condizionamento, si colloca nell'intorno del 60%, con possibili variazioni di comportamento, anche marcate, in funzione della quantità di fine presente nel campione;
- i fattori tempo e temperatura suggeriscono di incrementare la quantità di schiuma, in quanto dopo 30 minuti di permanenza nel mixer oppure in forno a 50 °C il materiale definito buono subito dopo l'aggiunta di schiuma ha perso le caratteristiche di pastosità. In particolare la permanenza nel mixer in funzione è risultata essere un fattore critico per questo materiale. L'incremento è valutabile in un ulteriore 40% di FIR da inserire nel materiale.

Di seguito è presentato il grafico riassuntivo delle prove realizzate.

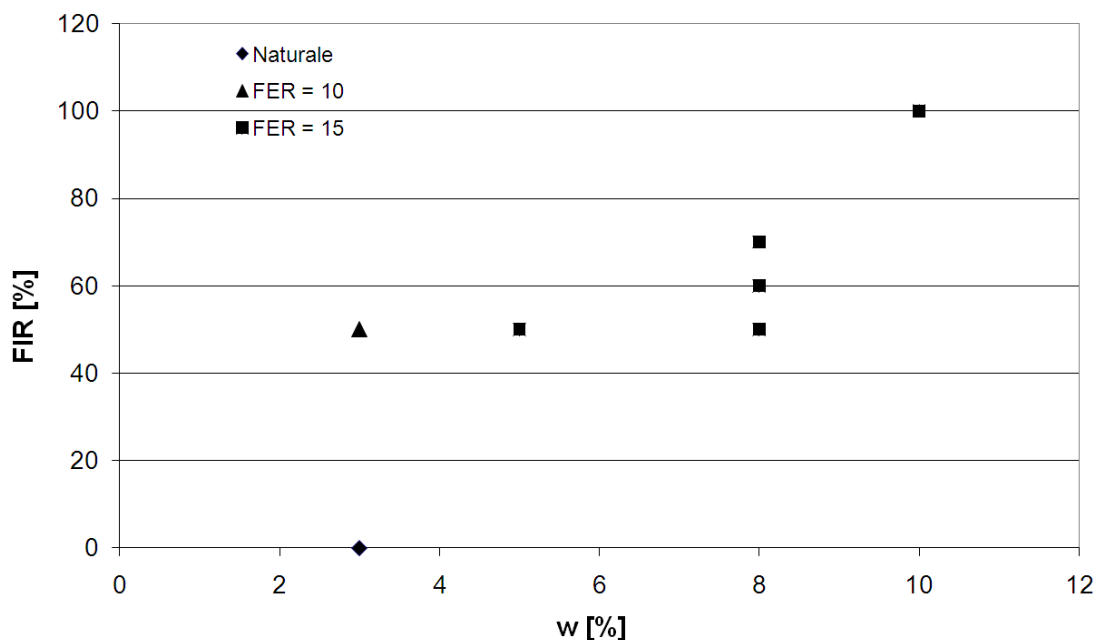


Grafico 4.4 – Quadro riassuntivo slump effettuati a t_0 sulla formazione Sillano con agente C.

4.5 Diagrammi riassuntivi sulle prove di slump eseguite

Nel seguito si riportano per miglior comprensione dei risultati ottenuti i diagrammi riassuntivi dei risultati e dei parametri di prova eseguiti per le due formazioni oggetto di studio.

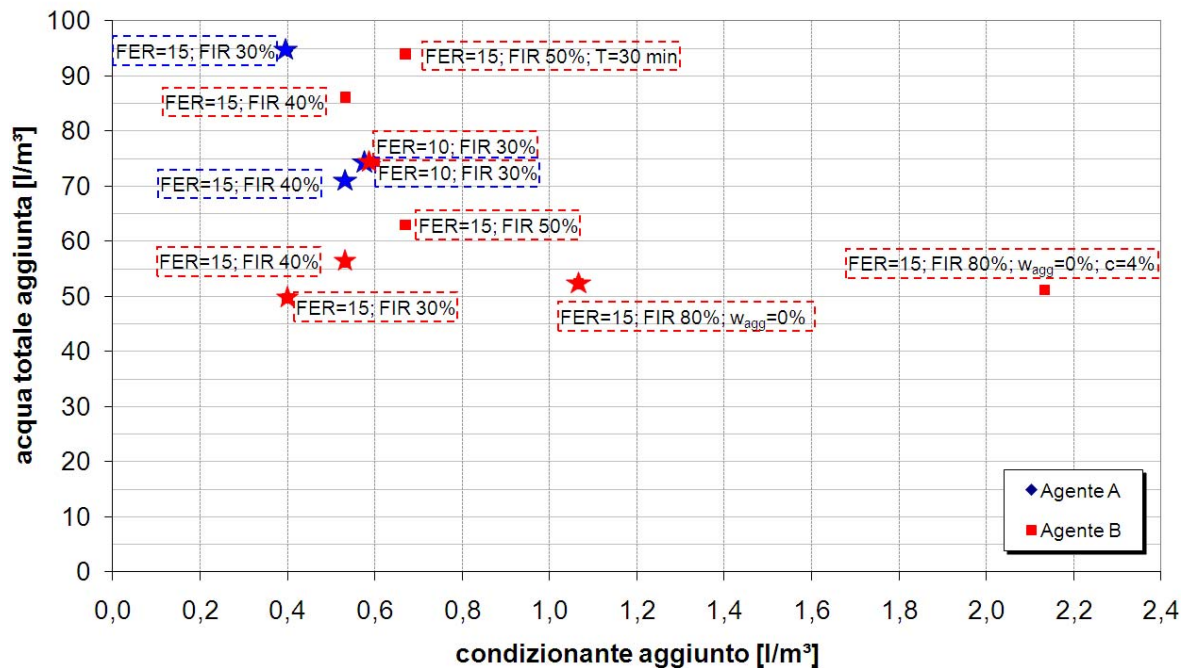


Grafico 4.5 – Quadro riassuntivo slump effettuati sulla formazione Monte Morello. Le stelle indicano un buon condizionamento

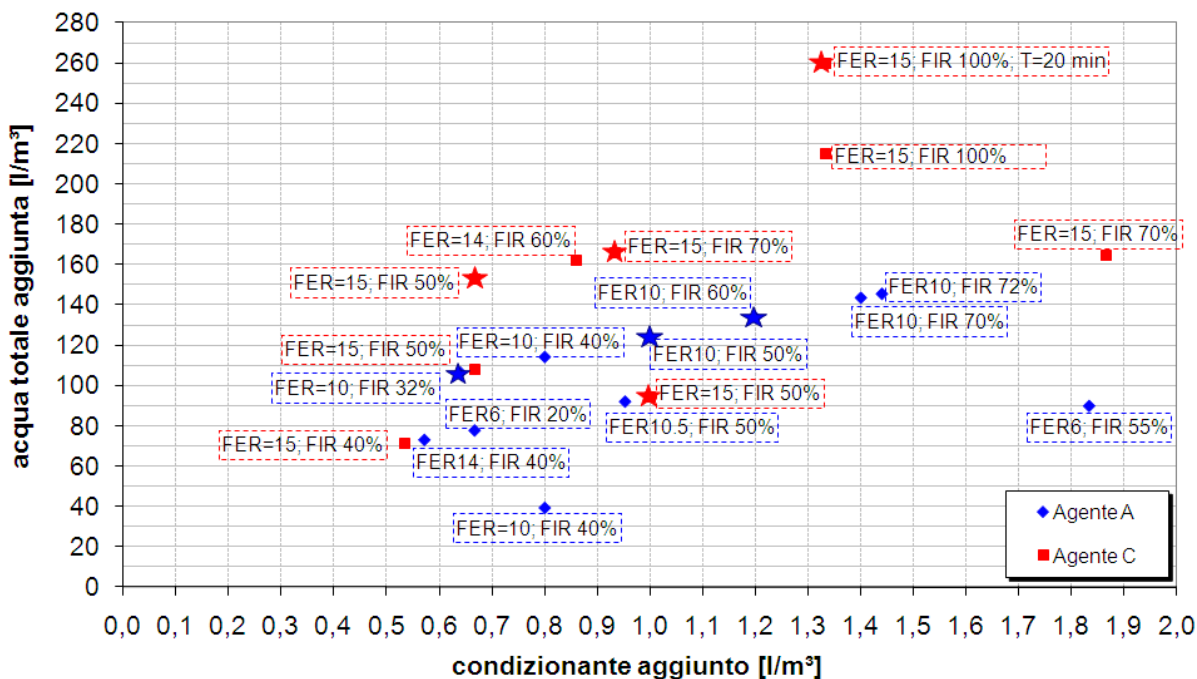


Grafico 4.6 – Quadro riassuntivo slump effettuati sulla formazione Sillano. Le stelle indicano un buon condizionamento.

5. Prove di estrazione controllata con coclea da camera in pressione

5.1. Caratteristiche dell'apparato sperimentale di estrazione mediante coclea

Per la valutazione dell'idoneità del materiale condizionato ad essere estratto mediante coclea per la simulazione del comportamento durante lo scavo con EPB, presso il laboratorio TUSC – Gallerie ed Opere in Sottterraneo del Politecnico di Torino è disponibile un idoneo apparato sperimentale appositamente progettato e costruito per l'estrazione del materiale condizionato. L'apparato è stato realizzato in modo da riprodurre le condizioni di estrazione del materiale dalla camera di scavo di una macchina EPB anche tenendo conto della pressione presente in camera. Esso consiste, in sintesi, in un cilindro metallico (di seguito denominato “serbatoio”) di diametro nominale 600 mm al quale si accoppia una coclea di estrazione di diametro esterno 168 mm e lunghezza della vite di 1500 mm.

La coclea è movimentata da un motore elettrico trifase, cui è connesso attraverso un riduttore meccanico che consente una velocità di rotazione massima di 15 rpm.

Al fine di rilevare i parametri di funzionamento, la coclea è equipaggiata di tre sensori di pressione totale del terreno lungo il fusto, oltre che di un torsionmetro per misurare il momento torcente richiesto dal materiale per essere estratto.

Il serbatoio ha due sensori di pressione totale, uno posizionato sul fondo e uno sul piatto di applicazione del carico, in modo da valutare il grado di omogeneità e trasmissione degli sforzi nel materiale, mentre un sensore di posizione segue il movimento del cilindro idraulico di carico durante la sua azione. Il materiale estratto è pesato attraverso l'utilizzo di una cella di carico.

La figura 5.1 riporta la geometria dell'apparato, mentre la tabella 1 riporta le caratteristiche dei sensori adottati.

Tutte le informazioni acquisite dai sensori sono raccolte mediante una centralina di acquisizione dati (data logger) gestita in modo automatico da un computer, che permette la visualizzazione in tempo reale dei valori rilevati e la loro memorizzazione.

La procedura di prova perfezionata nel corso di numerose ricerche dei tecnici del Politecnico di Torino riportate in bibliografia.

I risultati ottenibili dall'apparato sono stati preliminarmente verificati mediante una campagna di prove su una sabbia campione, che viene riportata per fornire un valore di riferimento.

La prova, pur avendo i limiti concatenati a tutte le prove di laboratorio a scala ridotta rispetto alla dimensione reale della macchina (cioè al così detto fattore di scala) ed operando a pressioni nel serbatoio standardizzate e comunque limitate da fattori operativi del laboratorio che possono essere differenti da quelle reali, fornisce indicazioni molto chiare sulle caratteristiche dei materiali e sulle loro proprietà di controllare e gestire la pressione nella camera di scavo con EPB.

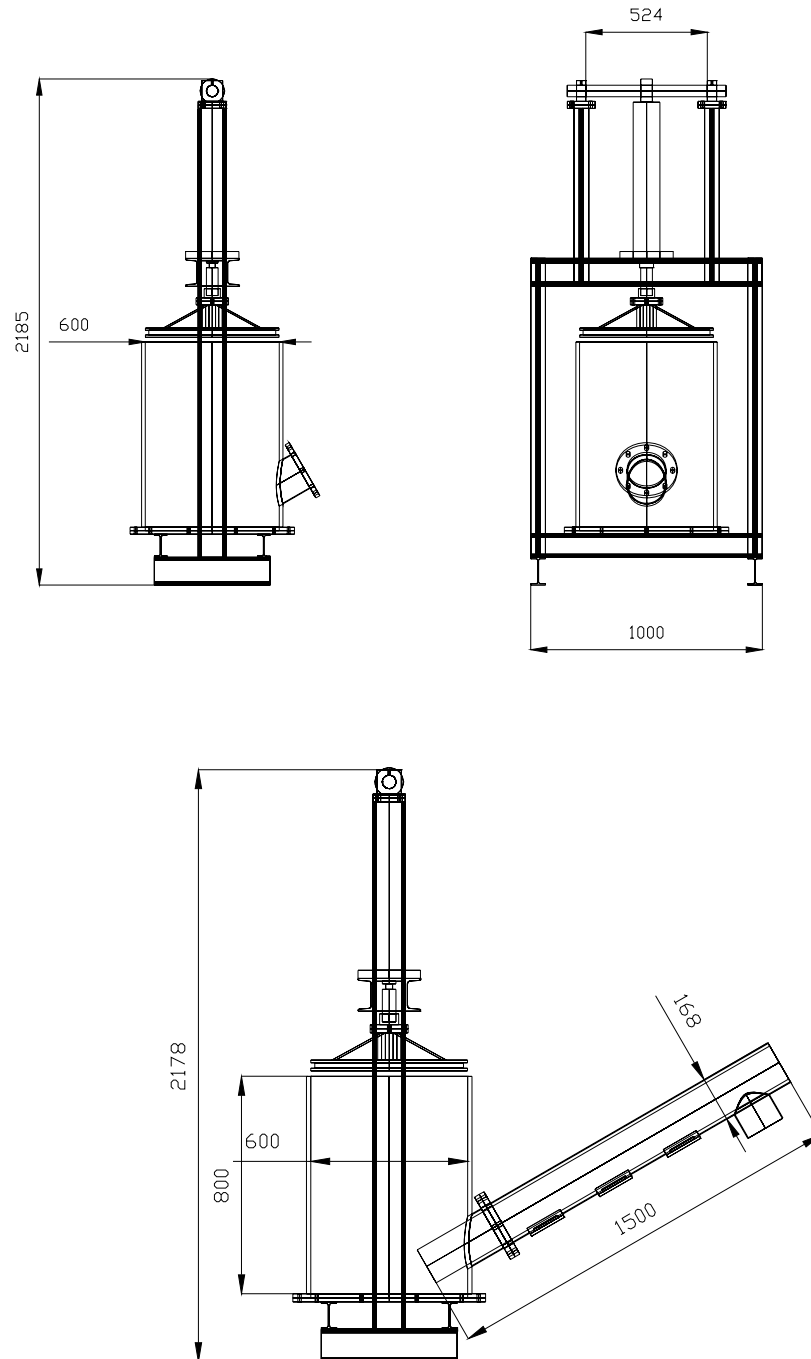


Figura 5.1 - Schema e principali dimensioni dell'apparato sperimentale di estrazione con coclea.



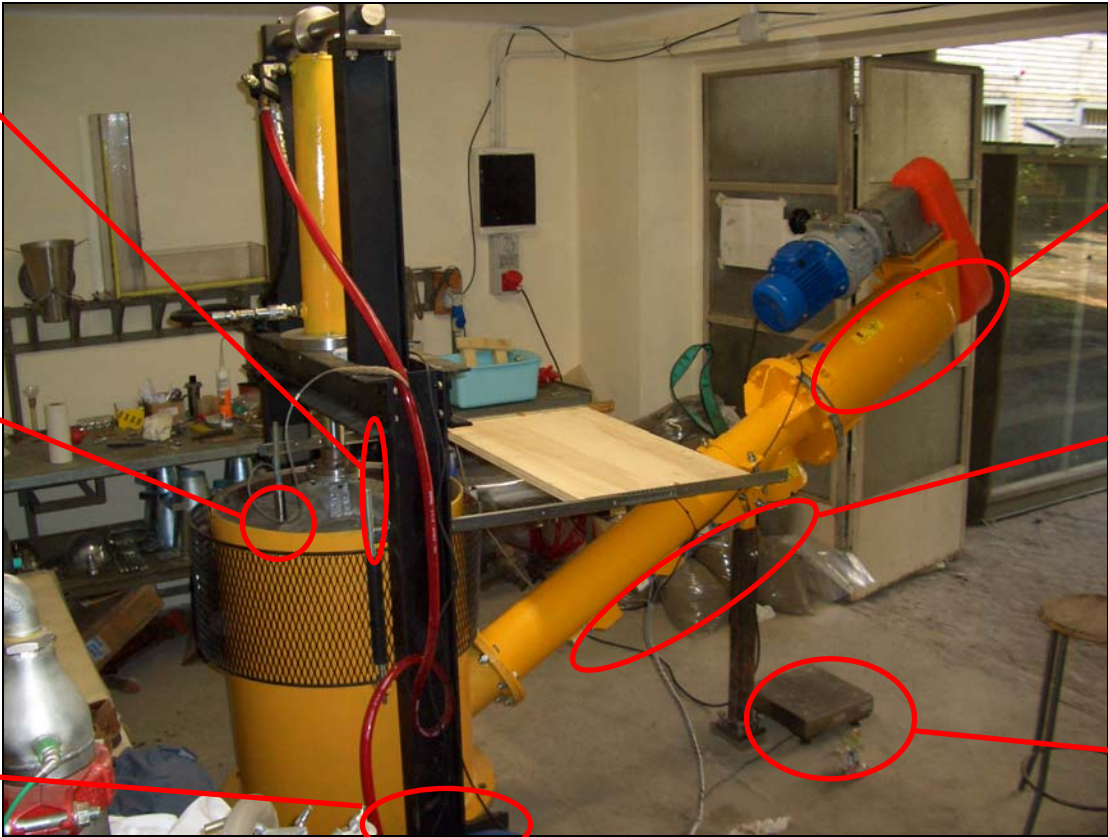
Sensore di posizione



Cella di pressione



Cella di pressione



Torsiometro



Celle di pressione



Bilancia

Figura 5.2 - Vista di insieme dell'apparato sperimentale di estrazione e disposizione della strumentazione installata.



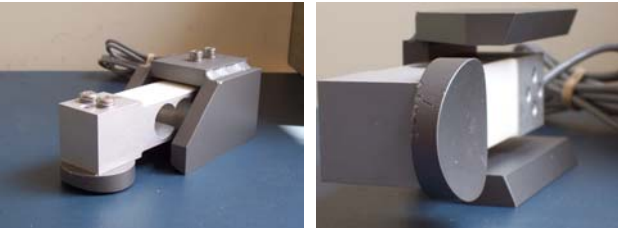
Strumenti	Foto	Quantità	Dimensioni	Tipo	Range
Unità acquisizione dati		1	N.A.	HBM Spider 8 8 canali tecnologia in frequenza di portante a 600 HZ Alim. trasduttori 2,5V Software di gestione HBM Catman Easy	N.A.
Celle di pressione		2	Φ 112 mm	Cella di pressione con cuscino di liquido deareato e trasduttore a membrana	0-5 bar
Celle di pressione		3	Φ 50 mm Raggio Curvatura 162 mm	Cella di carico a ponte intero di Wheatstone	0-5 bar

Tabella 5.1 - Caratteristiche della strumentazione installata.

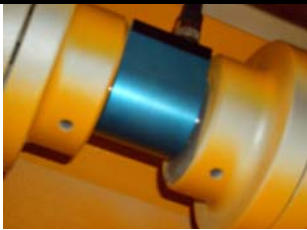


Strumenti	Foto	Quantità	Dimensioni	Tipo	Range
Torsiometro		1	-	Sensore di coppia torcente dinamica con contatti striscianti. Trasduttore estensimetrico a ponte intero di Wheatstone	0-500 Nm
Bilancia		1	300x300	Cella di carico a ponte intero di Wheatstone	0-50 kg
Sensore di posizione		1	-	Sensore di spostamento a filo di tipo potenziometrico	0-1000 mm

Tabella 5.1 (segue) - Caratteristiche della strumentazione installata.

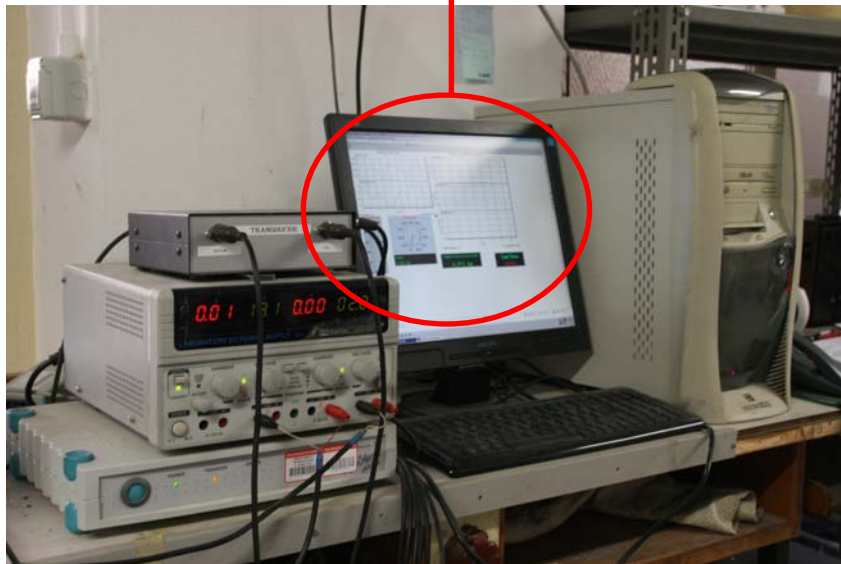
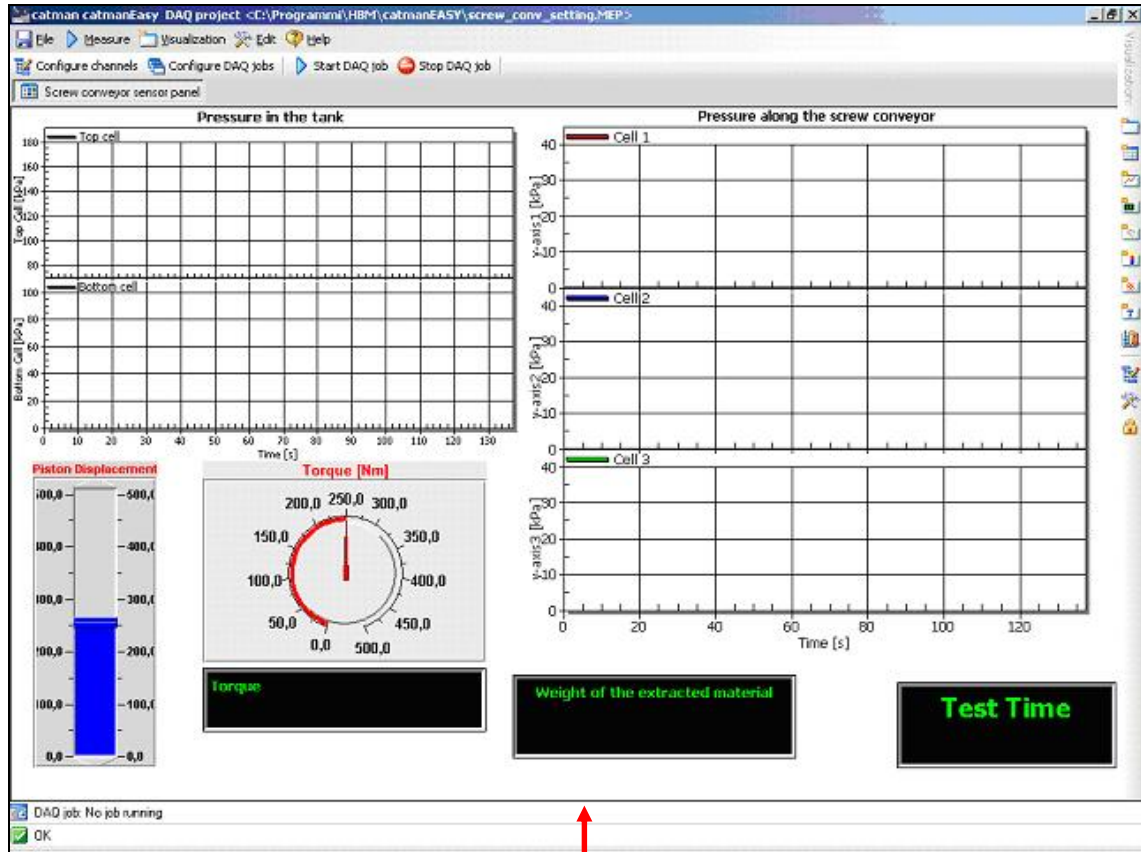


Figura 5.3 - Layout del pannello di controllo virtuale per la gestione dei sensori installati.

Fasi di prova	Fotografia
<p>La centralina di acquisizione viene impostata per l’avvio della procedura di memorizzazione</p>	
<p>Un quantitativo di materiale campione, con una determinata umidità, viene posizionato nel dispositivo di miscelazione</p>	
<p>La schiuma viene prodotta impostando sull’unità di generazione i parametri necessari per ottenere il tasso di espansione richiesto, e successivamente viene aggiunta nel mixer nel quantitativo necessario ad ottenere il FIR desiderato</p>	
<p>Il materiale così ottenuto viene immesso nel serbatoio dell’apparato mediante uno scivolo; l’operazione di miscelazione e di scarico viene ripetuta finché il serbatoio non raggiunge il prescritto livello di riempimento</p>	
<p>Il piattello viene imbullonato al pistone dopo averne preventivamente ingrassato il bordo esterno al fine di limitarne gli attriti durante lo scorrimento all’interno del serbatoio</p>	


Fasi di prova	Fotografia
Attraverso la centralina oleodinamica si attiva il movimento del pistone finché non si raggiunge all’interno del serbatoio la pressione desiderata	
Si avvia la coclea di estrazione e contemporaneamente si mantiene la pressione all’interno del pistone al valore desiderato	
Il materiale estratto viene raccolto avendo cura di prelevare regolarmente campioni di terreno per ulteriori prove	
La prova continua finché il pistone non giunge a fine corsa	

Tabella 5.2 - Procedura di prova seguita per gli esperimenti con l’apparato di estrazione.



5.2. Prove di taratura dell'apparato sperimentale di estrazione

La taratura dell'apparato di estrazione con coclea è stata realizzata con prove su una sabbia campione, sia satura sia variamente condizionata.

Queste prove di verifica hanno altresì permesso di valutare l'effetto del condizionamento nell'ottica dell'applicazione della tecnologia di scavo EPB mediante le informazioni ottenute dall'attrezzatura di prova.

In particolare sono state eseguite tre prove sulla sabbia satura e altrettante sulla sabbia condizionata, alla quale sono stati applicati i parametri di condizionamento ricavati da una campagna di caratterizzazione precedente, che ha fornito i seguenti dosaggi ritenuti ottimali:

$$FER = 16 \text{ (schiuma asciutta)}$$

$$FIR = 40\%$$

$$w = 10\%$$

dove:

$$FER = \frac{V_{schiuma}}{V_{liquido}}$$

tasso di espansione della schiuma, pari al rapporto tra volume di schiuma ottenuto e volume del liquido generatore iniziale. Un basso valore di questo parametro indica che la schiuma è più densa e più liquida, e viceversa. Si definisce schiuma “asciutta” (dalla dizione anglosassone “dry”) una schiuma con tasso di espansione nell'intervallo 14 – 18, mentre viceversa una schiuma “bagnata” presenta tassi di espansione nell'intervallo 8 – 12;

$$FIR = \frac{V_{schiuma}}{V_{terreno}} \cdot 100$$

tasso di iniezione della schiuma, pari al rapporto percentuale tra volume di schiuma iniettata e volume di terreno trattato. Il dosaggio è funzione della granulometria, dell'umidità e delle caratteristiche di plasticità della frazione fine;

$$w = \frac{W_{acqua}}{W_{terreno_asciutto}} \cdot 100$$

umidità del terreno, pari al rapporto percentuale tra peso dell'acqua presente nel campione e peso asciutto del terreno.

L'agente condizionante utilizzato per le prove è l'Agente schiumogeno A della presente relazione.

La velocità di rotazione della coclea durante le prove è stata impostata pari a 6 r.p.m. che è un valore confrontabile con la velocità reale nelle normali macchine EPB ed è stata tarata con le prove di estrazione su sabbia.



Sabbia satura

Test #	Pressione teorica [kPa]		Pressione ottenuta [kPa]		Coppia [Nm]	δ spost. [mm/s]	δ peso [kg/s]	Cella 1 [kPa]	Cella 2 [kPa]	Cella 3 [kPa]
	top	bottom	top	bottom						
S1	60	75	N.A.	N.A.	35-45	0,299	0,159	6-8	4-6	2-4
S2	90	105	150-230	110-120	30-40	0,327	0,137	4-8	4-6	2-4
S3	90	105	90-150	75-85	35-40	0,283	0,145	4-6	7-9	2-4

Tabella 5.3 - Risultati ricavati dalle prove sulla sabbia satura di riferimento.

Sabbia condizionata

FIR=40% - w =10%

Test #	Pressione teorica [kPa]		Pressione ottenuta [kPa]		Coppia [Nm]	δ spost. [mm/s]	δ peso [kg/s]	Cella 1 [kPa]	Cella 2 [kPa]	Cella 3 [kPa]
	top	bottom	top	bottom						
C1	30	45	35-40	45-50	6-8	0,517	0,215	15-20	12-15	4-6
C2	90	105	80-95	90-100	6-10	0,546	0,183	20-23	12-14	4-6
C3	90	105	60-80	60-80	8-10	N.A. (0,431)	0,193	23-28	12-17	4-7

Tabella 5.4 - Risultati ricavati dalle prove sulla sabbia condizionata di riferimento.

5.2.1. Pressioni all’interno della camera

Le pressioni misurate dalle celle localizzate all’interno del serbatoio, che simula la camera di condizionamento della macchina, dovrebbero teoricamente differire, per l’effetto del peso del materiale gravante sul fondo, di un valore pari a circa 15 kPa, mentre l’andamento dei diagrammi delle pressioni dei due sensori durante la prova dovrebbe essere parallelo.

Nel caso delle prove eseguite su sabbia satura invece i sensori registrano andamenti di pressione molto variabili ed operativamente è estremamente difficile mantenere la pressione applicata costante mediante il pistone di spinta (grafico 3). Una pressione in uscita dalla centralina di 30 bar corrisponde a 0,9 bar applicati sul materiale, mentre una pressione di 40 bar a 1,2 bar.

Inoltre il sensore sul piattello (cioè nella parte alta della camera) registra valori di pressione che sono più grandi di quelli teorici e superiori a quelli registrati dal sensore inferiore. Poiché la pressione applicata è ben nota ed ottenuta dividendo la forza applicata dal pistone idraulico per la sezione del serbatoio, questi risultati anomali sono spiegabili solo ipotizzando la riduzione di superficie di contatto tra cella e terreno reagente allo sforzo nel caso delle prove.

Questo fenomeno è presumibilmente dovuto in parte alla mancanza di “pastosità” del terreno all’interno della camera, in parte all’effetto di sifonamento che l’acqua libera sulla sommità del serbatoio induce sugli strati superficiali di sabbia trafileando dal piattello durante l’applicazione del carico il quale risulta così non completamente controllabile.

Si vuole far osservare che nel caso delle prove eseguite con materiale condizionato le pressioni in camera hanno invece seguito la distribuzione teorica corretta e i valori registrati sono stati simili ai valori teorici attesi. Inoltre l’applicazione del carico durante la prova non ha creato problemi di controllo, a dimostrazione dell’omogeneità del materiale condizionato, che pertanto risulta adatto alla trasmissione delle pressioni al fronte di scavo nelle applicazioni con EPB (grafico 4).

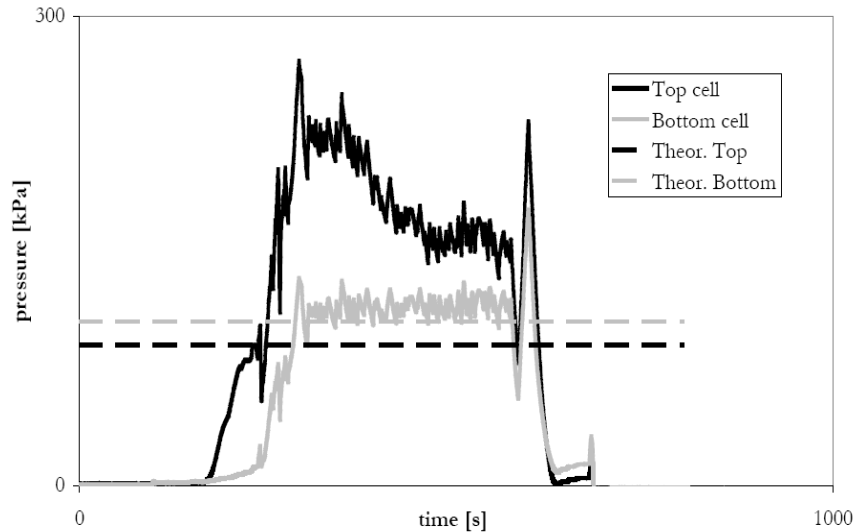


Grafico 5.1 - Andamento delle pressioni all’interno del serbatoio per la prova S3 – campione saturo.

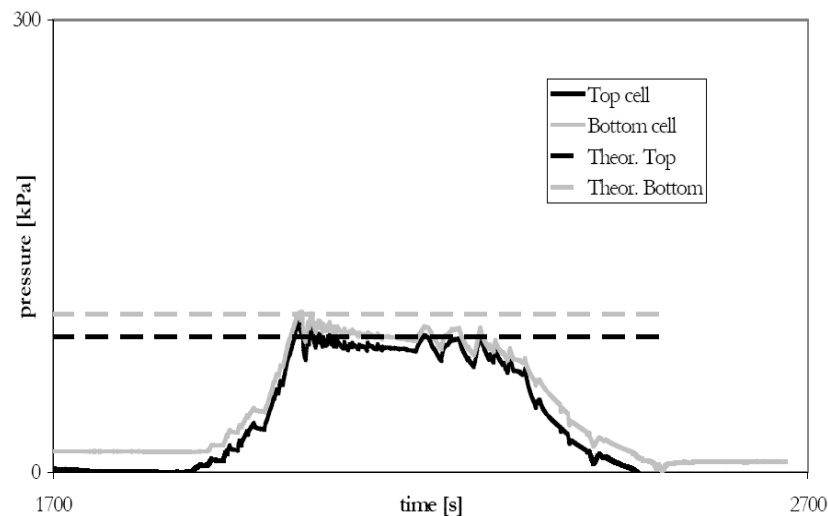


Grafico 5.2 - Andamento delle pressioni all’interno del serbatoio per la prova C2 – campione condizionato.

5.2.2. Coppia della coclea

Durante le prove sulla sabbia saturo si osserva che:

- la coppia che agisce sull’albero della coclea durante la fase di estrazione assume un valore medio di circa 35- 40 Nm (grafico 5.3);
- a piccola scala i valori sono variabili, il che è indice della disomogeneità del terreno non trattato.



Nelle prove su sabbia condizionata si osserva che:

- la coppia che agisce sull'albero della coclea è molto più bassa rispetto a quella misurata per la sabbia satura e pari a circa 6 – 12 Nm (grafico 5.3);
- è presente invece una maggiore uniformità dei valori registrati, anche a piccola scala. Questo fenomeno è un chiaro indice che il condizionamento consente di ottenere una maggiore omogeneità del materiale.

Si ricorda che la velocità di rotazione è stata mantenuta costante durante la campagna di prove e pari a 6 rpm.

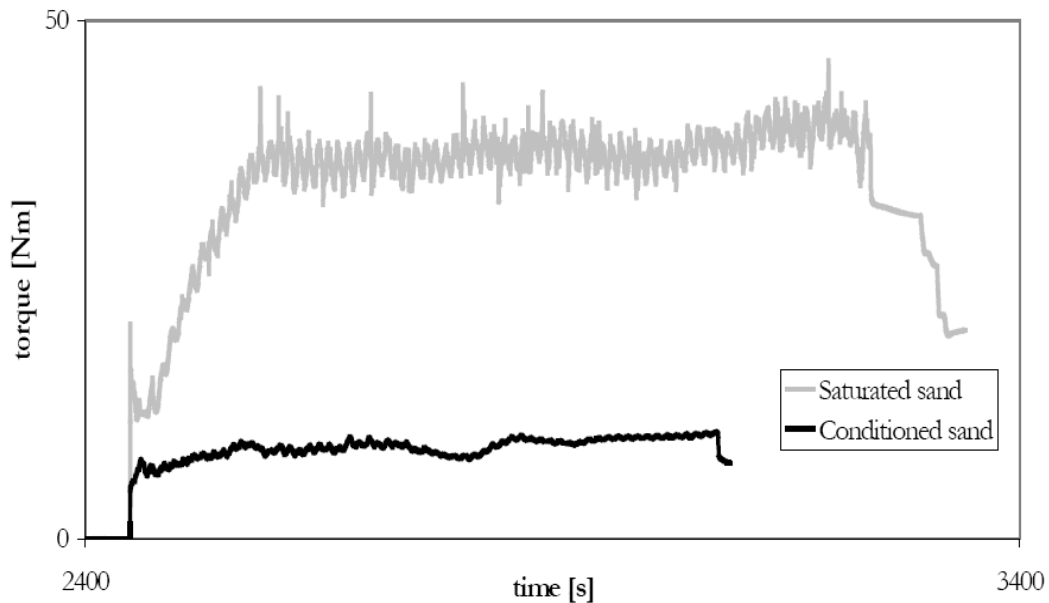


Grafico 5.3 - Andamento dei valori di coppia torcente della coclea per la prova S3 – campione saturo e per la prova C1 – campione condizionato.

5.2.3. Spostamento del piattello di carico

Lo spostamento del piattello di carico registrato durante le prove sulla sabbia satura, dopo un primo tratto di assestamento durante il quale viene raggiunta la pressione richiesta nel pistone idraulico, è circa lineare, con velocità di spostamento medie pari a circa 0,3mm/s (grafico 5.4).

Per le prove su sabbia condizionata lo spostamento del piattello di carico diventa lineare dopo la fase di assestamento e in questo caso la velocità di discesa del pistone è mediamente pari a $v = 0,5\text{mm/s}$ (grafico 5.4), cioè aumenta la portata estrattiva a parità di rotazione della coclea.

La maggiore velocità di discesa del pistone è dunque un indice della maggiore capacità volumetrica di estrazione della coclea, che mantenendo il flusso di estrazione costante riesce ad estrarre un maggior quantitativo di materiale.

Tale evidenza si riscontra anche a seguito dell'analisi delle pressioni lungo il fusto della coclea: nel caso di sabbia condizionata si registrano valori molto più elevati (v. par. 5.2.5)

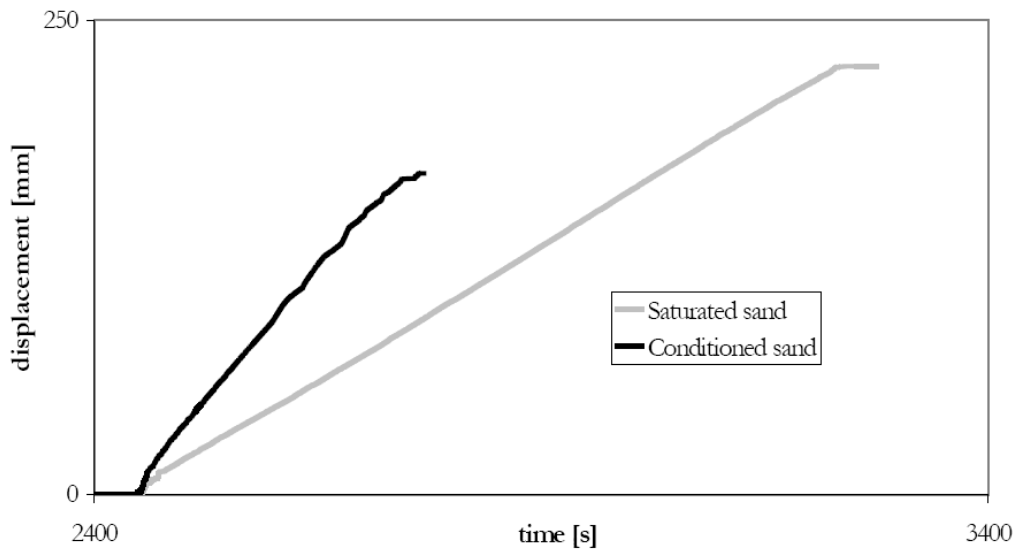


Grafico 5.4 - Spostamento del piattello di carico per la prova S3 – campione saturo e per la prova C2 – campione condizionato.

5.2.4. Peso del materiale estratto

Il gradiente di estrazione, espresso come peso di materiale estratto nel tempo, evidenzia un valore pressoché costante e pari mediamente a 0,14 kg/s per le prove su sabbia saturo (grafico 5.5).

Per quanto riguarda le prove su sabbia condizionata, il gradiente di estrazione di materiale è circa 0,2 kg/s, valore simile a quanto registrato durante le prove sul terreno saturo (grafico 5.5).

Tuttavia poiché il terreno condizionato è meno denso della sabbia saturo questa similitudine giustifica la differenza tra i gradienti di spostamento del pistone nelle due prove.

Calcolando infatti la densità media del materiale estratto, in base al gradiente di volume ottenuto dall'abbassamento del pistone e il gradiente di peso fornito dalle misurazioni della bilancia, si ottiene:

per la sabbia saturo: $\rho = 1,78 \text{ kg/dm}^3$

per la sabbia condizionata: $\rho = 1,52 \text{ kg/dm}^3$

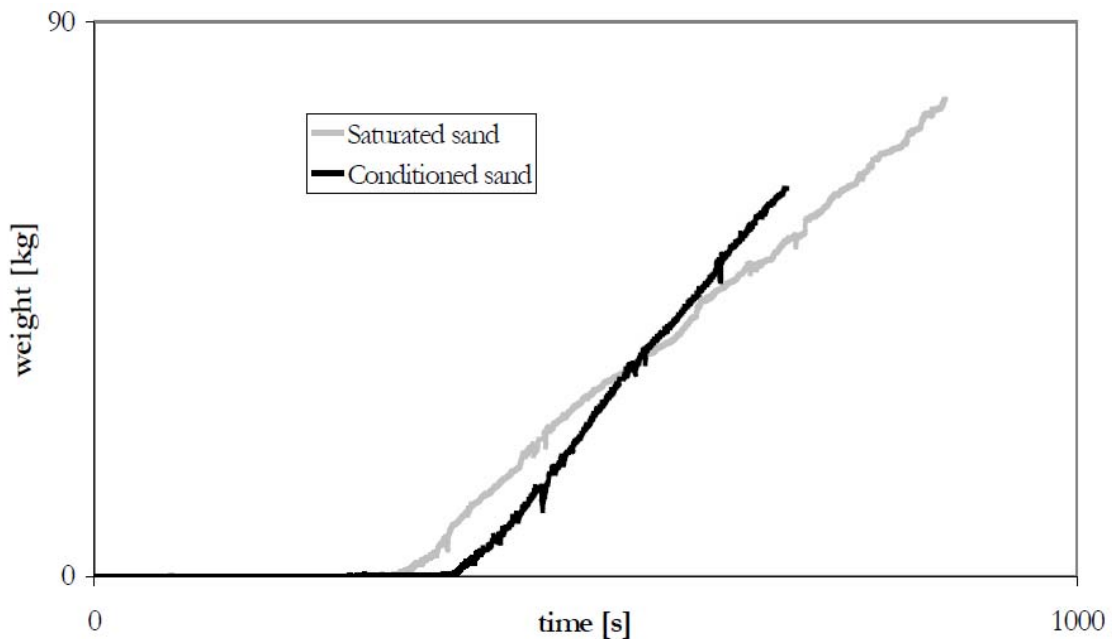


Grafico 5.5 - Peso del materiale estratto per la prova S3 – campione saturo, e per la prova C2 – campione condizionato.

5.2.5. Pressioni lungo coclea

Analizzando i valori di pressione lungo coclea registrati durante le prove con sabbia satura, si evince che questi decadono in direzione dello scarico e le differenze tra le tre celle in termini assoluti sono ridotte e dell’ordine di 2-4 kPa (grafico 5.6).

In particolare, inoltre, si osserva che il valore di pressione misurato dalla cella più vicina al serbatoio è di un ordine di grandezza inferiore rispetto alla pressione misurata sul fondo del serbatoio, il che è una ulteriore dimostrazione che la sabbia saturo non consente una corretta trasmissione delle pressioni da parte del terreno, durante l’estrazione con coclea.

La presenza di pressione sulle prime due celle della coclea che tende a salire ancor prima che questa venga messa in moto è un’evidenza dell’esistenza di acqua libera nella sabbia saturo.

Al contrario di quanto detto sopra, nel caso delle prove su sabbia condizionata lungo la coclea si osserva una evidente perdita di carico che si sviluppa a partire dal valore di pressione del serbatoio riscontrata dalla cella inferiore (grafico 5.7).

È evidente che il valore di pressione all’interno del serbatoio e quello sulla prima cella sono simili, a dimostrazione della buona trasmissione delle pressioni del materiale condizionato; inoltre i valori di pressione misurati dalle celle sono maggiori rispetto a quelli delle prove su sabbia saturo e la variazione della pressione in un lasso di 60 secondi ha una migliore uniformità.

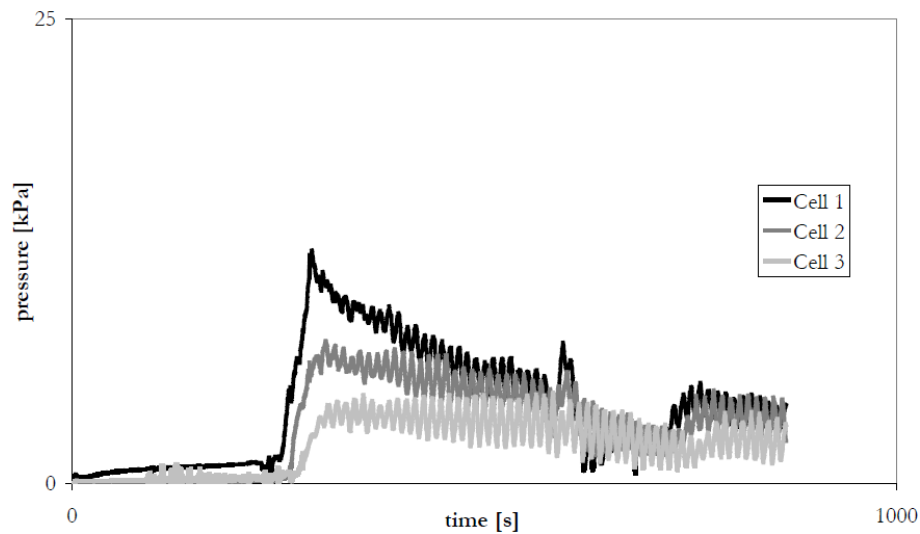


Grafico 5.6 - Pressioni lungo la coclea durante la prova S2 – campione saturo. Le celle sono numerate seguendo la direzione di estrazione: la cella 1 è la più vicina al serbatoio, la cella 3 è la più vicina al punto di sbocco del materiale.

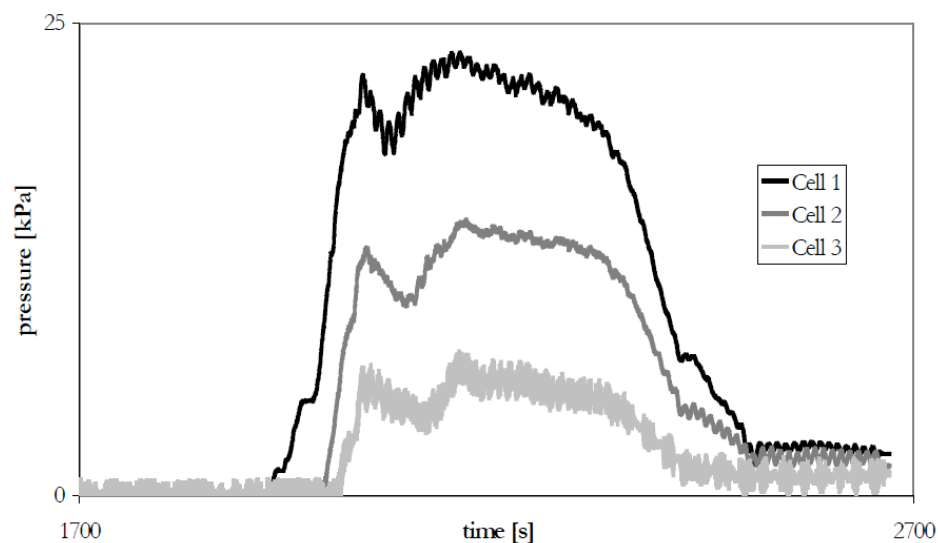


Grafico 5.7 - Pressioni lungo la coclea durante la prova C2 – campione condizionato.

5.2.6. Conclusioni sulle prove di verifica

Confrontando i risultati ottenuti dalle prove eseguite con l’attrezzatura sperimentale di estrazione con coclea, utilizzando sabbia saturo e sabbia condizionata, risultano evidenti sia le differenze di comportamento tra i due materiali durante le prove sia come queste differenze vengano messe in luce dall’apparato sperimentale in modo chiaro.

In particolare è possibile osservare come l’efficienza e le prestazioni dell’estrazione con coclea da una camera in pressione migliorino in modo evidente in seguito al condizionamento.



5.3. Prove di estrazione controllata sulla formazione Monte Morello

5.3.1 Parametri di condizionamento utilizzati per le prove di estrazione sulla formazione Monte Morello (MML).

Sulla base delle prove di slump realizzate al fine di caratterizzare il materiale oggetto di studio, sono stati scelti due differenti set di condizionamento che rappresentassero rispettivamente un buon condizionamento ad un tempo t0min e ad un tempo t30min calcolato a partire dal momento di aggiunta della schiuma nel terreno.

In tutte le prove di estrazione l’umidità naturale del terreno in esame è pari a circa allo 0% misurata in laboratorio, mentre è stata aggiunta acqua pari al 3% in peso. Questo valore è stato definito sulla base e di accordo con quanto suggerito dai tecnici SPEA.

Il tasso di espansione della schiuma (FER) utilizzata in tutte le prove è di 15.

Il tasso di iniezione FIR è stato del 40% per la prova MML-A con una concentrazione di agente schiumogeno del 2%, mentre per la prova MML-B il FIR utilizzato è stato del 70% con una concentrazione dell’agente schiumogeno del 2,5%. I valori qui riportati sono stati concordati con i tecnici delle due case produttrici degli agenti schiumogeni intervenuti nelle fasi preliminari alla realizzazione delle prove.

I parametri utilizzati e precedentemente descritti sono riassunti nella seguente tabella 3.

Tabella 5.5 - Parametri di condizionamento delle prove di estrazione sulla formazione Monte Morello

Prova	Pterreno	wagg	wagg	Agente	c	FER	FIR	Qadditivo_agg
-	[kg]	[%]	[l/m ³]	[tipo]	[%]	[-]	[%]	[l/m ³]
MML - A	325	3	45	A	2	15	40	0,53
MML - B	325	3	45	B	2,5	15	70	1,17

Analogamente alle prove di verifica descritte nel paragrafo 5.2, la velocità di rotazione per la vite della coclea è stata impostata in 6 rpm che è stata ritenuta adatta alla simulazione del comportamento della macchina di scavo.

5.3.2 Risultati ottenuti dalle prove di estrazione controllata sulla formazione Monte Morello.

I risultati ottenuti dalle prove sono sintetizzati nella tabella 5.6, dove sono stati riportati a scopo di confronto anche i valori medi dei risultati ricavati durante la campagna di prove sulla sabbia campione, discussi nel paragrafo 5.2.

I risultati di dettaglio ricavati dai singoli sensori e riportati in forma grafica sono più ampiamente descritti e commentati nel seguito del presente paragrafo, ma risulta fin da subito evidente come il condizionamento con un FIR del 70% ha caratteristiche più idonee all’uso dell’EPB rispetto un FIR del 40%, con qualunque agente schiumogeno condizionante, che in pratica non ha reso possibile, se non in minima parte, l’estrazione del materiale dalla camera in pressione.

Test #	Pressione teorica [kPa]		Pressione ottenuta [kPa]		Coppia [Nm]	δ spost. [mm/s]	δ peso [kg/s]	Cella 1 [kPa]	Cella 2 [kPa]	Cella 3 [kPa]
	top	bottom	top	bottom						
Sabbia satura	90	105	~150	~100	30-40	0,3	0,14	8/4	6/4	4/2
Sabbia condizionata	90	105	~80	~95	6-10	0,5	0,2	28/20	17/12	6/4
MML - A	90/120	105/135	58/75	n.d	18-20	0,038	0,023	5/2	5/2	5/2
MML - B	90	105	50/70	n.d	10-12	0,39	0,158	25/15	18/10	8/5

Tabella 5.6 - Risultati ottenuti dalle prove sulla formazione Monte Morello, confrontati con i valori medi dei risultati delle prove di verifica sulla sabbia campione.

5.3.3 Prova MML – A

Pressioni all’interno della camera.

La pressione teorica iniziale all’interno del serbatoio è stata impostata pari a 90 kPa, che corrisponde ad una pressione della centralina oleodinamica di circa 30 bar. Nello sviluppo della prova, considerate le difficoltà di estrazione del materiale dalla camera, tale pressione è stata aumentata prima ad un valore alla centralina di 40 bar e successivamente, per un breve lasso di tempo prima della conclusione della prova medesima, a 50 bar al fine di verificare se in questo modo fosse possibile estrarre il materiale.

La trasmissione della pressione sul materiale da parte del piattello è buona e sono visibili dai grafici con chiarezza gli step di incremento di pressione alla centralina. Il mantenimento dell’applicazione della pressione nel corso della prova, anche se sono riscontrate alcune oscillazioni di valore, dovute alla eterogeneità del materiale e alla conseguente difficoltà di ottenere una distribuzione del tutto omogenea della pressione sulla superficie del materiale.

Nella relazione non sono presenti i valori registrati dalla cella di fondo, a causa di un malfunzionamento della stessa, manifestatasi nel corso delle prove e che non è stato possibile sostituire in relazione ai tempi previsti per la campagna di prove.



Figura 5.4 - Pressione applicata dalla pompa oleodinamica durante la prova MML-A.

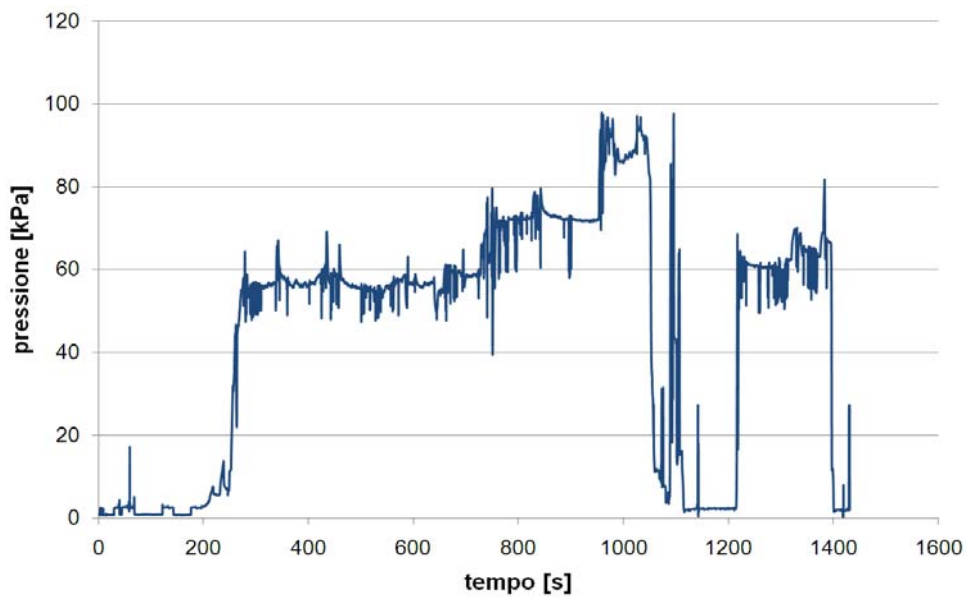


Grafico 5.8 - Andamento delle pressioni nel serbatoio durante la prova MML-A.

Coppia della coclea

La coppia richiesta alla coclea per l’estrazione del terreno condizionato parte da un valore di circa 20 kNm per poi scendere sensibilmente, fenomeno questo dovuto alle difficoltà di estrazione del materiale durante la prova.

Il non completo riempimento della coclea, dovuto alla difficoltà di estrazione del materiale, influisce direttamente sul valore di coppia necessario all’estrazione, che risulta essere assai basso. I picchi di valore registrati nel corso della prova sono da ricondursi alla presenza di grani grossolani nel materiale che offrono una maggior resistenza all’estrazione infilandosi nell’intercapedine tra la vite della coclea e la camicia metallica.

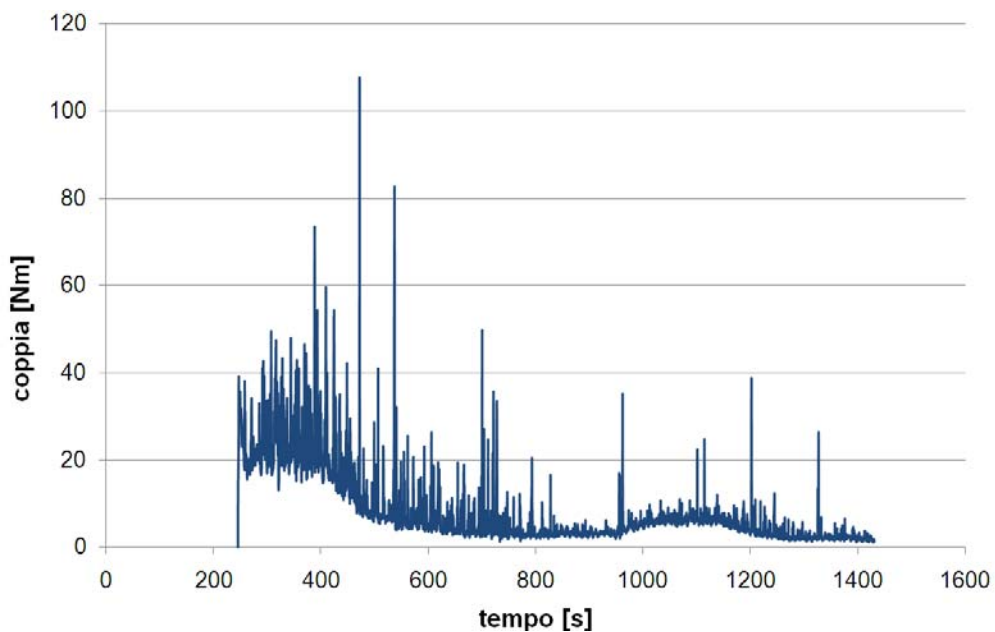


Grafico 5.9 - Coppia assorbita dalla vite della coclea durante la prova MML – A.

Spostamento del piattello di carico

Il grafico 12 riporta l'andamento dello spostamento del piattello di carico e sono evidenti le difficoltà da parte del materiale ad uscire dalla coclea. In seguito all'abbassamento iniziale per entrare in contatto con il materiale (circa 250mm) infatti il piattello risulta essere pressappoco fermo, con un gradiente di avanzamento pari a 0,038 mm/s , pari a pochi cm nel corso dell'intera prova.

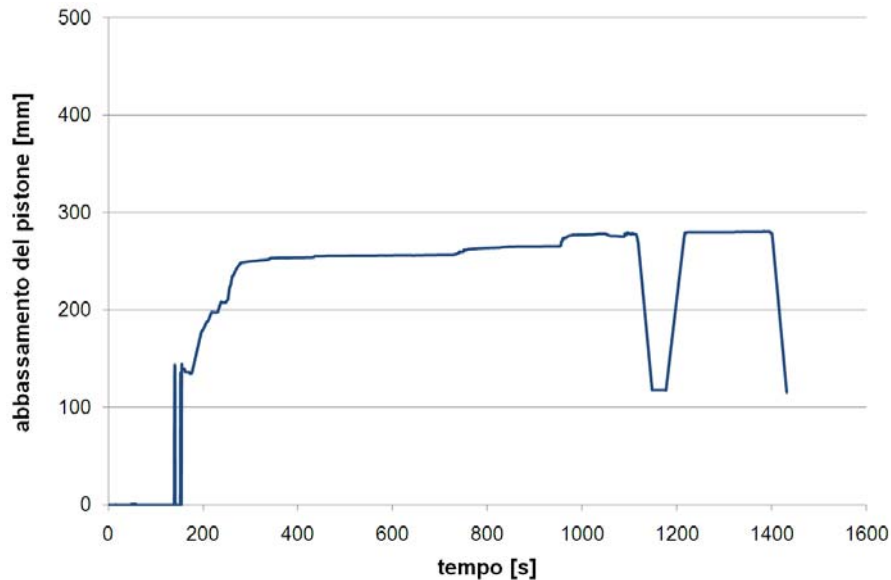


Grafico 5.10 - Spostamento del piattello di carico durante la prova MML – A.

Peso del materiale estratto

Il grafico 13 indica come l'estrazione del materiale dalla coclea sia stato di modesta entità, a conferma delle difficoltà di estrazione del Monte Morello con i parametri di condizionamento utilizzati per la prova.

Il δ peso è pari a 0,023 kg/s

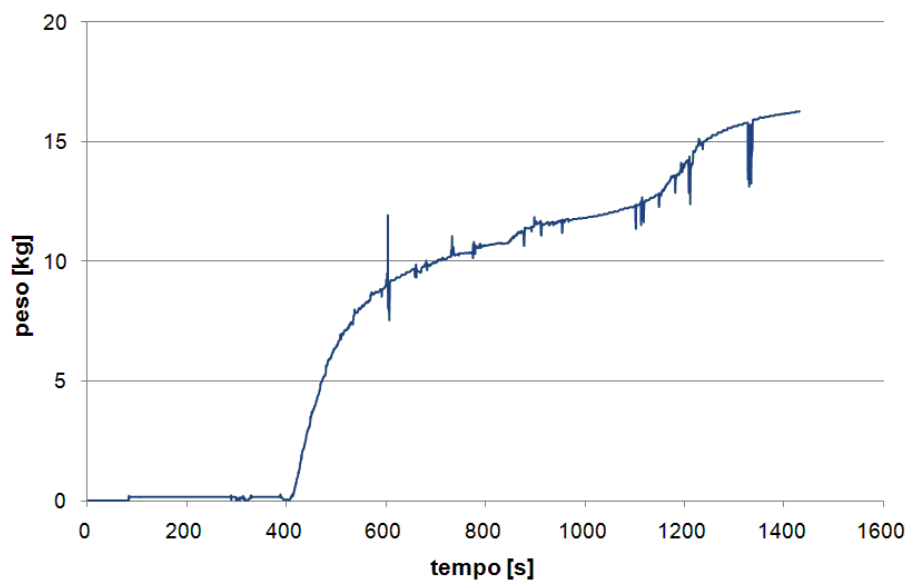


Grafico 5.11 - Peso del terreno estratto durante la prova MML – A.

Pressioni lungo la coclea

Le pressioni registrate dai sensori posti lungo la coclea non hanno una particolare rilevanza in questa specifica prova, in quanto come già precedentemente evidenziato, le difficoltà nell'estrarre il materiale dalla camera hanno fatto sì che non si verificasse il previsto e necessario riempimento della coclea. Per tale motivo i valori di pressioni registrati nelle tre celle sono bassi ed indipendenti dalla loro posizione lungo la coclea.

I picchi sono presumibilmente dovuti alla presenza di grani di maggiori dimensioni rispetto alla matrice del terreno che passano sulle celle di pressione sollecitandole in modo anomalo.

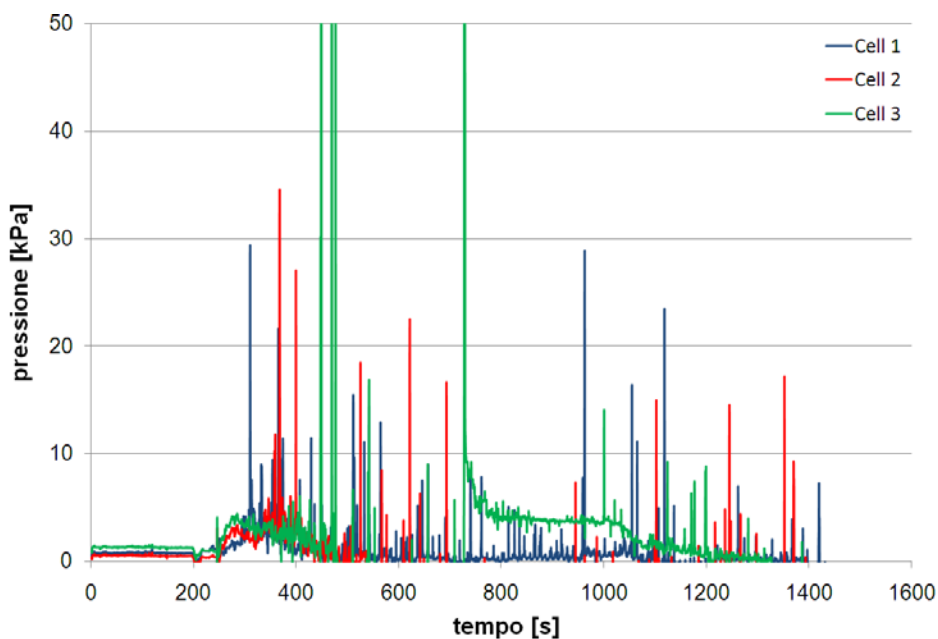


Grafico 5.12 - Andamento delle pressioni lungo coclea durante la prova MML - A

La seguente immagine mostra le difficoltà di estrazione del materiale condizionato, evidenziate dalla creazione di un vuoto nell'intorno della coclea e dell'effetto arco da parte del materiale stesso.



Figura 5.5 - Vuoto nel materiale creato dalla rotazione della coclea.

Slump test eseguiti sul materiale oggetto di prova

Durante la fase di caricamento del serbatoio e durante la prova di estrazione mediante coclea sono state eseguite alcune prove di slump, finalizzate a valutare le condizioni di plasticità del materiale estratto prima e dopo l’ estrazione attraverso la coclea.

La tabella 5.7 riassume i risultati ottenuti, i quali indicano che il materiale, una volta uscito dalla coclea, ha un comportamento scadente per quel che riguarda le caratteristiche di plasticità e di abbassamento al cono dovuta al decadimento delle bolle in relazione al tempo di prova ed al limitato volume di materiale estratto

Tale risultato suggerisce che è necessario aumentare il quantitativo della schiuma necessaria per ottenere un buon condizionamento ed un’ estrazione regolare tramite coclea dalla camera in pressione.




Ordine dello slump	Abbassamento al cono [cm]	Fotografia
#1 Prima della estrazione	17	
#2 Prima della estrazione	16	
#3 Dopo l’ estrazione	19	

Tabella 5.7 - Risultati ottenuti dalle prove di abbassamento al cono di slump - Prova MML – A.

5.3.4 Prova MML – B

Pressioni all’interno della camera.

La pressione teorica iniziale all’interno del serbatoio è stata impostata pari a 90 kPa, che corrisponde ad una pressione della centralina oleodinamica di circa 30 bar. Nello sviluppo della prova, considerate la buona estrazione del materiale dalla camera tale pressione è stata mantenuta costante. La pressione misurata sul materiale parte da un valore di 50 kPa, contro i 90 kPa teorici, ma durante la prova aumenta gradualmente questo a prova della migliore omogeneizzazione ottenuta con il condizionamento rispetto alla prova MML – A.

Il tempo di applicazione della pressione è di 300s, e precisamente tra il tempo di prova 120s e il tempo di prova 420s.



Figura 5.6 - Pressione applicata dalla pompa oleodinamica durante la prova MML- B.

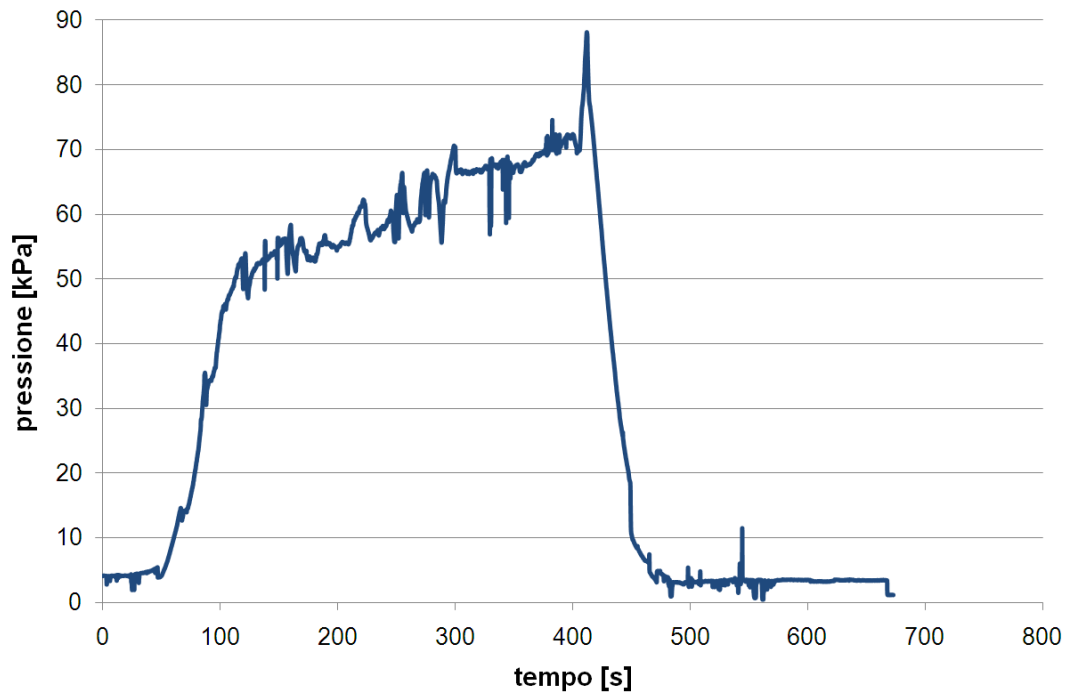


Grafico 5.13 - Andamento delle pressioni nel serbatoio durante la prova MML – B.

Coppia della coclea

La coppia richiesta alla coclea per l’estrazione del terreno condizionato durante la fase di applicazione della pressione (tra $t=120s$ e $t=420s$) si attesta nel corso della prova attorno ad un valore medio di 13 Nm, in linea con quello registrato per la sabbia correttamente condizionata, mentre i picchi puntuali sono dovuti alla presenza della frazione grossolana del materiale oggetto di studio.

In seguito alla cessazione dell’applicazione della pressione, ma proseguendo con l’estrazione del materiale, i valori di coppia aumentano intorno ad un valore medio di 27 Nm, in quanto viene a mancare l’aiuto all’estrazione offerto dal pistone in abbassamento nel cilindro.

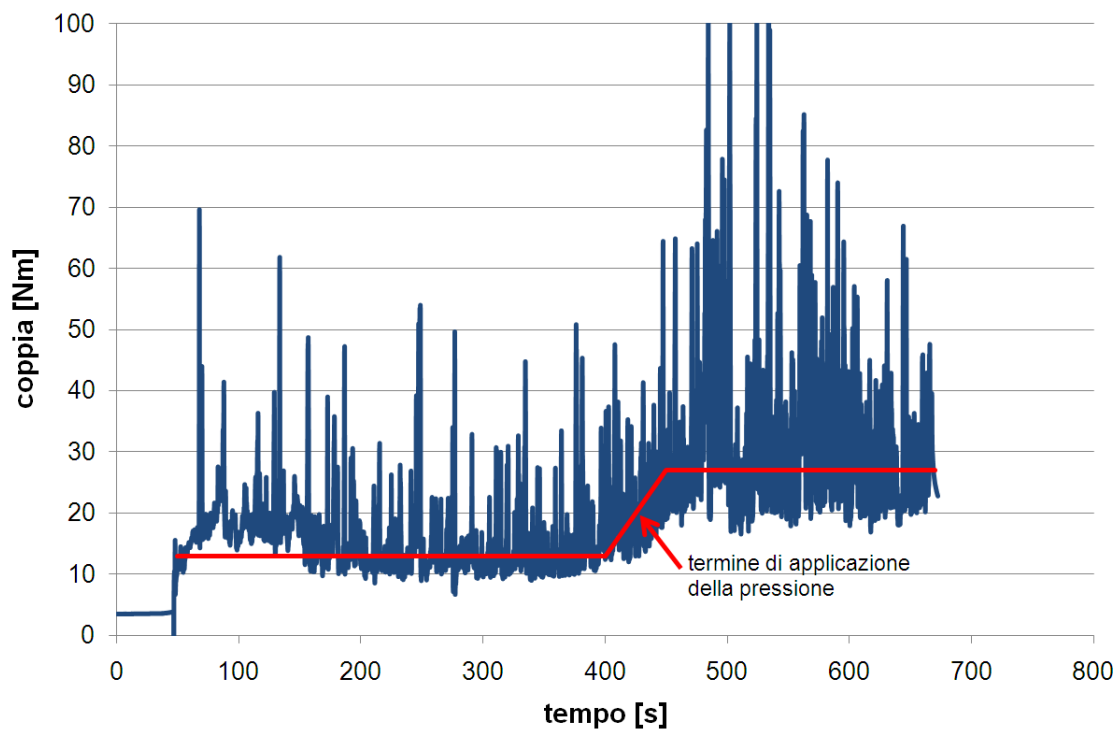


Grafico 5.14 - Coppia assorbita dalla vite della coclea durante la prova MML – B.

Spostamento del piattello di carico

Il grafico 5.15 riporta l’andamento dello spostamento del piattello di carico ed in particolare si constata che il durante la fase di applicazione della pressione mantiene un andamento e una velocità di abbassamento costante, segno questo di buon condizionamento e qualità del materiale.

La velocità di abbassamento è pari a 0,39 mm/s, posizionandosi a metà strada tra quelle caratteristiche della sabbia saturata e della sabbia condizionata.

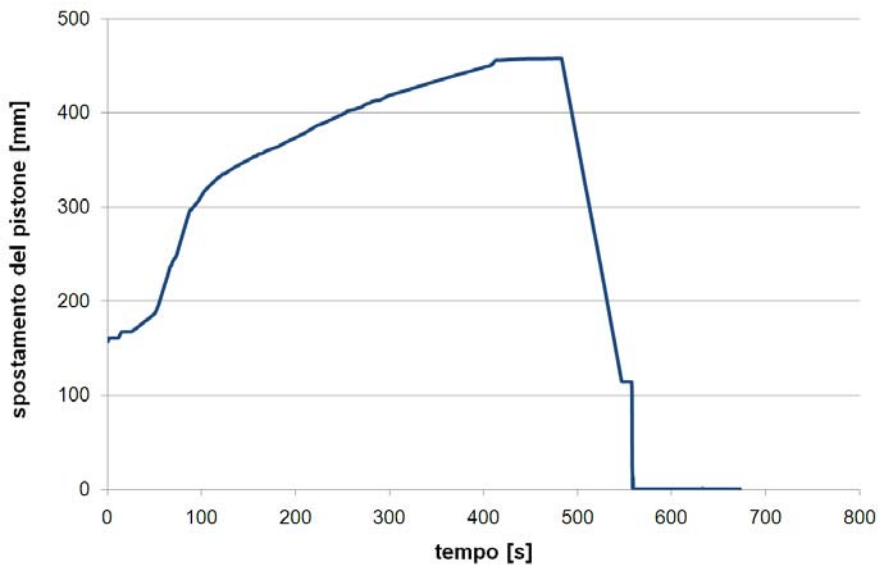


Grafico 5.15 - Spostamento del piattello di carico durante la prova eseguita MML - B.

Durante la prima fase di abbassamento del piattello si è riscontrato uno sversamento della schiuma in eccesso al di fuori del bidone trafilando sulla guarnizione tra piattello e cilindro. Questo fenomeno può essere indice che lavorando con valori alti di FIR possa esserci una separazione delle bolle nella parte alta della camera di scavo. Tale fenomeno dovrà essere quindi tenuto sotto controllo con particolare cura durante le lavorazioni da parte degli operatori della macchina.

Peso del materiale estratto

Il grafico 5.16 indica come l'estrazione del materiale dalla coclea rimanga costante nel tempo, sia durante la fase di applicazione della pressione, fino a $t=420s$, sia quando la pressione viene azzerata ed è pari a circa 0,16 kg/s. Questo andamento è ancora ulteriore conferma di buon condizionamento e capacità di riempimento della coclea da parte del materiale condizionato.

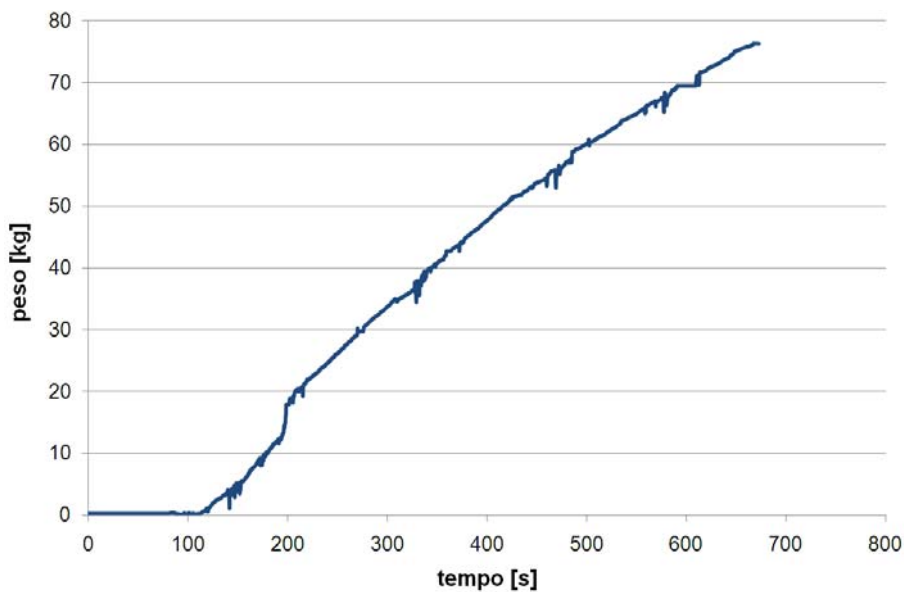


Grafico 5.16 - Peso del terreno estratto durante la prova MML – B.

Pressioni lungo coclea

Le pressioni registrate dai sensori mostrano un andamento simile a quello dato dalla sabbia condizionata fino a quando vien applicata pressione al materiale, presentando quindi una graduale riduzione della pressione esercitata dal materiale nell’avvicinarsi all’uscita della coclea, mentre quando la pressione viene azzerata, dopo $t=420s$, si verifica una graduale inversione dei valori e questi cessano di essere significativi ai fini della prova. I picchi sono presumibilmente dovuti alla presenza di grani di maggiori dimensioni rispetto alla matrice del terreno che passano sulla cella di pressione sollecitandole in modo anomalo.

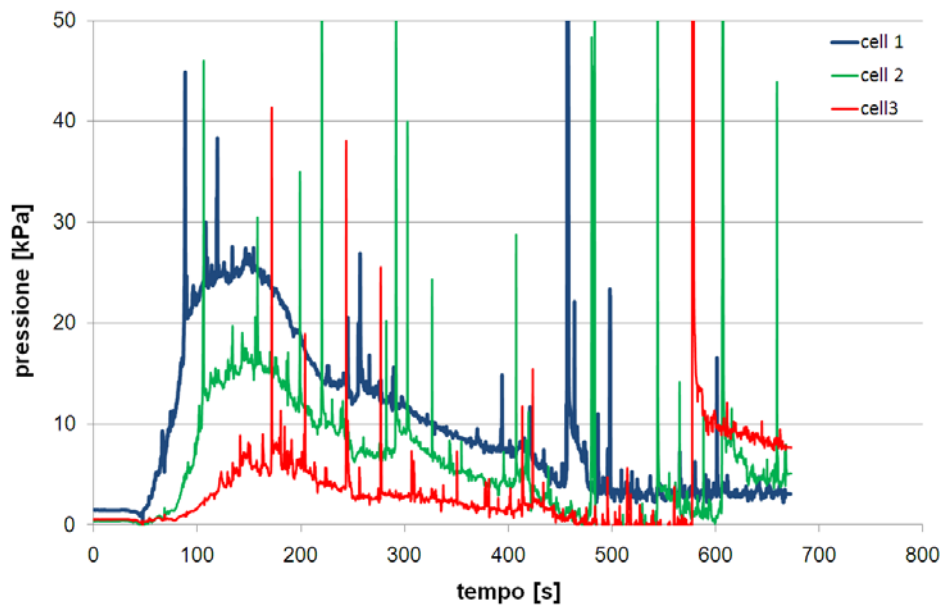



Grafico 5.17 - Andamento delle pressioni lungo coclea durante la prova MML – B.

Slump test eseguiti sul materiale oggetto di prova

Durante la fase di caricamento del serbatoio e durante la prova di estrazione mediante coclea sono state eseguite alcune prove di slump, finalizzate a valutare le condizioni di plasticità del materiale estratto prima e dopo l’estrazione attraverso la coclea.

La tabella 5.8 riassume i risultati ottenuti, i quali indicano che il materiale, che prima dell’estrazione con coclea ha un comportamento un po’ troppo fluido, a seguito dell’estrazione, ad eccezione della prima quota parte di materiale, ha un comportamento buono per quel che riguarda le caratteristiche di plasticità e di abbassamento al cono.

Ordine dello slump	Abbassamento al cono [cm]	Fotografia
#1 Prima dell’estrazione	19	

#2 Materiale estratto 1 – in pressione	21	
#3 Materiale estratto 2 - in pressione	20	
#4 Materiale estratto 3 - in pressione	18	
#5 Materiale estratto 4 – non in pressione	17	
#6 Materiale estratto 5 – non in pressione	18	

Tabella 5.8 - Risultati ottenuti dalle prove di abbassamento al cono di slump sul materiale. Prova MML – B.

5.3.5 Commenti finali e confronto delle prove effettuate sulla formazione Monte Morello.

Le due prove di estrazione effettuate sulla formazione Monte Morello hanno fornito risultati molto diversi in base alle diverse quantità di condizionamento utilizzate, ma comunque entrambe utili a comprendere il comportamento di questo materiale.

In particolare, per la realizzazione delle due prove (effettuate utilizzando due differenti agenti schiumogeni che avevano fornito comportamenti analoghi nelle prove di slump che quindi sono da ritenere equivalenti nei confronti della prova di estrazione) sono stati mantenuti invariati i parametri relativi all'acqua aggiunta e al FER, mentre sono stato fatti variare il FIR, che è stato definito del 40% per la prova MML-A e del 70% per la prova MML-B, e la concentrazione dell'agente schiumogeno, del 2% nella prova MML-A e del 2,5 nella prova MML-B.

Dall'analisi dei risultati, già presentati nei precedenti paragrafi, è chiaro come il materiale condizionato con i parametri di cui alla prova MML-A non sia risultato idoneo all'estrazione da camera in pressione. Questa evidenza permette di indicare un limite inferiore di condizionamento relativo al Monte Morello oggetto del presente studio.

Un condizionamento effettuato utilizzando un FIR del 70%, nonostante un materiale molto fluido prima dell'estrazione, permette una buona trasmissione di pressione all'interno del materiale stesso ed un'estrazione regolare attraverso la coclea, nonché una buona pastosità del materiale in uscita che risulta meno liquido rispetto all'inizio della prova, questo in relazione al tempo di durata della prova ed al rimaneggiamento del materiale.

I grafici presentati nel seguito evidenziano le differenze di comportamento del materiale durante le due prove, non tanto nella capacità di trasmissione della pressione dal piattello di carico al materiale condizionato (grafico 5.18), ma piuttosto nella capacità di trasmettere pressione attraverso il materiale stesso e di conseguenza attraverso la coclea, nella velocità di abbassamento del piattello di carico e nella quantità di materiale estratto.

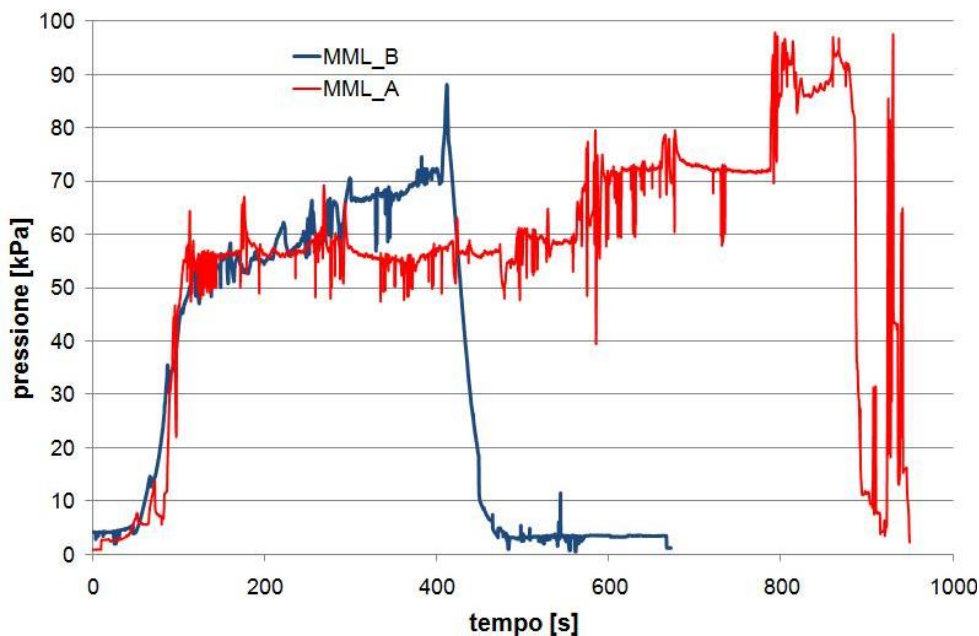


Grafico 5.18 - Andamento delle pressioni lungo coclea durante le prove di estrazione del Monte Morello.

Per quel che riguarda i valori di coppia registrati durante le due prove, il grafico 5.19 mostra come durante la prova MML-A questi sia decisamente inferiori. In questo caso però, i valori bassi della prova MML-A non sono da attribuirsi ad un buon

condizionamento del materiale, ma semplicemente al fatto che venivano estratte quantità minime di terreno, dal momento che la coclea girava praticamente “a vuoto” all’interno del materiale in pressione.

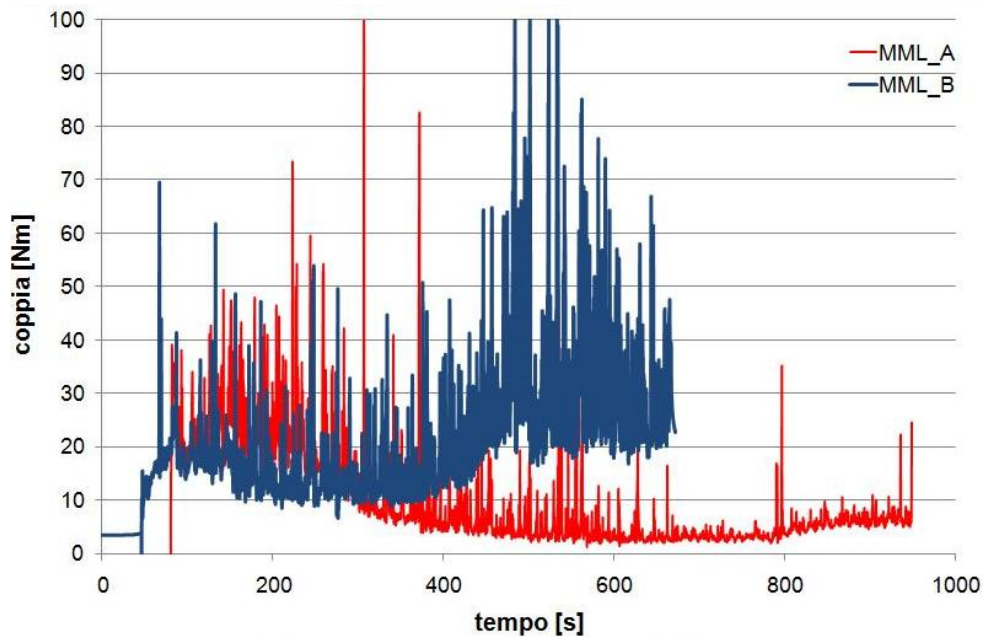


Grafico 5.19 - Andamento dei valori di coppia durante le prove di estrazione del Monte Morello.

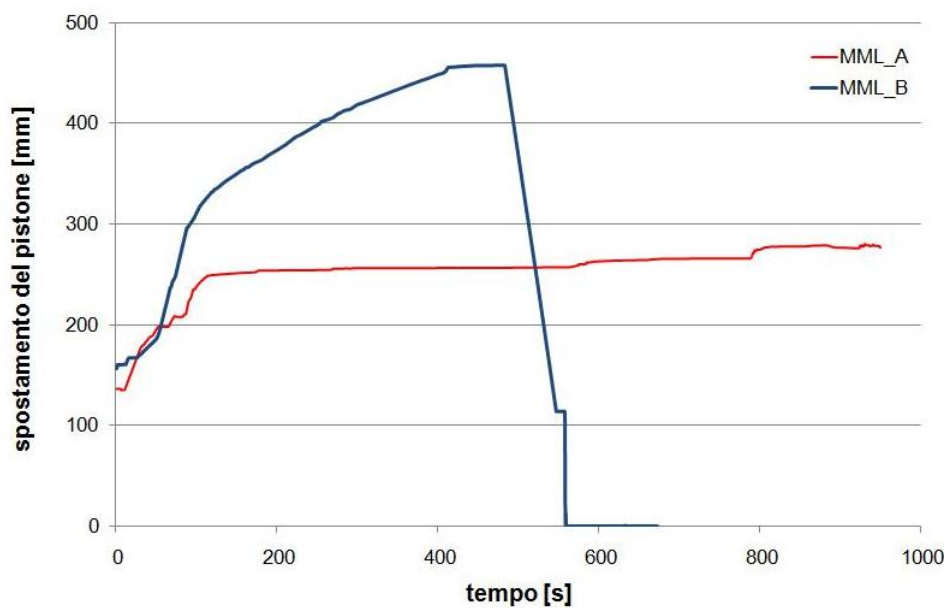


Grafico 5.20 – Spostamento del pistone durante le prove di estrazione del Monte Morello.

La difficoltà di estrazione del materiale è evidenziata nel confronto tra le velocità di abbassamento del pistone (grafico 5.20) e della quantità di materiale estratto (grafico 5.21).

Il pistone ha infatti incontrato estreme difficoltà nel procedere nella sua corsa nel corso della prova MML-A a causa del vuoto creatisi in prossimità del punto di raccolta di materiale della coclea e questo si è ripercosso nella quantità di materiale estratto che è stato di soli 12 kg nel corso della prova MML-A contro gli oltre 70 kg durante la prova MML-B.

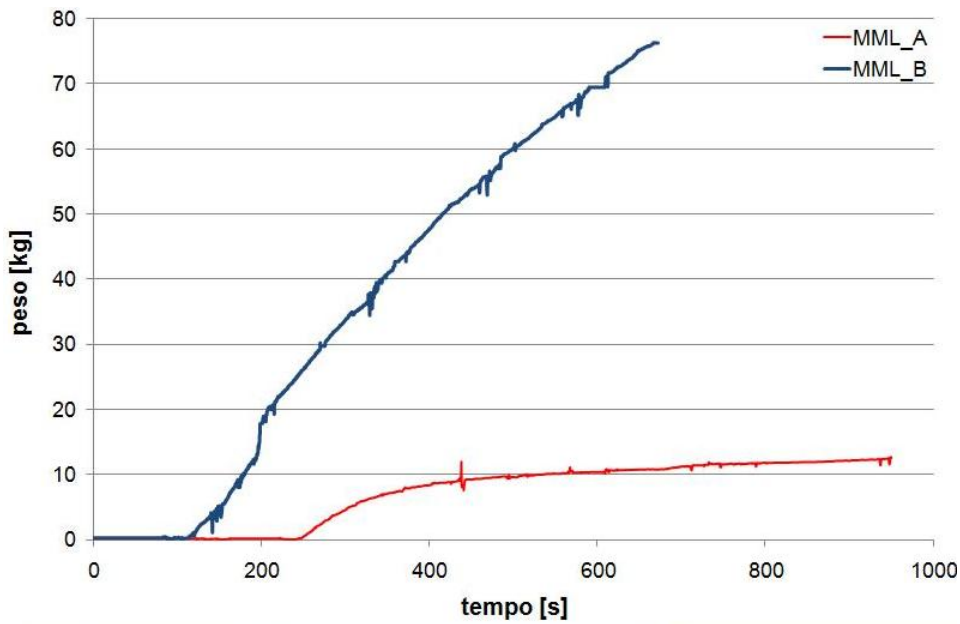


Grafico 5.21 – Spostamento del pistone durante le prove di estrazione del Monte Morello.

Tutte queste differenze sono infine riassunte nei grafici che riportano le pressioni lungo coclea, ben definite e progressivamente ridotte lungo coclea nella prova MML-B, indefinite e molto basse nella prova MML-A (grafico 5.22).

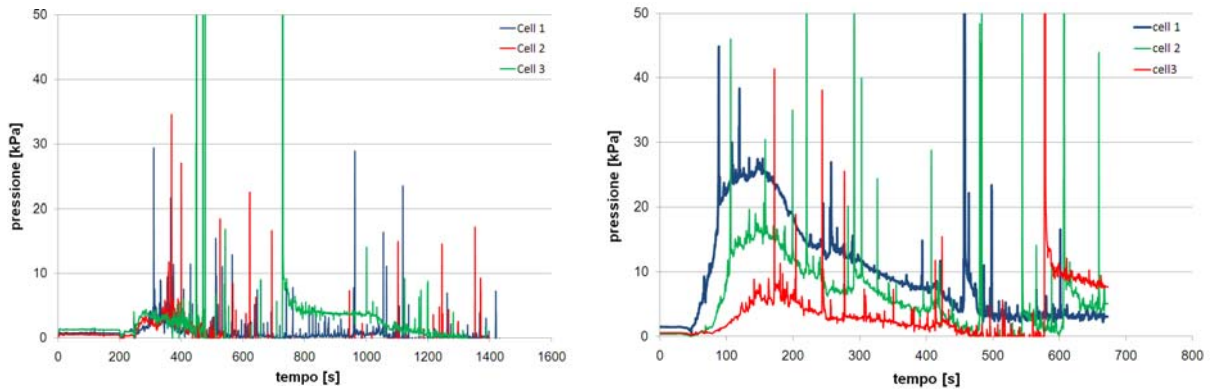


Grafico 5.21 – Spostamento del pistone durante le prove di estrazione del Monte Morello. MML-A sinistra, MML-B destra.

In conclusione un condizionamento come quello adottato nella prova MML-B fornisce buoni risultati ai fini dell'estrazione e della qualità del materiale condizionato nei limiti e nelle condizioni di prova dell'attrezzatura sperimentale adottata.



5.4. Prove di estrazione controllata sulla formazione Sillano

5.4.1 Parametri di condizionamento utilizzati per le prove di estrazione sulla formazione Sillano.

Sulla base delle prove di slump realizzate al fine di caratterizzare il materiale oggetto di studio, è stato scelto un set di condizionamento che rappresentasse rispettivamente un buon condizionamento ad un tempo t30min calcolato a partire dal momento di aggiunta della schiuma nel terreno. Tale mix è stato realizzato utilizzando due diversi agenti schiumogeni (A e C).

In tutte le prove di estrazione l’umidità naturale del terreno in esame è pari a circa al 5% misurata in laboratorio ed è stata aggiunta acqua pari al 10% in peso per simulare le condizioni che ci si aspetta di incontrare nel corso dello scavo e che sono state ampiamente discusse e condivise con i tecnici SPEA.

Il tasso di espansione della schiuma (FER) utilizzata in tutte le prove è di 15.

Il tasso di iniezione FIR è stato del 65%, con il limite di precisione del generatore di schiuma, per entrambe le prove SIL-A e SIL-B. I valori qui riportati sono stati concordati con i tecnici dei produttori degli agenti schiumogeni intervenuti nelle fasi preliminari alla realizzazione delle prove.

I parametri utilizzati e precedentemente descritti sono riassunti nella seguente tabella 3.

Analogamente alle prove di verifica descritte nel paragrafo 4.2, la velocità di rotazione per la vite della coclea è stata impostata in 6 rpm che è stata ritenuta adatta alla simulazione del comportamento della macchina di scavo.

Tabella 5.9 - Parametri di condizionamento delle prove di estrazione sulla formazione Sillano.

Table with 9 columns: Prova, Pterreno, wagg, wagg, Agente, c, FER, FIR, Qadditivo_agg. Rows include SIL-A and SIL-B with various parameters.

5.4.2 Risultati ottenuti dalle prove di estrazione controllata sulla formazione Sillano

I risultati ottenuti dalle prove sono sintetizzati nella tabella 8, dove sono stati riportati a scopo di confronto anche i valori medi dei risultati ricavati durante la campagna di prove sulla sabbia campione, discussi nel paragrafo 4.2.

I risultati di dettaglio ricavati dai singoli sensori e riportati in forma grafica sono più ampiamente descritti e commentati nel seguito del presente paragrafo.

Table with 11 columns: Test #, Pressione teorica, Pressione ottenuta, Coppia, delta spost., delta peso, Cella 1, Cella 2, Cella 3. Rows include Sabbia satura and Sabbia condizionata.

S - A	90	105	~55	n.d	10-15	0,73	0,27	55/30	42/25	25/10
S - B	90	105	~55	n.d	10-20	0,65	0,23	50/30	30/18	15/8

Tabella 5.10 - Risultati ottenuti dalle prove sulla formazione Sillano, confrontati con i valori medi dei risultati delle prove di verifica sulla sabbia campione.

5.4.3 Prova SIL– A

Pressioni all’interno della camera

Durante lo svolgimento della prova la pressione teorica iniziale all’interno del serbatoio è stata impostata pari a 90 kPa, che corrisponde ad una pressione della centralina oleodinamica di circa 30 bar. Nello sviluppo della prova, considerata la buona estrazione del materiale dalla camera tale pressione è stata mantenuta costante. La pressione misurata sul materiale assume un valore costante e regolare di 55 kPa, contro i 90 kPa teorici.

Il tempo di applicazione della pressione è di circa 220s, e più precisamente tra il tempo di prova 100s e il tempo di prova 320s

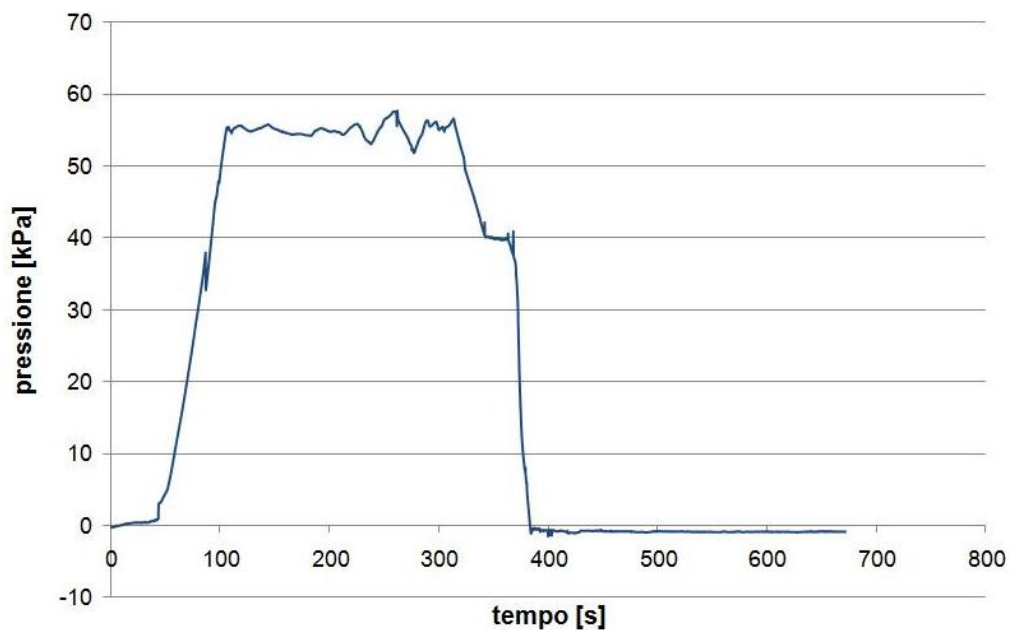


Grafico 5.22 - Andamento delle pressioni nel serbatoio durante la prova SIL-A.

Coppia della coclea

La coppia richiesta alla coclea per l’estrazione del terreno condizionato durante la fase di applicazione della pressione (tra t=90s e t=320s) si attesta nel corso della prova attorno ad un valore medio di 10 Nm, in linea con quello registrato per la sabbia condizionata, mentre i picchi puntuali, peraltro ridotti, sono dovuti alla presenza della frazione grossolana del materiale oggetto di studio.

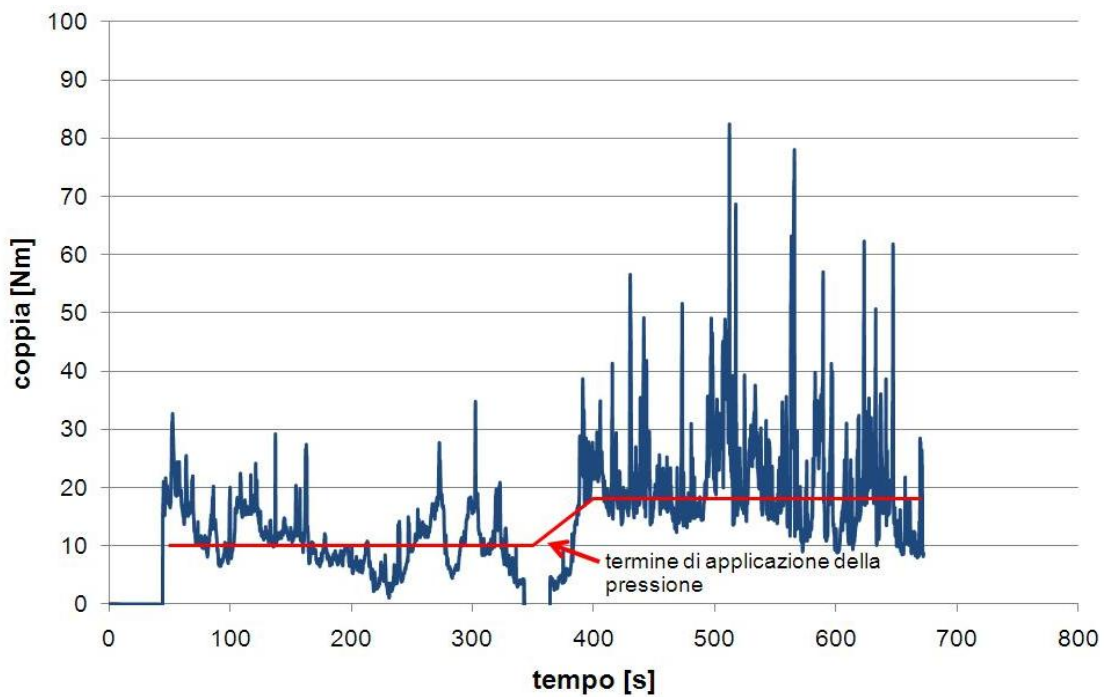


Grafico 5.23 - Coppia assorbita dalla vite della coclea durante la prova SIL-A.

In seguito alla cessazione dell’applicazione della pressione, ma proseguendo con l’estrazione del materiale, i valori di coppia aumentano intorno ad un valore medio di 20 Nm, in quanto viene a mancare l’aiuto all’estrazione offerto dal pistone in abbassamento nel cilindro.

Spostamento del piattello di carico

Il grafico 5.24 riporta l’andamento dello spostamento del piattello di carico.

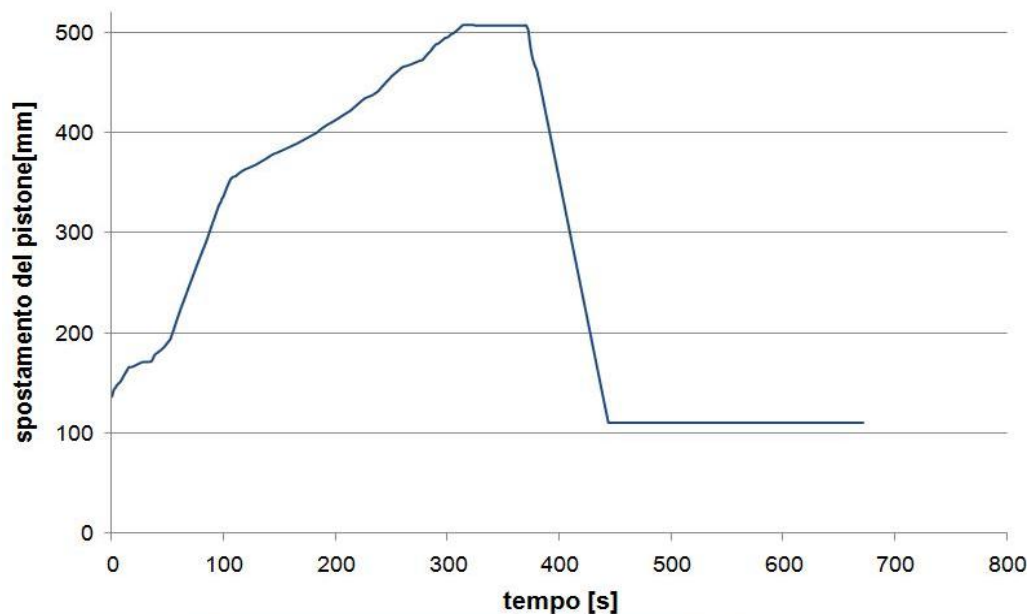


Grafico 5.24 - Spostamento del piattello di carico durante la prova SIL-A.

In particolare si constata che il durante la fase di applicazione della pressione mantiene un andamento e una velocità di abbassamento costante, segno questo di buon condizionamento del materiale oggetto del presente studio.

La velocità di abbassamento è pari a 0,73 mm/s, valore ancora superiore a quello registrato durante l'estrazione della sabbia condizionata.

Durante la prima fase di abbassamento del piattello si è riscontrato uno sversamento della schiuma in eccesso al di fuori del bidone trafilando sulla guarnizione tra piattello e cilindro. Questo fenomeno può essere indice che lavorando con valori alti di FIR possa esserci una separazione delle bolle nella parte alta della camera di scavo. Tale fenomeno dovrà essere quindi tenuto sotto controllo con particolare cura durante le lavorazioni da parte degli operatori della macchina.

Peso del materiale estratto

Il grafico indica come l'estrazione del materiale dalla coclea sia molto buona durante la fase di applicazione del pistone, con valori di uscita del materiale di 0,27 kg/s, mentre rallenti leggermente, riscontrabile nella minor inclinazione della curva, a seguito dell'interruzione di applicazione di pressione.

I valori registrati sono comunque entrambi indicatori di un buon condizionamento e capacità di riempimento della coclea da parte del materiale.

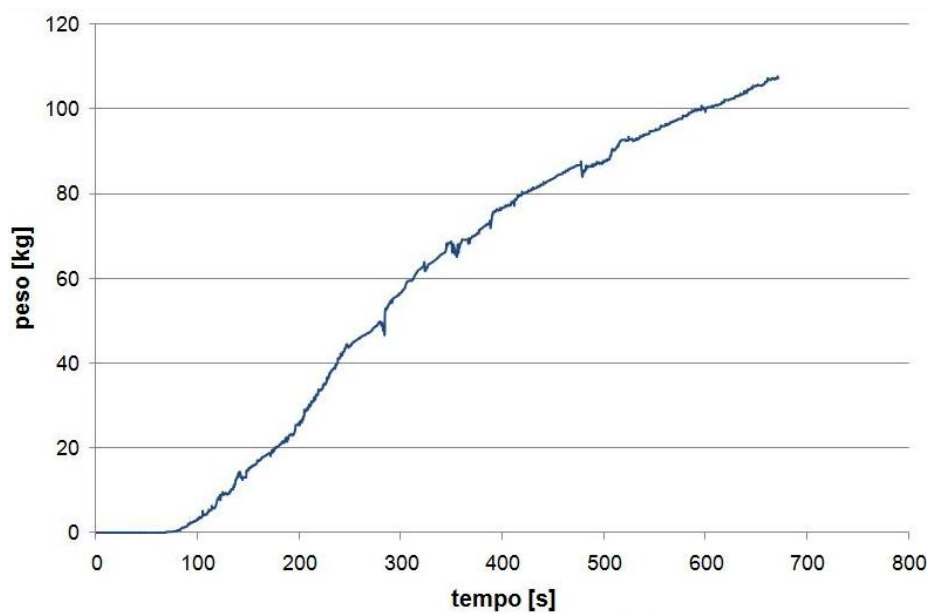


Grafico 5.25 - Peso del terreno estratto durante la prova SIL-A.

Pressioni lungo coclea

Le pressioni registrate dai sensori mostrano un andamento simile a quello dato dalla sabbia condizionata fino a quando vien applicata pressione al materiale, presentando quindi una graduale riduzione della pressione esercitata dal materiale nell'avvicinarsi all'uscita della coclea. Quando la pressione viene azzerata, $t=400s$, si verifica invece una livellamento dei

valori verso il basso, non avendo più il materiale pressione applicata ed esercitando quindi sulle celle solamente il peso proprio che risulta essere costante lungo tutta la coclea.

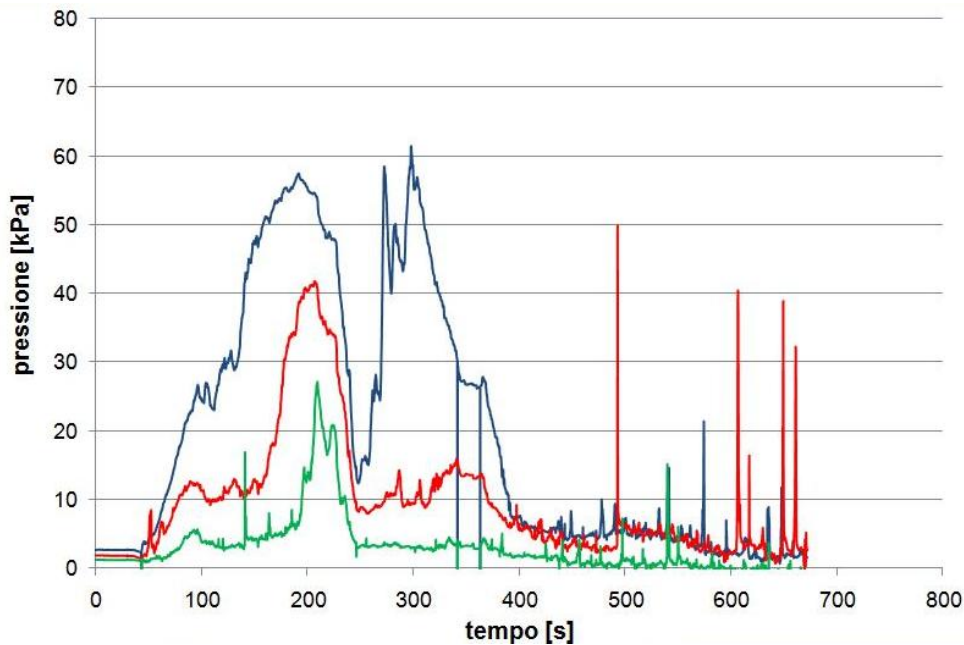



Grafico 5.26 - Andamento delle pressioni lungo coclea durante la prova SIL-A.

Slump test eseguiti sul materiale oggetto di prova

Durante la fase di caricamento del bidone e durante la prova di estrazione mediante coclea sono state eseguite alcune prove di slump, finalizzate a valutare le condizioni di plasticità del materiale estratto prima e dopo l’ estrazione attraverso la coclea.

La tabella 5.11 riassume i risultati ottenuti, i quali indicano che il materiale, che prima dell’ estrazione con coclea ha un comportamento leggermente troppo fluido, a seguito dell’ estrazione ha un comportamento buono per quel che riguarda le caratteristiche di plasticità e di abbassamento al cono.

Ordine dello slump	Abbassamento al cono [cm]	Fotografia
#1 Prima dell’ estrazione	21	





#2 Prima dell'estrazione	21	
#3 Materiale estratto 1 - in pressione	17	
#4 Materiale estratto 2 - in pressione	18	
#5 Materiale estratto 3 – in pressione	18	

Tabella 5.11 - Risultati ottenuti dalle prove di abbassamento al cono di slump sul materiale. Prova SIL – A.

5.4.4 Prova SIL– B

Pressioni all'interno della camera.

La pressione teorica iniziale all'interno del serbatoio è stata impostata pari a 90 kPa, che corrisponde ad una pressione della centralina oleodinamica di circa 30 bar. Nello sviluppo della prova, considerate la buona estrazione del materiale dalla camera tale pressione è stata mantenuta costante. La pressione misurata sul materiale assume un valore pressappoco costante, con alcune oscillazioni, di 55 kPa, contro i 90 kPa teorici.

Il tempo di applicazione della pressione è di circa 270s, e più precisamente tra il tempo di prova 150s e il tempo di prova 420s.



Figura 5.7 - Pressione applicata dalla pompa oleodinamica durante la prova SIL-B.

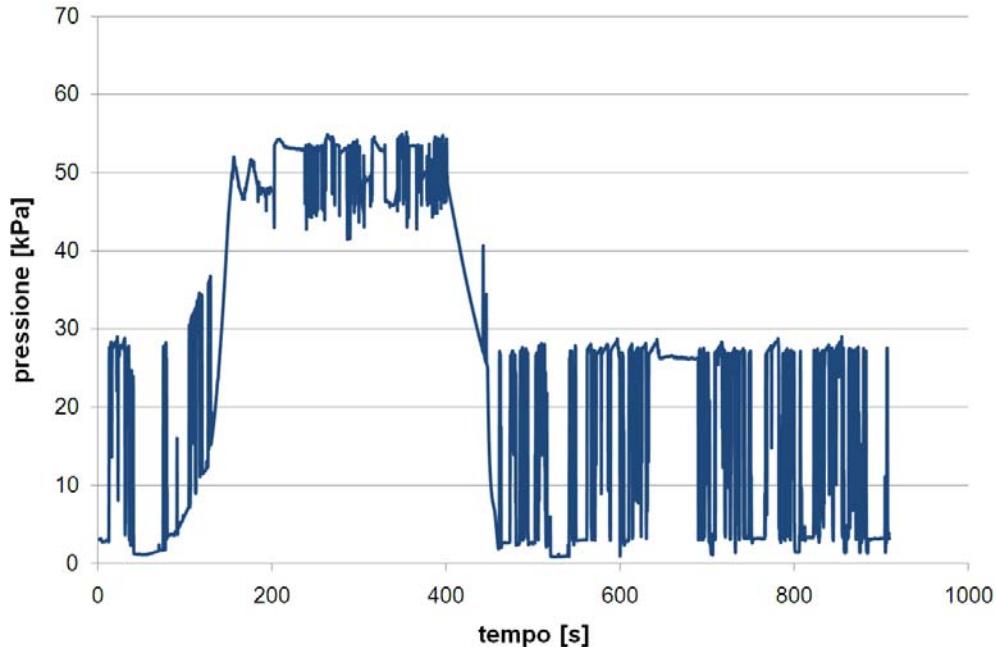


Grafico 5.27 - Andamento delle pressioni nel serbatoio durante la prova SIL-B.

Coppia della coclea

La coppia richiesta alla coclea per l'estrazione del terreno condizionato durante la fase di applicazione della pressione (tra $t=130s$ e $t=420s$) si attesta nel corso della prova attorno ad un valore medio di 15 Nm, in linea con quello registrato per la sabbia condizionata, mentre

i picchi puntuali, peraltro ridotti, sono dovuti alla presenza della frazione grossolana del materiale oggetto di studio.

In seguito alla cessazione dell'applicazione della pressione, ma proseguendo con l'estrazione del materiale, i valori di coppia aumentano intorno ad un valore medio di 18 Nm, in quanto viene a mancare l'aiuto all'estrazione offerto dal pistone in abbassamento nel cilindro.

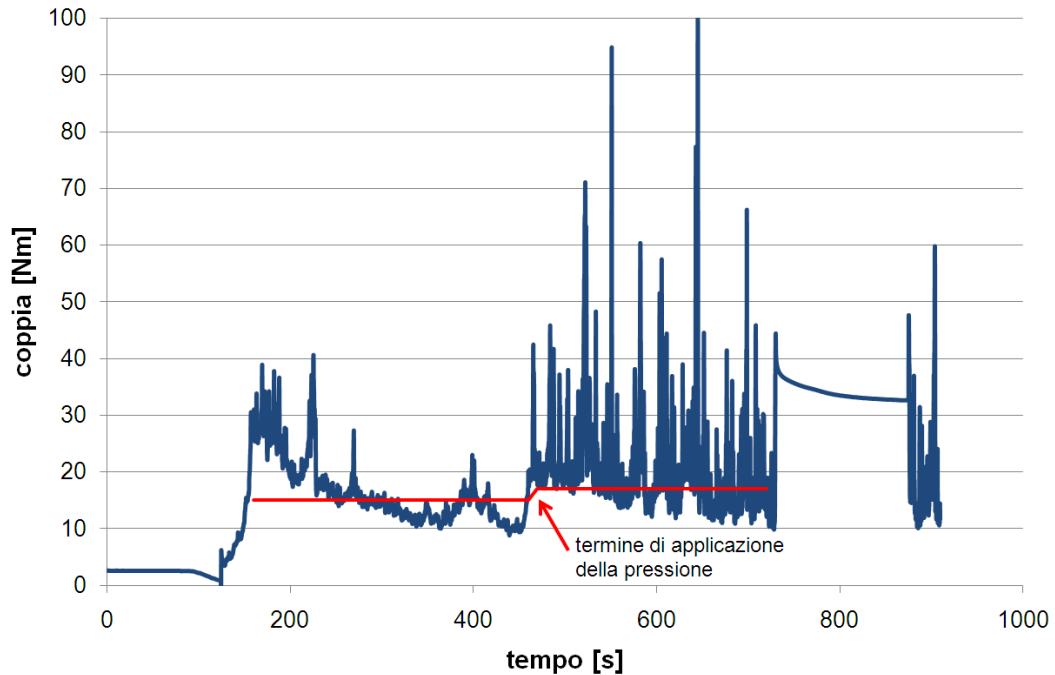


Grafico 5.28 - Coppia assorbita dalla vite della coclea durante la prova SIL-B.

Spostamento del piattello di carico

Il grafico 5.29 riporta l'andamento dello spostamento del piattello di carico ed in particolare si constata che il durante la fase di applicazione della pressione mantiene un andamento e una velocità di abbassamento costante, segno questo di buon condizionamento e qualità del materiale.

La velocità di abbassamento è pari a 0,65 mm/s, leggermente superiore a quello registrato durante l'estrazione della sabbia condizionata.

Durante la prima fase di abbassamento del piattello si è riscontrato uno sversamento della schiuma in eccesso al di fuori del bidone trafilando sulla guarnizione tra piattello e cilindro. Questo fenomeno può essere indice che lavorando con valori alti di FIR possa esserci una separazione delle bolle nella parte alta della camera di scavo. Tale fenomeno dovrà essere quindi tenuto sotto controllo con particolare cura durante le lavorazioni da parte degli operatori della macchina.

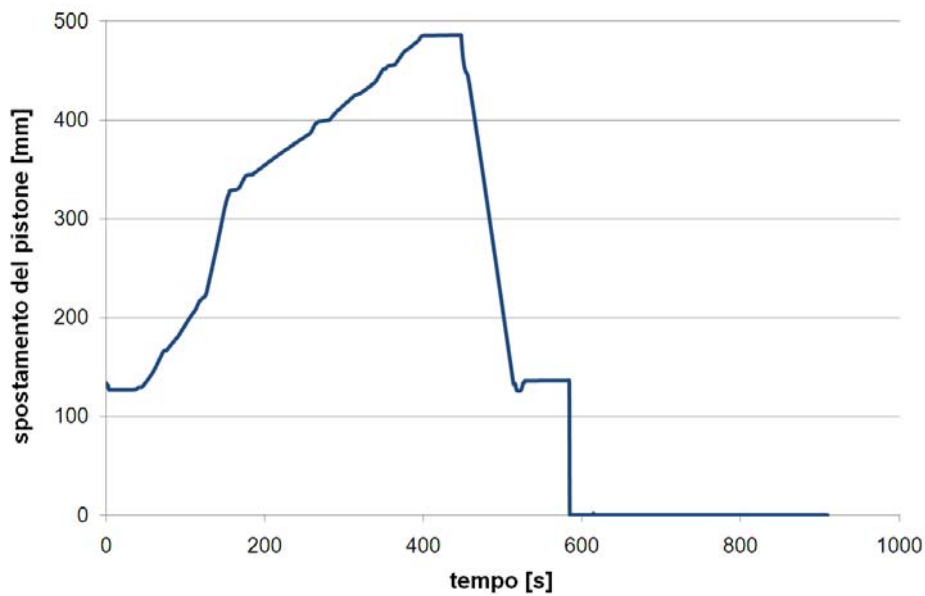


Grafico 5.29 - Spostamento del piattello di carico durante la prova SIL-B.

Peso del materiale estratto

Il grafico 5.30 indica come l’estrazione del materiale dalla coclea sia molto buona durante la fase di applicazione del pistone, con valori di uscita del materiale di 0,23 kg/s, mentre rallenti leggermente, riscontrabile nella minor inclinazione della curva, a seguito dell’interruzione di applicazione di pressione.

I valori registrati sono comunque entrambi sintomo di un buon condizionamento e capacità di riempimento della coclea da parte del materiale condizionato.

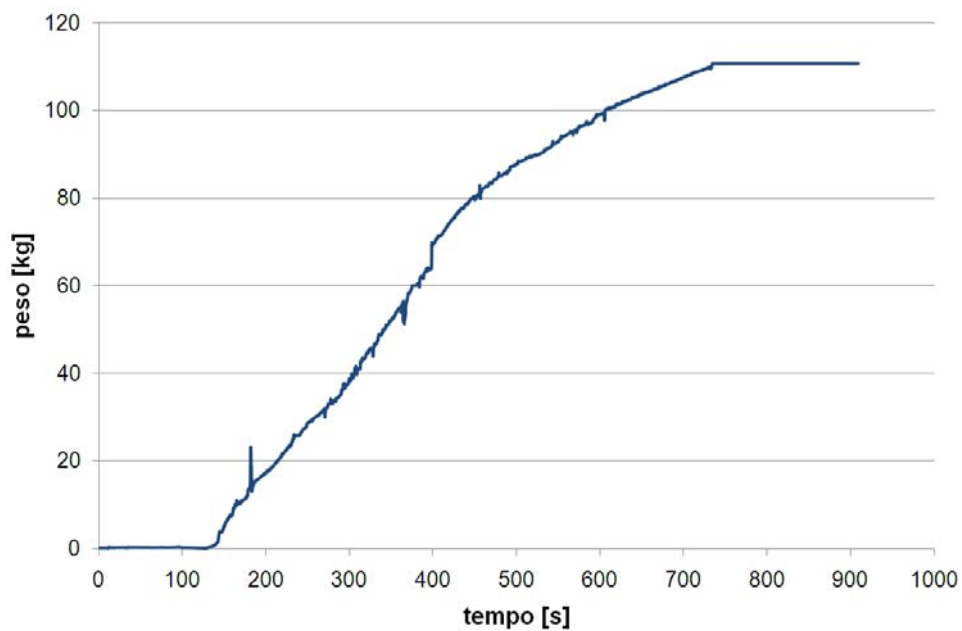


Grafico 5.30 - Peso del terreno estratto durante la prova SIL-B.

Pressioni lungo coclea

Le pressioni registrate dai sensori mostrano un andamento simile a quello dato dalla sabbia condizionata fino a quando vien applicata pressione al materiale, presentando quindi una graduale riduzione della pressione esercitata dal materiale nell’avvicinarsi all’uscita della coclea, mentre quando la pressione viene azzerata, dopo $t=450s$ si verifica invece una graduale inversione dei valori e questi cessano di essere significativi ai fini della prova.

I picchi sono presumibilmente dovuti alla presenza di grani di maggiori dimensioni rispetto alla matrice del terreno che passano sulla cella di pressione sollecitandole in modo anomalo.

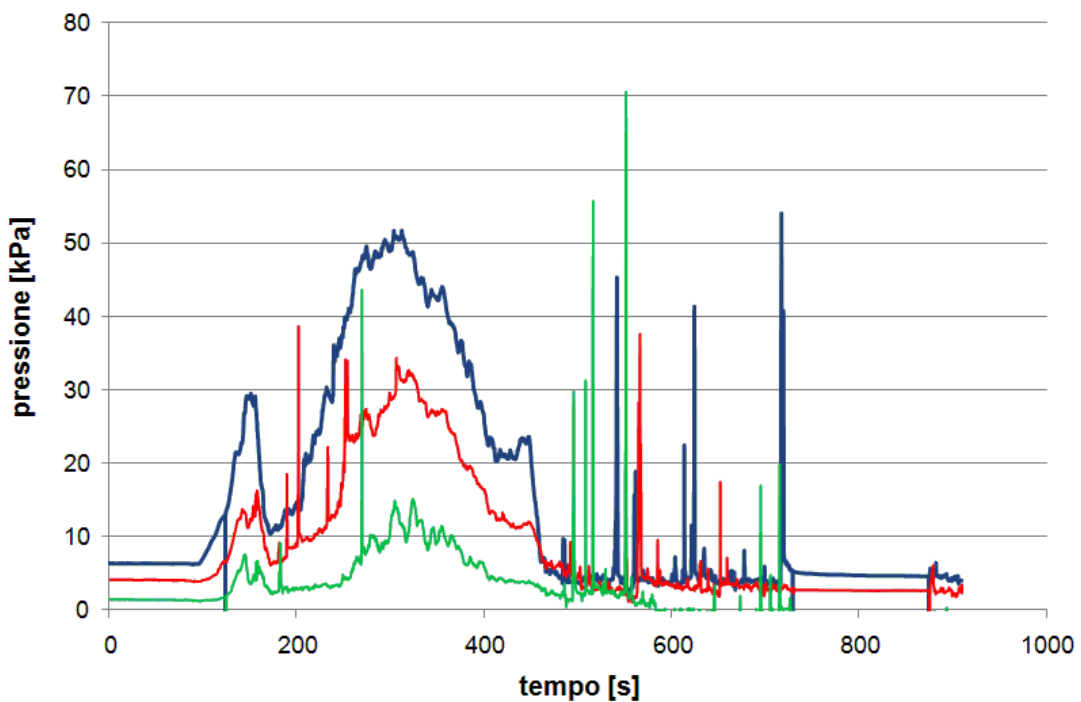


Grafico 5.31 - Andamento delle pressioni lungo coclea durante la prova SIL-B.

Slump test eseguiti sul materiale oggetto di prova

Durante la fase di caricamento del bidone e durante la prova di estrazione mediante coclea sono state eseguite alcune prove di slump, finalizzate a valutare le condizioni di plasticità del materiale estratto prima e dopo l’ estrazione attraverso la coclea.

La tabella 5.12 riassume i risultati ottenuti, i quali indicano che il materiale, che prima dell’ estrazione con coclea ha un comportamento un po’ troppo fluido, a seguito dell’ estrazione, ad eccezione della prima quota parte di materiale, ha un comportamento buono per quel che riguarda le caratteristiche di plasticità e di abbassamento al cono.






Ordine dello slump	Abbassamento al cono [cm]	Fotografia
#1 Prima dell'estrazione	22	
#2 Materiale estratto 1 – in pressione	20	
#3 Materiale estratto 2 - in pressione	18	
#4 Materiale estratto 3 - in pressione	17	
#5 Materiale estratto 4 – in pressione	16	

Tabella 5.12 - Risultati ottenuti dalle prove di abbassamento al cono di slump sul materiale. Prova SIL – B.

5.4.5 Commenti finali e confronto delle prove effettuate sulla formazione Sillano

Le prove di estrazione sulla formazione Sillano, realizzate utilizzando per i due differenti agenti schiumogeni studiati gli stessi parametri di condizionamento, ad eccezione del FIR incrementato del 3% nella prova SIL-B, hanno fornito risultati molto simili tra loro.

Le due prove di estrazione, come già evidenziato nei parametri precedenti, hanno fornito risultati ottimi per quel che riguarda l’ estrazione della formazione Sillano, relativamente alla granulometria utilizzata per la realizzazione delle prove e riportata nel capitolo 3.

La trasmissione della pressione dal piattello di carico al materiale è la medesima in entrambe le prove e le oscillazioni registrate nella prova SIL-B sono dovute ad un disturbo della cella di carico in relazione alla presenza di elementi di maggior durezza e non imputabili al condizionamento del materiale.

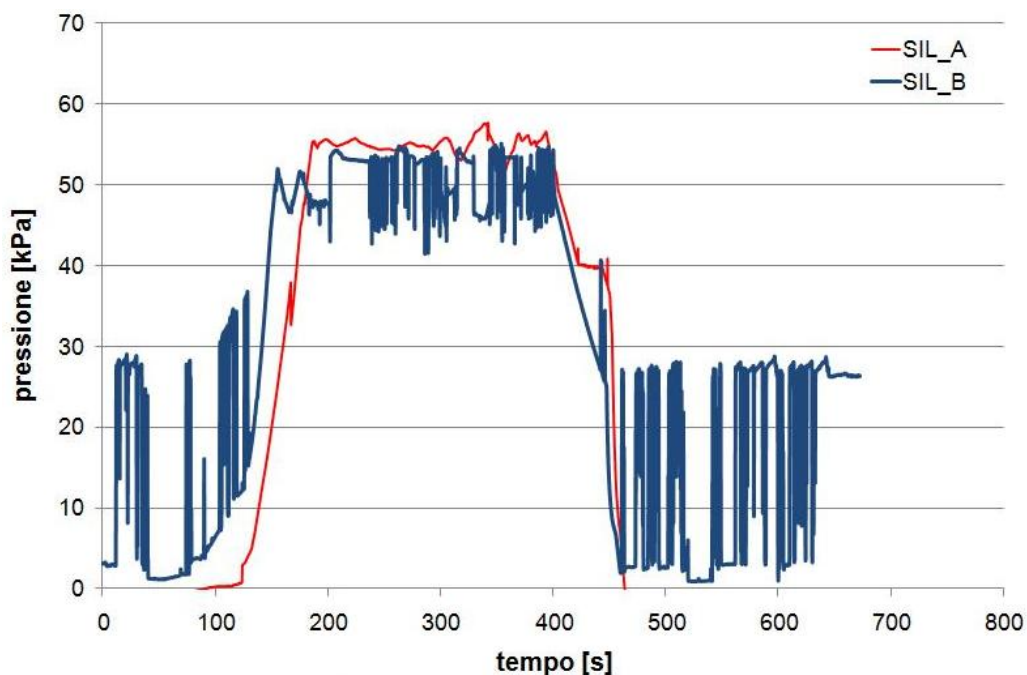


Grafico 5.32 - Andamento delle pressioni nel serbatoio durante le prove sulla formazione Sillano.

Anche gli altri parametri registrati confermano quanto già visto nell’analisi delle pressioni registrate dalla cella superiore e cioè una netta somiglianza tra i dati forniti dalle due differenti prove che sono indice della ottima ripetibilità delle stesse.

In particolare, nel caso dell’abbassamento del pistone (grafico 5.33) e della quantità di materiale estratto (grafico 5.34) questi sono pressoché identici e non evidenziano particolari differenze nel comportamento del materiale se condizionato con l’agente schiumogeno A piuttosto che con l’agente schiumogeno C.

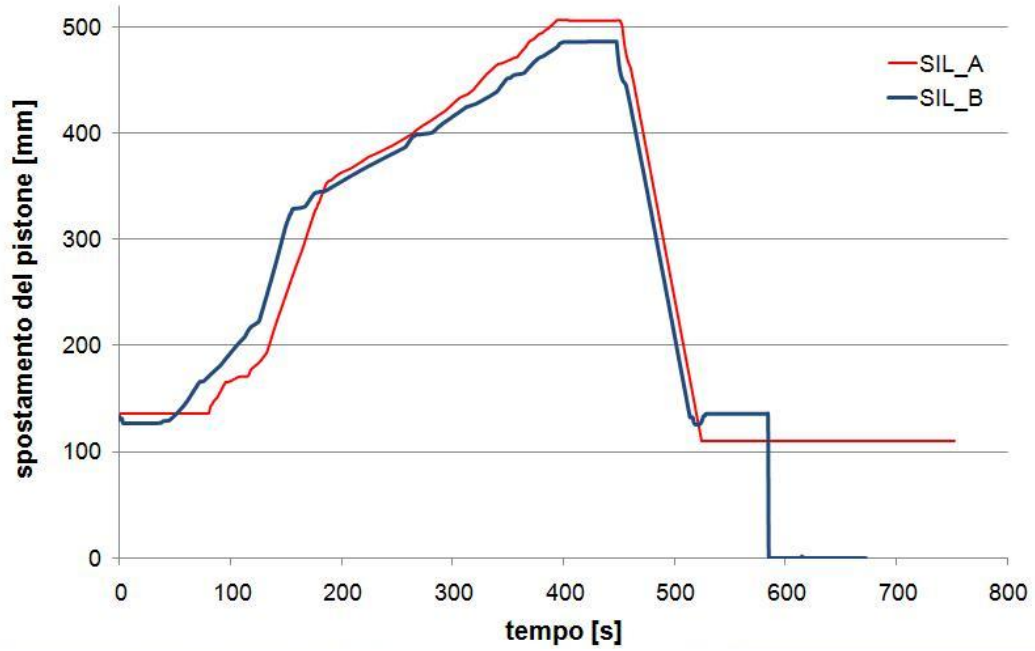


Grafico 5.33 - Andamento delle pressioni nel serbatoio durante le prove sulla formazione Sillano.

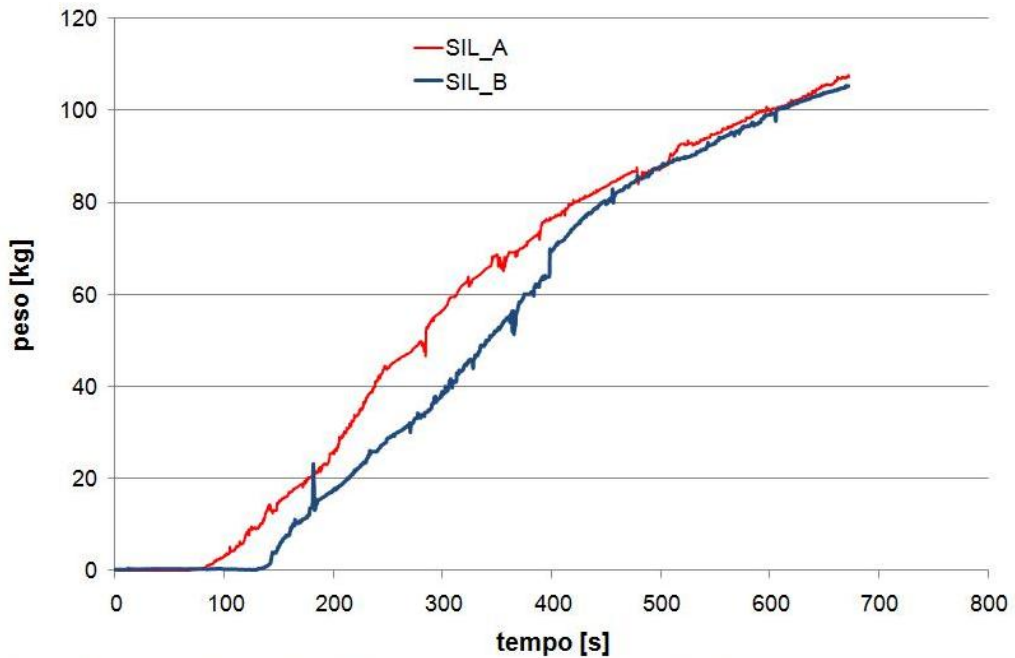


Grafico 5.34 - Andamento delle pressioni nel serbatoio durante le prove sulla formazione Sillano.

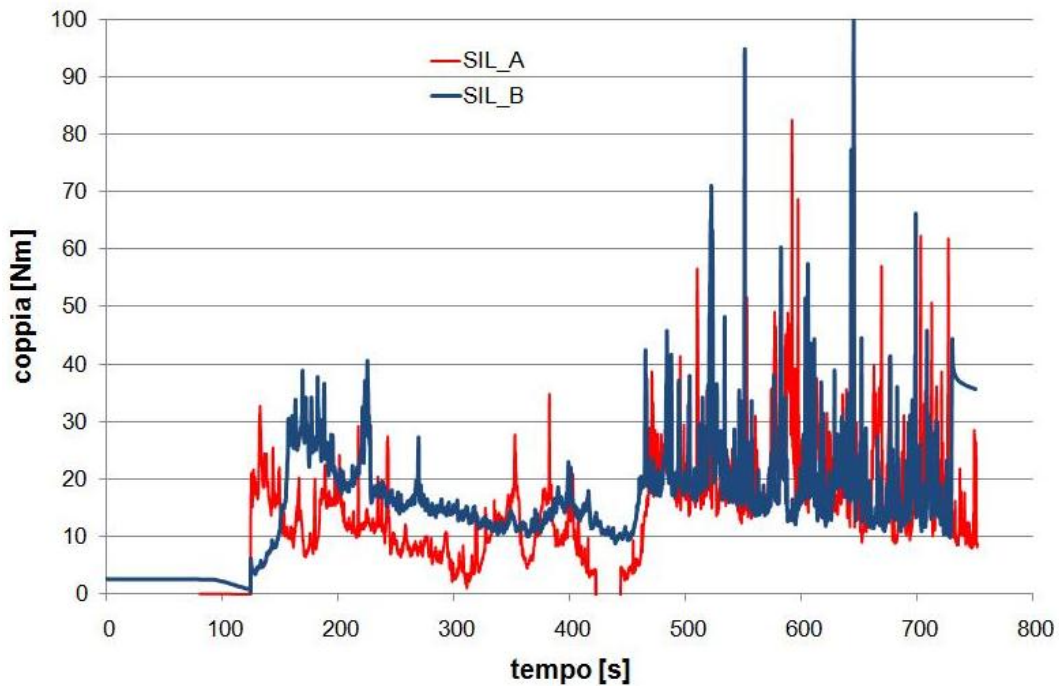


Grafico 5.35 - Andamento delle pressioni nel serbatoio durante le prove sulla formazione Sillano.

I valori di coppia registrati sono lievemente inferiori nella prova SIL-A, ma comunque simili a quella della prova SIL-B, sia nella fase di applicazione di pressione, sia nella fase di estrazione libera

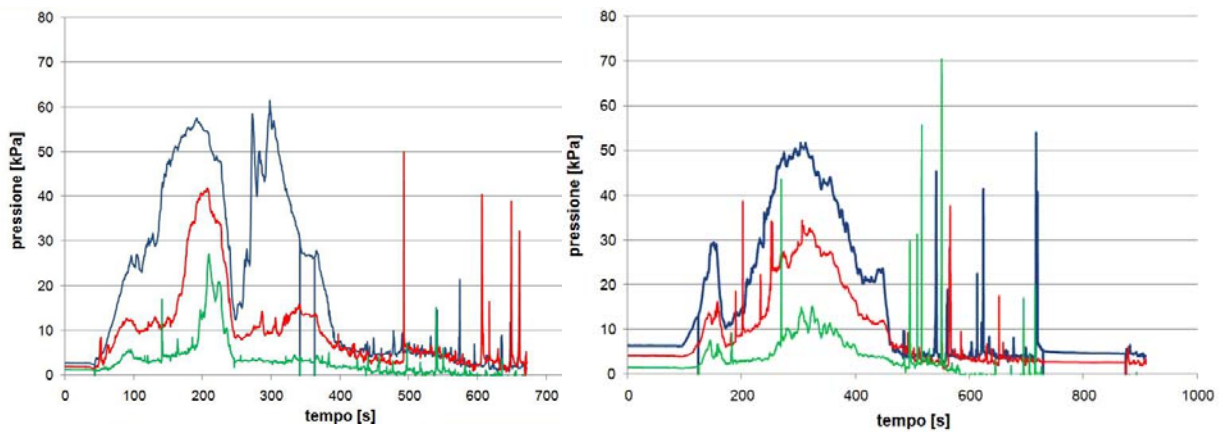


Grafico 5.36 - Andamento delle pressioni lungo coclea durante le prove sulla formazione Sillano. SIL-A a sinistra, SIL –B a destra.

Tale somiglianza di comportamento è infine anche confermata dall’andamento delle pressioni lungo coclea riportate in grafico 5.36.

In conclusione il condizionamento utilizzato, e quindi un FIR di circa il 70% sembra fornire buoni risultati per quel che riguarda le possibilità di estrazione del materiale dalla camera in pressione.

6. Prove di compattazione Proctor modificata

Al fine di acquisire una prima sensibilità sull’effetto del tempo ai fini dell’essiccazione e della compattabilità dei materiali condizionati, sono state eseguite prove di compattazione in accordo alla norma UNI-EN 13286-2 sia del materiale tal-quale, che del materiale condizionato e del materiale condizionato trattato a calce.

Per il materiale “tal-quale” sono state eseguite più prove in modo tale da poter ricostruire l’intera curva densità secca-umidità, mentre per il “materiale condizionato” e il “materiale condizionato trattato a calce” sono state eseguite solo alcune prove di compattazione a diversi tempi dalla preparazione, ovvero a 1 hr, 2 gg e 7 gg.

I risultati più interessanti della sperimentazione sono quelli relativi alla formazione del Sillano, per la quale risulta effettivamente molto importante acquisire sensibilità sull’entità della perdita del tenore di umidità in funzione del tempo e la sua “compattabilità”. Conoscere tale comportamento consente ovviamente di meglio programmare le attività di stoccaggio e trattamento dei materiali all’uscita del nastro della fresa.

Le prove eseguite sul Sillano indicano che per il “materiale condizionato e non trattato a calce”, a 7gg si raggiunge il 90% dell’ottimo Proctor del materiale tal quale. Essendo ragionevole ritenere che il materiale tal-quale e il materiale condizionato abbiano valori dell’ottimo simili, il risultato ottenuto è interessante; o meglio, la prima indicazione che abbiamo è che il materiale condizionato non può essere immediatamente compattato ma deve “decantare” almeno 7 giorni.

Per quanto riguarda il materiale trattato a calce già a due giorni si raggiunge il 93% dell’ottimo di Proctor del materiale tal-quale. Poiché l’ottimo di Proctor del materiale trattato a calce è in genere inferiore al valore dell’ottimo trattato a calce è ragionevole ritenere che il materiale condizionato e trattato a calce possa essere compattato quasi immediatamente dopo il trattamento.

6.1 Prove Proctor modificata sulla formazione Monte Morello

6.1.1. Prove Proctor sulla formazione Monte Morello naturale

Il materiale utilizzato per le prove Proctor è il medesimo descritto nel capitolo 2 di cui viene qui di seguito riproposta per completezza la curva granulometrica.

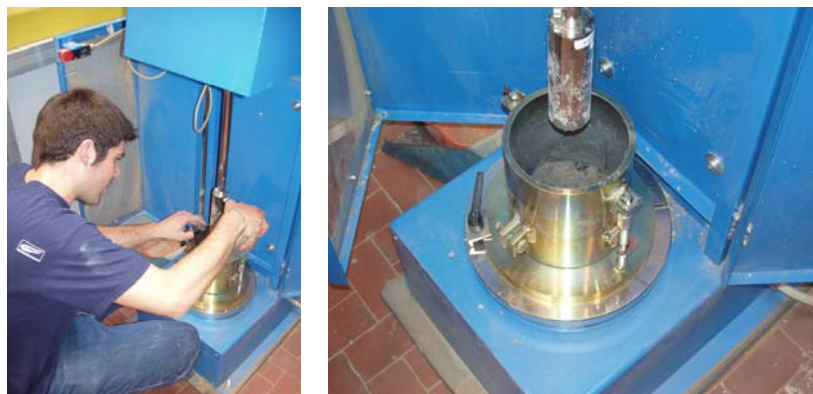


Figura 6.1 – Compattatore meccanico utilizzato per le prove (sinistra) e dettaglio della fustella e della massa battente.

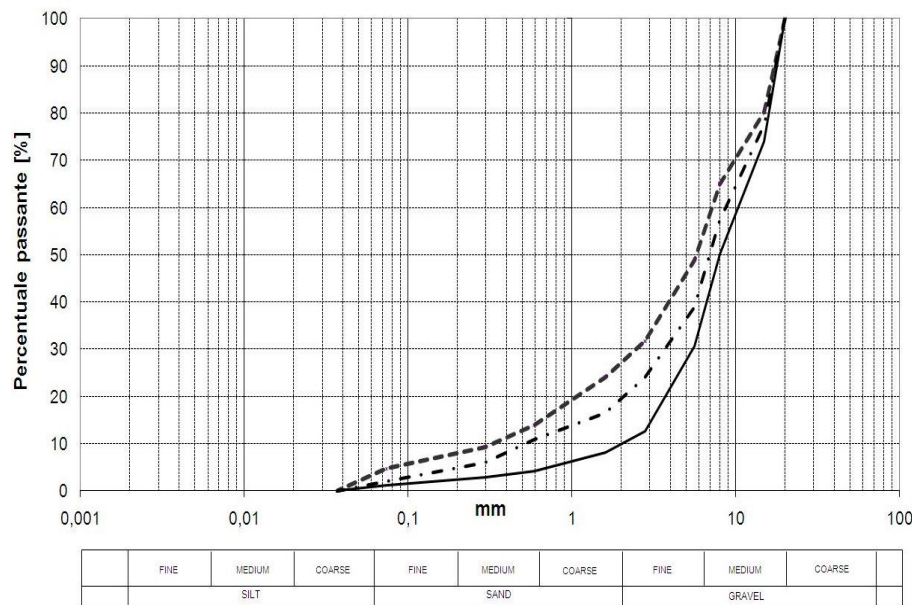


Gráfico 6.1 – Curva granulometrica della formazione Monte Morello utilizzata per le prove di compattazione.

La procedura di realizzazione delle prove ha seguito, come già precedentemente indicato, la norma UNI-EN 13286-2 e quindi compattando il materiale all’interno di una fustella di diametro pari a $15,24 \pm 0,02$ cm e volume pari a 2124 ± 25 cm³ in 5 strati successivi con 56 colpi per ciascuno strato per mezzo di compattatore meccanico.

Al fine dell’ottenimento del diagramma densità secca-umidità sono stati determinati 5 punti significativi a diverso contenuto d’acqua.

I risultati delle prove sono presentati in tabella 6.1 e nel successivo gráfico 6.2.

Tabella 6.1 – Risultati delle prove di compattazione effettuate sulla formazione Monte Morello naturale

w	TARA	LORDO _{umido}	NETTO _{umido}	VOLUME	γ_{umida}	γ_{secca}
[%]	[g]	[g]	[g]	[cm ³]	[g/cm ³]	[g/cm ³]
2,0	10231,7	14491,7	4260,0	2120,6	2,009	1,969
3,0	10232,0	14563,6	4331,6	2120,6	2,043	1,983
4,0	10226,3	14732,7	4506,4	2120,6	2,125	2,043
5,0	10231,9	14605,2	4373,3	2120,6	2,062	1,964
6,0	10195,7	14649,2	4453,5	2120,6	2,100	1,981

I risultati ottenuti mostrano come risultato difficoltoso ottenere una campana regolare e ben definita della formazione studiata, questo a causa in particolare della bassa quantità di fine e della forma a scaglie dei grani del materiale. I valori ottimali di densità secca e umidità di compattazione sono definiti per un 4% di umidità che corrisponde ad una densità secca di 2,043 g/cm³.

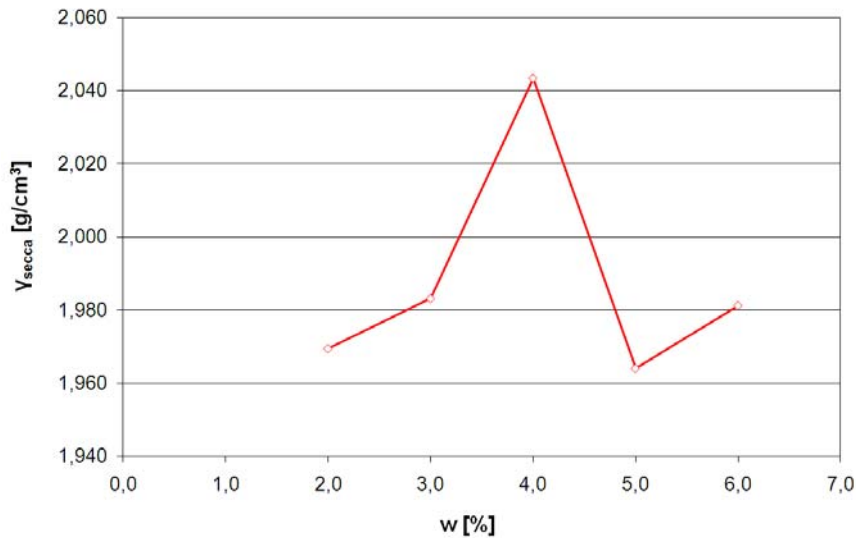


Grafico 6.2 – Diagramma densità secca – umidità per la formazione Monte Morello naturale.

6.1.2. Prove Proctor sulla formazione “Monte Morello” condizionata per mezzo di schiume.

Le tre prove di compattazione del terreno a seguito del condizionamento per mezzo di schiume sono state effettuate utilizzando l’agente B con un FIR del 40% e un FER di 15 ed aggiungendo un contenuto d’acqua di 30 l/m³.

Una volta effettuato il condizionamento il materiale è stato sottoposto a compattazione dopo diversi intervalli di tempo (1 ora, 2 giorni e 7 giorni dal momento di aggiunta della schiuma) al fine di definirne il comportamento nel tempo.

La tabella seguente riporta i parametri di condizionamento utilizzati per il materiale, che corrispondono ad un buon slump ad un tempo zero dopo l’aggiunta della schiuma che si è visto comunque essere eccessivamente bassi in relazione all’estrazione con coclea.

P _{terreno}	W _{agg}	W _{agg}	Agente	c	FER	FIR	Q _{additivo_agg}
[kg]	[%]	[l/m ³]	[tipo]	[%]	[-]	[%]	[l/m ³]
30	2	45	B	2	15	40	0,53

Tabella 6.2 – Parametri di condizionamento della formazione Monte Morello utilizzata per le prove di compattazione.

I risultati delle prove Proctor sui campioni precedentemente descritti sono di seguito riportate in tabella 6.3, nelle immagini 6.1 e 6.2 e nel grafico 6.3.

Tempo	w	TARA	LORDO _{umido}	NETTO _{umido}	VOLUME	γ_{umida}	γ_{secca}
[h]	[%]	[g]	[g]	[g]	[cm ³]	[g/cm ³]	[g/cm ³]
1	5,0	10195	14677,6	4482,6	2120,6	2,114	2,013
48	4,6	10195,3	14595,9	4400,6	2120,6	2,075	1,984
168	2,9	10195,8	14446	4250,2	2120,6	2,004	1,948

Tabella 6.3 – Risultati delle prove di compattazione effettuate sulla formazione Monte Morello condizionata

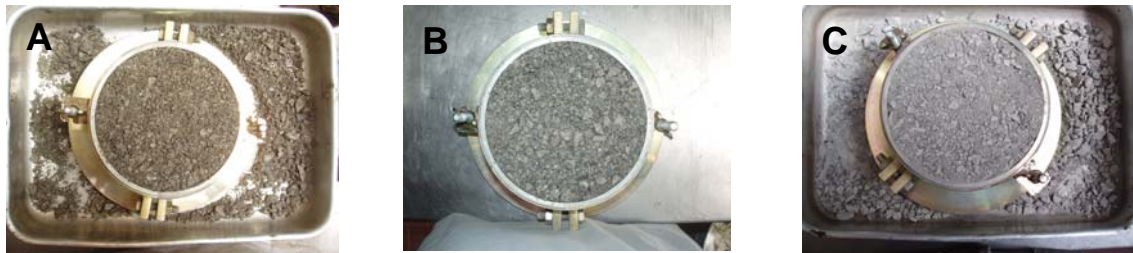


Figura 6.2 – Materiale a fine compattazione dopo 1 ora (A), 2 giorni (B) e 7 giorni (C)



Figura 6.2 – Materiale a termine dell'essicazione. Prova 1 ora (A), 2 giorni (B) e 7 giorni (C).

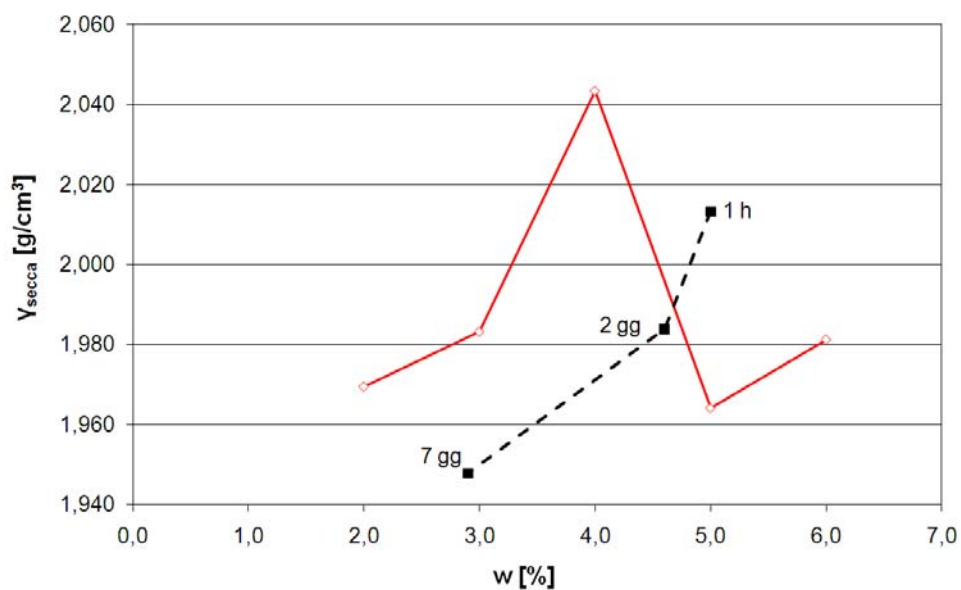


Grafico 6.3 – Diagramma densità secca – umidità per la formazione Monte Morello naturale e condizionata.

6.2 Prove Proctor modificata sulla formazione Sillano

6.2.1. Prove Proctor sulla formazione Sillano naturale

Il materiale utilizzato per le prove Proctor è il medesimo descritto nel capitolo 2 di cui viene qui di seguito riproposta per completezza la curva granulometrica.

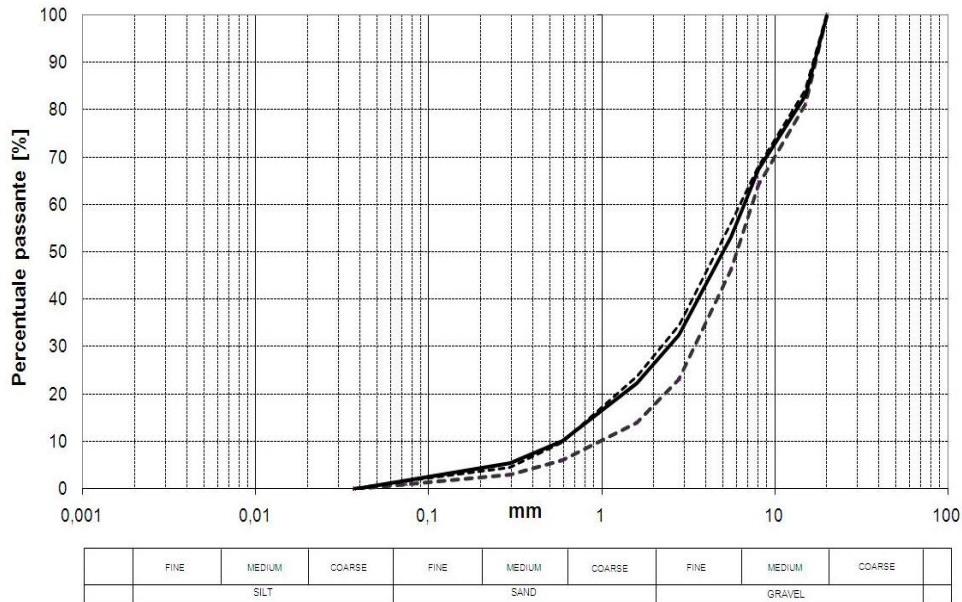


Grafico 6.4 – Curva granulometrica della formazione Sillano utilizzata per le prove di compattazione.

La procedura di realizzazione delle prove ha seguito, come già precedentemente indicato, la norma UNI-EN 13286-2 (compattando il materiale all’interno di una fustella di diametro pari a $15,24 \pm 0,02$ cm e volume pari a 2124 ± 25 cm³ in 5 strati successivi con 56 colpi per ciascuno strato per mezzo di compattatore meccanico).

Al fine dell’ottenimento del diagramma densità secca-umidità sono stati determinati 5 punti significativi a diverso contenuto d’acqua. I risultati delle prove sono presentati in tabella 6.4 e nel successivo grafico 6.5

Tabella 6.4 – Risultati delle prove di compattazione effettuate sulla formazione Sillano naturale.

w	TARA	LORDO _{umido}	NETTO _{umido}	VOLUME	γ_{umida}	γ_{secca}
[%]	[g]	[g]	[g]	[cm ³]	[g/cm ³]	[g/cm ³]
7,0	10197,2	15060,0	4862,8	2120,6	2,293	2,144
8,4	10225,7	15177,6	4951,9	2120,6	2,335	2,155
9,0	10195,1	15179,6	4984,5	2120,6	2,351	2,157
9,7	10201,1	15100,3	4899,2	2120,6	2,310	2,106
10,8	10231,8	15090,9	4859,1	2120,6	2,291	2,069

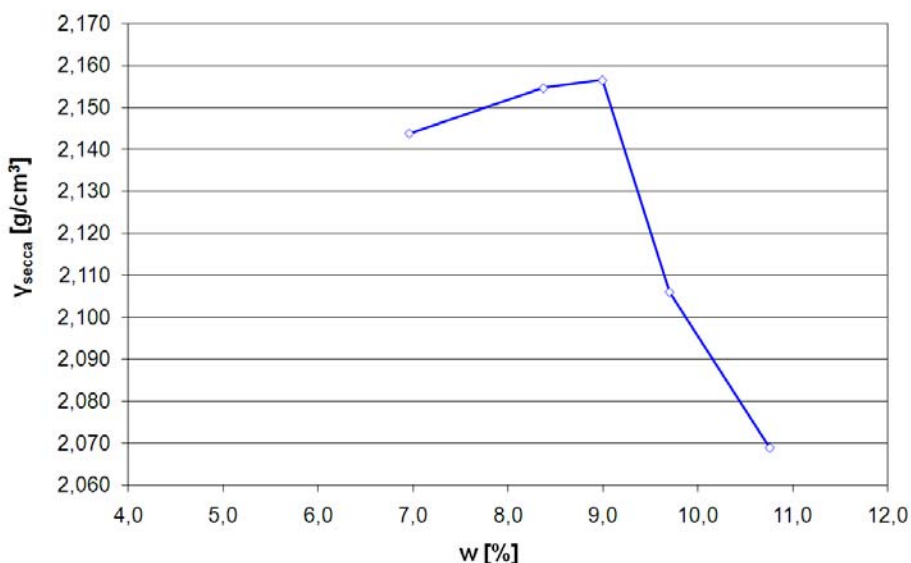


Grafico 6.5 – Diagramma densità secca – umidità per la formazione Sillano naturale.

6.2.2. Prove Proctor sulla formazione Sillano condizionata per mezzo di schiume.

A seguito della prima fase di caratterizzazione del materiale, sono state realizzate ulteriori tre prove di compattazione del terreno a seguito del condizionamento di quest’ultimo per mezzo di schiume che sono state realizzate utilizzando l’agente C con un FIR del 60% e un FER 15 e quindi con un condizionamento che ha fornito buoni risultati sia rispetto alla prova di slump sia nella prova di estrazione con coclea.

Una volta effettuato il condizionamento il materiale è stato sottoposto a compattazione dopo diversi intervalli di tempo (1 ora, 2 giorni e 7 giorni dal momento di aggiunta della schiuma) al fine di definirne il comportamento nel tempo.

La tabella seguente riporta i parametri di condizionamento utilizzati per il materiale, che corrispondono ad un buon slump ad un tempo zero dopo l’aggiunta della schiuma.

P _{terreno}	W _{agg}	w _{agg}	Agente	c	FER	FIR	Q _{additivo_agg}
[kg]	[%]	[l/m ³]	[tipo]	[%]	[-]	[%]	[l/m ³]
30	8	120	C	2	15	60	0,8

Tabella 6.5 – Parametri di condizionamento della formazione Monte Morello utilizzata per le prove di compattazione.

I risultati delle prove Proctor sui campioni precedentemente descritti sono di seguito riportate in tabella 6.6, nelle immagini 6.3 e nel grafico 6.6.

Va fin da subito riportato che a causa dell’eccessiva plasticità del materiale condizionato non è stato possibile portare a termine le prove di compattazione ad 1 ora e 2 giorni dal condizionamento, ed è quindi solo stata riportata in grafico l’umidità del campione mentre i valori di densità non devono essere ritenuti validi per queste due prove.

Tabella 6.6 – Risultati delle prove di compattazione effettuate sulla formazione Sillano condizionata.

Tempo	w	TARA	LORDO _{umido}	NETTO _{umido}	VOLUME	γ_{umida}	γ_{secca}
[h]	[%]	[g]	[g]	[g]	[cm ³]	[g/cm ³]	[g/cm ³]
1	17,4	10197,2	nd	nd	2120,6	nd	nd
48	15,1	10225,7	nd	nd	2120,6	nd	nd
168	13,0	10238,7	14946,5	4707,8	2120,6	2,220	1,965



Figura 6.3 – Materiale a fine compattazione dopo 1 ora (A), 2 giorni (B).

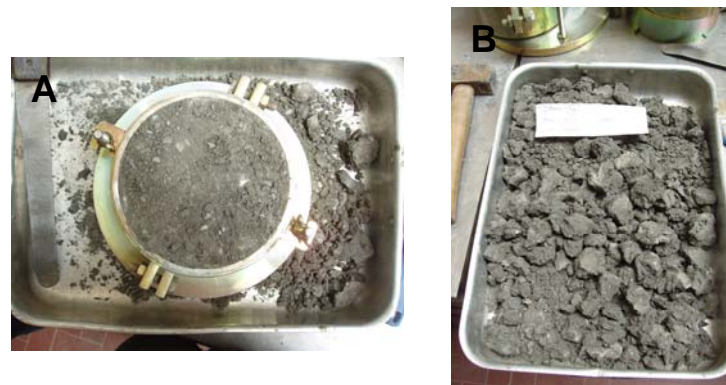


Figura 6.4 – Materiale a fine compattazione dopo 7 giorni (A) e in seguito ad essiccazione (B).

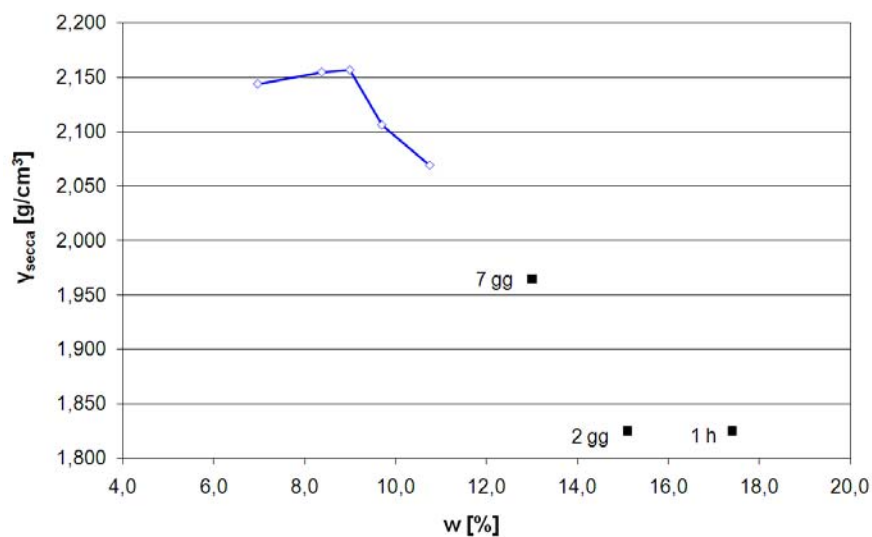


Grafico 6.6 – Diagramma densità secca – umidità per la formazione Sillano naturale e condizionata

6.2.3. Prove Proctor sulla formazione Sillano condizionata per mezzo di schiume e stabilizzata con calce viva.

A seguito della seconda fase di caratterizzazione del materiale, sono state realizzate ulteriori tre prove di compattazione del terreno a seguito del condizionamento di quest'ultimo per mezzo di schiume, con gli stessi parametri del paragrafo 6.2.1 e l'aggiunta del 3% in peso di calce viva a seguito del condizionamento.

Una volta effettuato il condizionamento e l'aggiunta della calce, il materiale è stato sottoposto a compattazione dopo diversi intervalli di tempo (1 ora, 2 giorni e 7 giorni dal momento di aggiunta della schiuma) al fine di definirne il comportamento nel tempo.



Figura 6.5 – Fasi di stabilizzazione a calce del materiale condizionato. Prima (A), durante (B) e dopo (C) l'aggiunta della calce.

Tabella 6.7 – Risultati delle prove effettuate sulla formazione Sillano condizionata e stabilizzata a calce.

Tempo	w	TARA	LORDO _{umido}	NETTO _{umido}	VOLUME	γ_{umida}	γ_{secca}
[h]	[%]	[g]	[g]	[g]	[cm ³]	[g/cm ³]	[g/cm ³]
1	15,1	10199,6	14831,1	4631,5	2120,6	2,184	1,898
48	14,2	10199,8	14908,3	4708,5	2120,6	2,220	1,944
168	11,8	10199,1	15046,6	4847,5	2120,6	2,286	2,045

In seguito alla stabilizzazione a calce è stato possibile effettuare le prove di compattazione su tutti e tre i campioni di terreno, con i risultati riportati nel grafico 6.7.

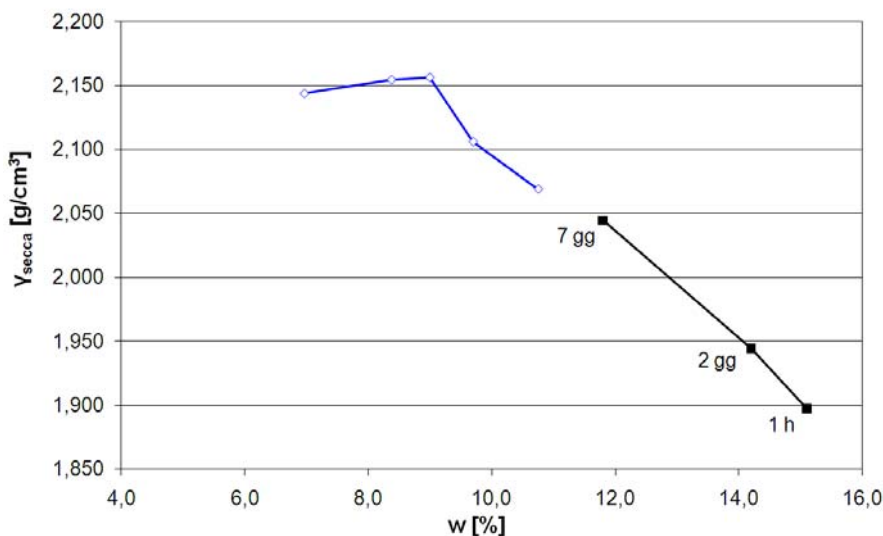


Grafico 6.6 – Diagramma densità secca – umidità per la formazione Sillano naturale e stabilizzata a calce dopo il condizionamento.



7. Conclusioni

La ricerca sperimentale presentata nel presente rapporto ha come obiettivo la verifica dell'applicabilità, nello scavo della galleria Santa Lucia, della tecnologia EPB. La fattibilità è stata valutata mediante l'uso di prove di laboratorio: prove di slump e prove di estrazione da camera in pressione mediante coclea con l'attrezzatura sviluppata dal Laboratorio TUSC - "Gallerie e opere sotterranee" del Politecnico di Torino.

La prima fase dello studio ha richiesto lo svolgimento di una ricerca bibliografica finalizzata alla definizione della curva granulometrica del materiale prodotto dalla testa di scavo. Su questa base sono state definite le curve granulometriche dei materiali da sottoporre a prova: calcari della formazione del Monte Morello e argilliti della formazione del Sillano. L'analisi della letteratura tecnica ha evidenziato come nello scavo di gallerie in roccia con TBM di medio diametro, cioè con macchine munite di utensili a disco, questi consentono di produrre nell'abbattuto una percentuale di "fine" (cioè grani con diametro < 1mm) dell'ordine del 10-15%. Questo dato è stato quindi assunto come base sperimentale della ricerca. Nella ricerca non sono stati, inoltre, considerati grani di dimensione superiore a 20mm in relazione all'applicabilità delle attrezzature di laboratorio utilizzate. Questa scelta è comunque giustificata dal fatto che è il materiale più fine che viene condizionato dagli agenti schiumogeni e la massa plastica così prodotta trasporta gli elementi di dimensioni maggiori come dimostrato da altre ricerche analoghe sviluppate dal Politecnico di Torino su gallerie metropolitane in corso di realizzazione e documentate con articoli pubblicati nella letteratura tecnica.

Per quanto riguarda la simulazione del quantitativo d'acqua negli ammassi rocciosi che la macchina di scavo incontrerà lungo il tracciato, esso è stato desunto dalle prove effettuate da Spea sul materiale tal quale estratto dai sondaggi. Questi valori sono stati ottenuti in laboratorio aggiungendo acqua al materiale frantumato contestualmente alla miscelazione con la schiuma. Durante lo scavo, comunque, sarà relativamente facile aggiungere acqua all'interno della camera di scavo per raggiungere le condizioni di umidità idonee.

Dopo aver illustrato in premessa i criteri con cui sono state definite le condizioni di partenza delle prove effettuate, laddove queste non erano determinabili con certezza, lo studio, come descritto nei capitoli precedenti, ha permesso di verificare che sia per il calcare della formazione del Monte Morello che per le argille della formazione del Sillano è possibile, aggiungendo adeguati contenuti di schiuma, ottenere un materiale dal comportamento meccanico in grado sia di applicare pressione (come richiesto dalla tecnologia EPB) sia di essere estratto mediante coclea da una camera in pressione. E' però anche risultato evidente che con livelli di schiuma relativamente bassi come quelli che si potrebbero definire dalle sole prove di slump, il calcare della Formazione del Monte Morello risulta essere eccessivamente rigido e l'estrazione con coclea risulta difficoltosa se non impossibile. Contestualmente è stata anche evidenziata la grande importanza della temperatura e del tempo sulla plasticità del terreno condizionato che quindi andrà tenuto in adeguata considerazione.

I risultati ottenuti a seguito delle due campagne di prove hanno portato come valori attorno ai quali si sono ottenuti i migliori risultati del condizionamento, sulla base delle granulometrie e delle condizioni di laboratorio sono:



Materiale	w_{agg}	w_{agg}	c	FER	FIR	Q_{additivo_agg}	Pressione teorica nella prova di estrazione a coclea
-	[%]	[l/m ³]	[%]	[-]	[%]	[l/m ³]	[kPa]
Monte Morello	3	45	2,5	15	70	1,17	90
Sillano	10	150	2	15	65	0,86	90

La ricerca ha infine verificato l’influenza del tempo sulla capacità di riutilizzare il materiale scavato. Questa verifica è stata effettuata mediante il confronto dei risultati di un prova Proctor modificata sul materiale non condizionato e sulla lavorabilità del terreno condizionato sottoposto ad analoga prova a tempi differenti. I risultati hanno evidenziato come già dopo sette giorni il materiale proveniente dalla formazione del Monte Morello sia discretamente lavorabile, indice della scomparsa dell’effetto delle bolle del condizionamento mentre sull’argilla della Formazione del Sillano i risultati delle prove Proctor modificate dopo sette giorni sono molto lontani dall’ottimo. Peraltro tale risultato era da attendersi ed era in effetti stato previsto progettualmente, prescrivendo la stabilizzazione del terreno mediante calce. A questo fine le prove realizzate sul materiale trattato a calce via ha dimostrato un notevole miglioramento della possibilità di compattazione.

I risultati presentati indicano che dopo un tempo adeguato nel quale il terreno venga lasciato riposare disponendolo a strati di spessore limitato (dell’ordine di 30cm nella sperimentazione di laboratorio) è possibile riutilizzare il terreno anche se questo ha subito il trattamento di condizionamento per l’uso della tecnologia EPB mediante agenti schiumogeni.

In sintesi i risultati di laboratorio ottenuti possono essere descritti come molto positivi in relazione alla possibilità di condizionamento dei calcari della Formazione del Monte Morello e della formazione del Sillano per l’uso della tecnologia EPB anche per macchine di medio-grande diametro.



8. Bibliografia

1. **Anagnostou G., Kovari K. (1996)**, Face stability conditions with Earth-pressure balanced Shields, *Tunnelling and Underground Space Technology*, vol. 11, No. 2, Pergamon – Oxford, pp. 165 – 173
2. **ASTM C143/C 143M – 00 (2003)**, Standard test method for Slump of Hydraulic-Cement Concrete.
3. **Bezuijen A., Schaminee P.E.L., Kleinjan J.A. (1999)**, Additive testing for earth pressure balance shields, *Proc. of 12th Eur. conf. on Soil Mech. And Geotech. Engng.*, Amsterdam, June 1999, Balkema, Rotterdam, pp. 1991 - 1996
4. **Boone S.J., Artigiani E., Shirlaw J.N., Ginanneschi R., Leinala T., Kochmanova N.(2005)**, Use of ground conditioning agents for Earth Pressure Balance machine tunnelling, *Congrès international de Chambéry - Octobre 2005, AFTES*, pp. 313-319
5. **Borghi X., Merrit A., Pena M. (2003)**, Easing the way-soil conditioning, *Tunnels & Tunnelling international*, June 2003, pp. 48 – 50
6. **Borio L., Oggeri C., Peila D., Pelizza S. (2007)**, Determinazione del comportamento del terreno condizionato per EPBS mediante la prova di slump test, *Gallerie e Grandi Opere Sotterranee*, pp. 35-44, Vol. 82. (in italian)
7. **EFNARC (2005)**, Specification and guidelines for the use of specialist products for Mechanized Tunnelling (TBM) in Soft Ground and Hard Rock, *EFNARC recommendations*
8. **Jancsecz S., Krause R., Langmaack L. (1999)**, Advantages of soil conditioning in shield tunnelling: experiences of LRTS Izmir, *Challenges for the 21st Century*, Alten et al (eds), 1999, Balkema-Rotterdam, pp. 865 - 875
9. **Langmaack L. (2002)**, Soil conditioning for TBM: chances & limits, *Aftes - Journées d'études internationales -Toulouse - Octobre 2002, AFTES*, pp. 207 - 209
10. **Leinala T., Grabinsky M., Delmar R., Collins J.R. (2000)**, Effects of foam soil conditioning on EPBM performance, *North American Tunneling '00*, Ozdemir (ed.), Balkema, Rotterdam
11. **Maidl, B., Herrenknecht, M. and Anheuser, L. (1995)**, *Mechanised Shield Tunnelling*, Ernst&Sohn, Berlin, p.428.
12. **Mair R., Merritt A., Borghi X., Yamazaki H., Minami T. (2003)**, Soil conditioning for Clay Soils, *Tunnels & Tunnelling International*, April 2003, pp. 29 - 33
13. **Merritt, A. and Mair, R.J. (2006)**, Mechanics of tunnelling machine screw conveyor: model tests, *Geotechnique*, Vol. 56, pp. 605-615.
14. **Peila, D., Oggeri, C. and Vinai, R. (2007)**, Screw Conveyor Device for laboratory tests on conditioned soil for EPB tunnelling operations, *Journal of Geotechnical and geoenvironmental engineering, ASCE*, Vol.133, pp. 1622-1625.
15. **Peila D., Oggeri C., Borio L. (2008)**, Influence of granulometry, time and temperature on soil conditioning for EPBS applications., In: *Underground Facilities for Better Environment and Safety*, Aravali Printers & Publishers (IND), 34th World Tunnel Congress 2008 - Underground Facilities for Better Environment and Safety, Agra 22-24 September, pp. 881-891, 2008, Vol. 2
16. **Peila D., Oggeri C., Borio L. (2009)**, Using the slump test to assess the behavior of conditioned soil for EPB tunneling, *Environmental & Engineering Geoscience*, pp. 167-174, 2009, Vol. XV (3)
17. **Peña M. (2003)**, Soil conditioning for sands, *Tunnels & Tunnelling international*, July 2003, pp. 40 - 42



18. **Quebaud S., Sibai M., Henry J.P. (1998)**, Use of chemical foam for improvements in drilling by earth pressure balanced shields in granular soils, *Tunnelling and Underground Space Technology*, vol. 13, No.2 Pergamon – Oxford, pp. 173 – 180
19. **Vinai R. (2004)**, Screw conveyor performance tests, Internal report - University of Oxford - unpublished
20. **Vinai, R., Oggeri, C. and Peila, D. (2007)**, Soil conditioning of sand for EPB applications: A laboratory research, *Tunnelling and Underground Space Technology*, vol. 23(3), pp. 308-317.
21. **Vinai R., Borio L., Peila D., Oggeri C., Pelizza S. (2008)**, Soil conditioning for EPB Tunnelling, *T&T INTERNATIONAL*, , Vol. XII,
22. **Williamson G.E., Traylor M.T., Higuchi M. (1999)**, Soil conditioning for EPB shield tunneling on the South Bay Ocean Outfall, *RETC proceedings 1999*, ch. 51, pp. 897 - 925



ALLEGATO 1

RICERCA BIBLIOGRAFICA IN MERITO ALLA GRANULOMETRIA DEL MATERIALE ABBATTUTO DA UNA MACCHINA DI DISCHI DA ROCCIA IN MATERIALI ROCCIOSI COESIVI

Il presente allegato riporta lo studio relativo alla valutazione delle curve granulometriche del materiale scavato da una fresa a piena sezione da roccia con tecnologia EPB. Questa analisi ha lo scopo di portare alla definizione della curva granulometrica della roccia frantumata da usare per i successivi studi di condizionamento, in quanto, come ben noto, la curva granulometrica del materiale condiziona i parametri del condizionamento. Per la presente fase dello studio si sono reperiti dati di interesse da diverse fonti: articoli scientifici, libri, tesi di laurea e informazioni personali le quali hanno consentito di evidenziare che nello scavo con TBM da roccia, nella gran maggioranza dei casi, la percentuale di passante <1mm (che è particolarmente importante per il condizionamento) è sempre superiore al 10% attestandosi su valori medi contenuti tra il 12% e il 20%.

Si osserva invece che la percentuale di materiale inferiore ai 2cm è estremamente variabile in quanto è direttamente legata alle caratteristiche di resistenza della roccia e alla spaziatura dei dischi, ma comunque riferendosi ai calcari si hanno valori compresi tra il 40% ed il 90%. Nel caso del cunicolo esplorativo della galleria Vaglia si osservano valori compresi tra 80% e 90%.

Da questi risultati appare ragionevole adottare le condizioni del marino ottenuto nel laboratorio DITAG con frantumatore a mascelle in quanto la curva granulometrica appare adeguata ai fini dello studio. Le curve granulometriche ottenute sono riportate nei grafici 1 e 2.

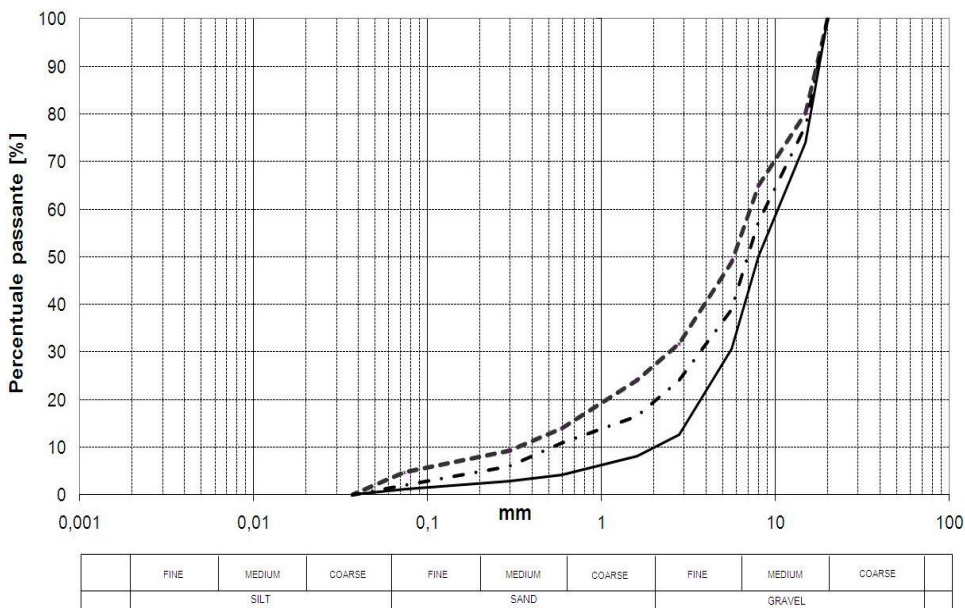


Grafico 1 – Curva granulometrica della formazione Monte Morello.

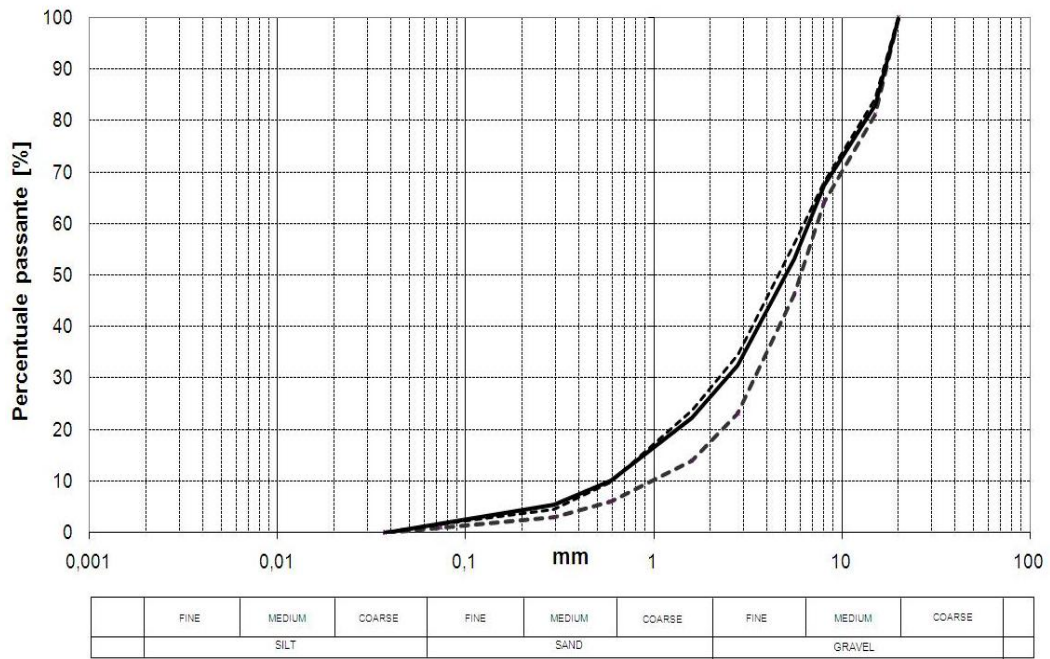


Gráfico 2 – Curva granulométrica della formazione Sillano.

SINTESI DEI DATI DISPONIBILI

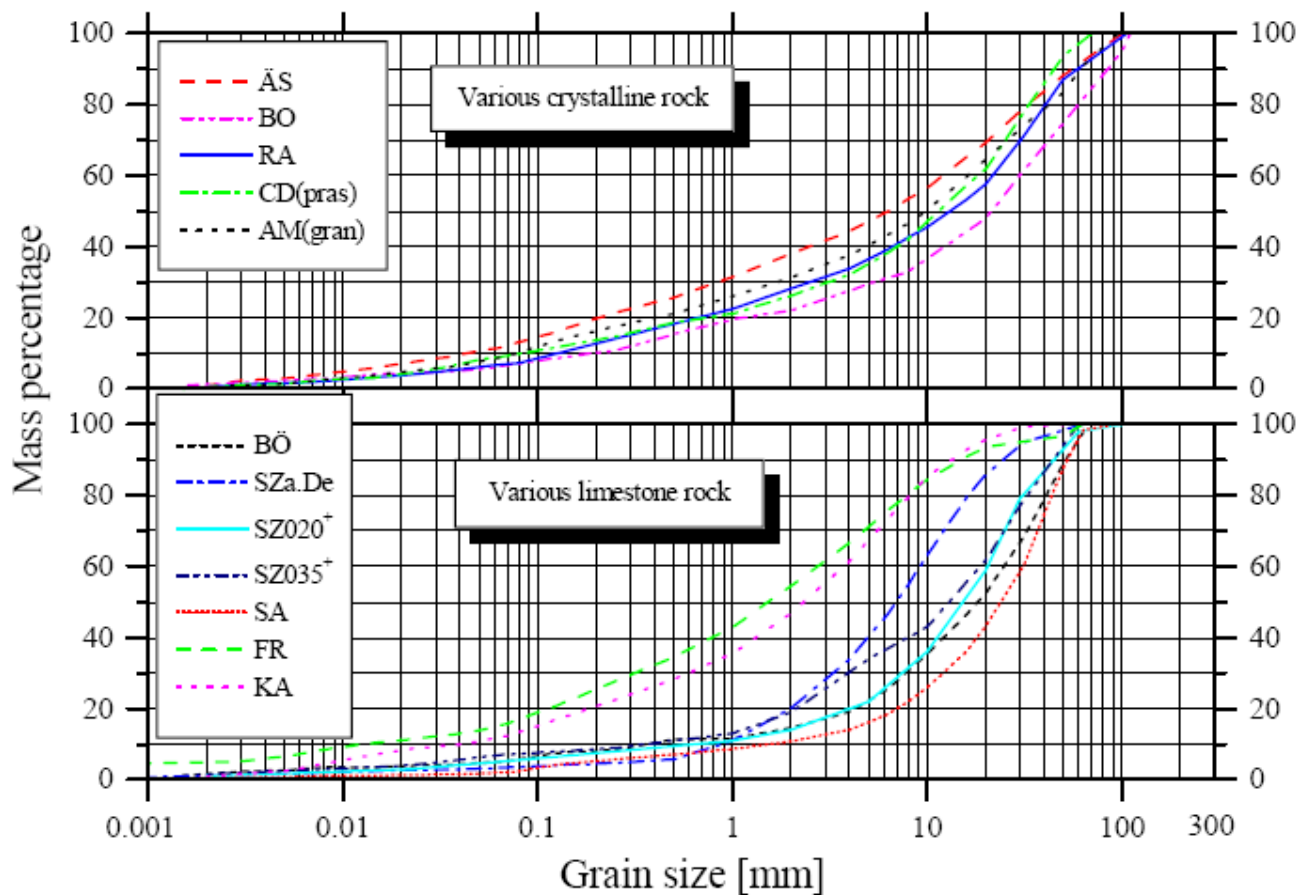
Nel seguito sono sinteticamente riportati i dati reperiti e la fonte da cui sono stati estratti.

CASO 1

Dott. Cedric N Thalman-Suter (1999), “Concrete aggregate production with TBM-muck”, Büro für Ingenieurgeologie AG, non pubblicato disponibile sul sito web: http://www.b-i-g.ch/publikationen/MBW_AT_Tagung_Dundee_99.pdf.

Nel lavoro sono riportate le curve granulometriche del materiale in uscita da TBM da roccia per 10 gallerie in Europa, sia per rocce a struttura cristallina (5 gallerie), sia per calcari (5 gallerie). Non sono disponibili i dati di targa delle macchine considerate.

Si osserva che la percentuale di passante in peso al millimetro è compresa tra il 20% e il 33% per le rocce cristalline e tra il 9% ed il 45% per i calcari.



Legenda (localizzazione delle gallerie dove sono stati effettuati i campionamenti)

Grafico superiore

ÄS: Äspö (S) ; BO: Bolzano (I); RA: Randa (CH) CD: Cleuson-Dixence (CH);

Grafico inferiore

BÖ: Bözberg (CH); SZ: Senceboz (CH); SA: Sachseln (CH); FR: Frutigen (CH); KA: Kandersteg (CH)

Grafico 3 - Curve granulometriche del materiale relativo al Caso 1

Nello stesso articolo si riporta una tabella che mette a confronto diverse tecniche di scavo di gallerie dal punto di vista della granulometria del materiale scavato da cui si può osservare che, secondo questi autori, l’utilizzo di TBM con dischi porta ad avere un materiale scavato con granulometria più fine, com’è logico aspettarsi e ad una maggiore percentuale di materiale con dimensioni inferiori ai 4 mm dell’ordine del 15-50% rispetto all’intero abbattuto.

Type of tunnelling method	Cutting disc spacing [mm]	0/4mm	>32mm	>100mm
		Min.-max. values [mass-%]		
Conventional drill and blast (crystalline rock)	-	2-5	85-95	75-85
Back cutting technique (sandstone)	-	15-20	65-75	45-60
Roadheader drive (Jura limestone)	-	15-40	5-35	0-5
TBM with bits cutter	60-70	30-50	2-20	0
TBM drive with disc (sediments, crystalline rocks)	65-90	15-50	5-50	0-10
TBM drive with enlarged cutting roller spacing (Plutonit) [2]	86	45	20	0
	129	40	30	5
	172	20	35	15

Tabella 1 – Sintesi frazioni granulometriche in funzione del metodo di scavo

CASO 2

Q.M. Gong, J. Zhao, Y.S. Jiang, (2007), “In situ TBM penetration tests and rock mass boreability analysis in hard rock tunnels”, Tunneling and Underground Space Technology, 22 (3), 303-316.

L’articolo riporta i risultati di test di penetrazione nello scavo con TBM di diametro 4,90m sviluppati nell’ambito dei lavori per la realizzazione del “deep tunnel sewerage system” a Singapore, nei lotti T05 e T06. La curva granulometrica che verrà in seguito riportata si riferisce ai test condotti nel lotto T05 all’interno di un granito con resistenza a compressione monoassiale pari a 173 MPa e resistenza a trazione, misurata con prova Brasiliana, pari a ~10,5 MPa.

La TBM è una macchina prodotta dalla Herrenknecht con diametro di 4,90 m con testa equipaggiata sia con utensili da roccia dura, sia da terreno.

Design of the penetration test in T05 tunnel

TBM penetration test	Thrust level (%)	Thrust force in main cylinder (kN)	Average thrust force in steering cylinder (bar)	Test time (min)	Muck samples (>30 kg)
Step 0	100	9200	165	5	Yes (No. 0)
Step 1	40	3896	95	10	Yes (-)
Step 2	50	4870	100	10	Yes (-)
Step 3	60	5633	103	10	Yes (No. 3)
Step 4	70	6453	108	10	Yes (No. 4)
Step 5	80	7450	121	10	Yes (No. 5)
Step 6	90	8484	142	10	Yes (No. 6)
Step 7	100	9200	165	10	Yes (No. 7)

Tabella 2 – Sintesi delle prove eseguite nel caso studio 2

TBM cutter wear conditions in T05 penetration test

Tool type	Tool position	Tool wear (mm)
Double cutters	1/3	10/6
	2/4	8/6
	5/7	5/4
	6/8	10/12
Face single cutters	9	1
	10	14
	11	8
	12	9
	13	12
	14	15
	15	13
	16	14
	17	15
	18	7
	19	7
Transition single cutters	20	1
	21	9
	22	0
	23	15
	24	0
	25	10
	26	1
	27	0
	28	5
	29	8
	30	10
Gauge cutters	31	3
	32a	4
	32b	7

Remarks: the maximum allowable cutter wear is 20 mm. Thus, the overall cutter wear is normal.

Tabella 3 – Posizione degli utensili nelle macchine considerate

Le curve granulometriche del materiale di scavo sono le seguenti. Ogni curva si riferisce ad un test e di conseguenza a differenti valori di spinta.

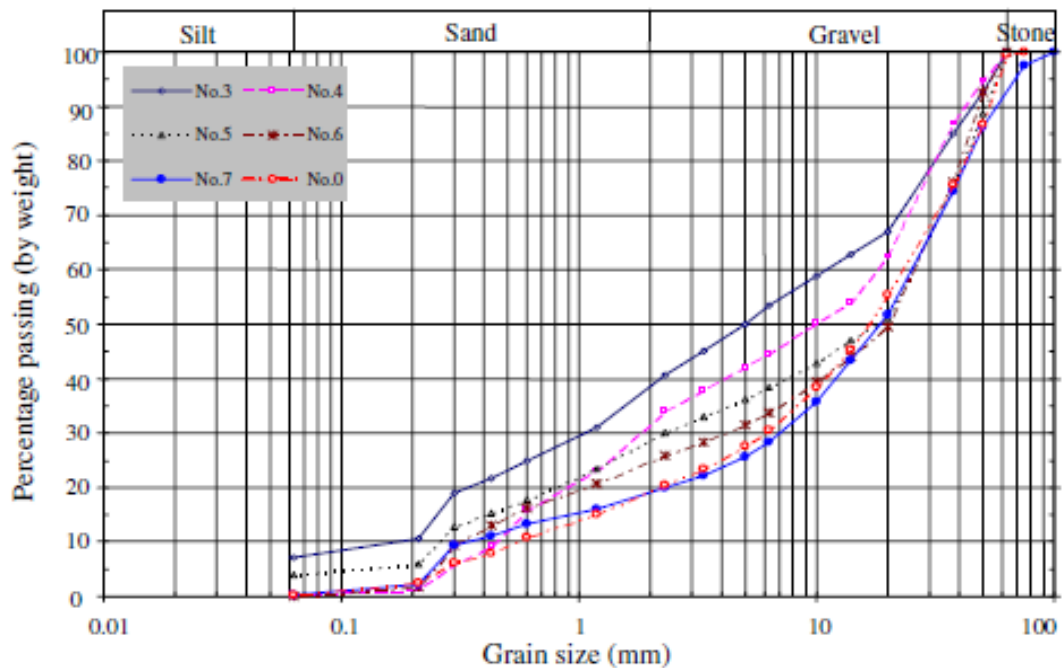


Grafico 4 - Curve granulometriche del materiale relativo al Caso 2.

CASO 3

Hp. Olbrecht, W. Studer (EMPA), (1998), "Use of TBM chips as concrete aggregate", Materials and structures, 31, April, 184 – 187.

Nel lavoro sono riportati i risultati di prove meccaniche su calcestruzzi prodotti utilizzando, come aggregati, materiale di scavo di TBM.

Gli ammassi rocciosi in cui sono state scavate le gallerie, da cui sono stati prelevati i campioni, sono riportati nella seguente tabella 4.

Caso #	Roccia	Punto di prelievo
1	Leventina Gneiss	Galleria esplorativa di Polmengo (CH) tra la progressiva 387m e 390m
2	Scisto calcareo	Zona di Kandertal
3	Gneiss biotitico, scistoso e debolmente porfirico	Galleria esplorativa di Polmengo (CH): progressiva 4600m
4	Scisto calcareo	Galleria esplorativa di Frutingen: progressiva 1500m
5	Scisto calcareo	Galleria esplorativa di Frutingen: progressiva 6500m
6	Ghiaia alluvionale	Midland svizzero

Le curve granulometriche relative allo smarino di queste gallerie sono riportate nel grafico 5.

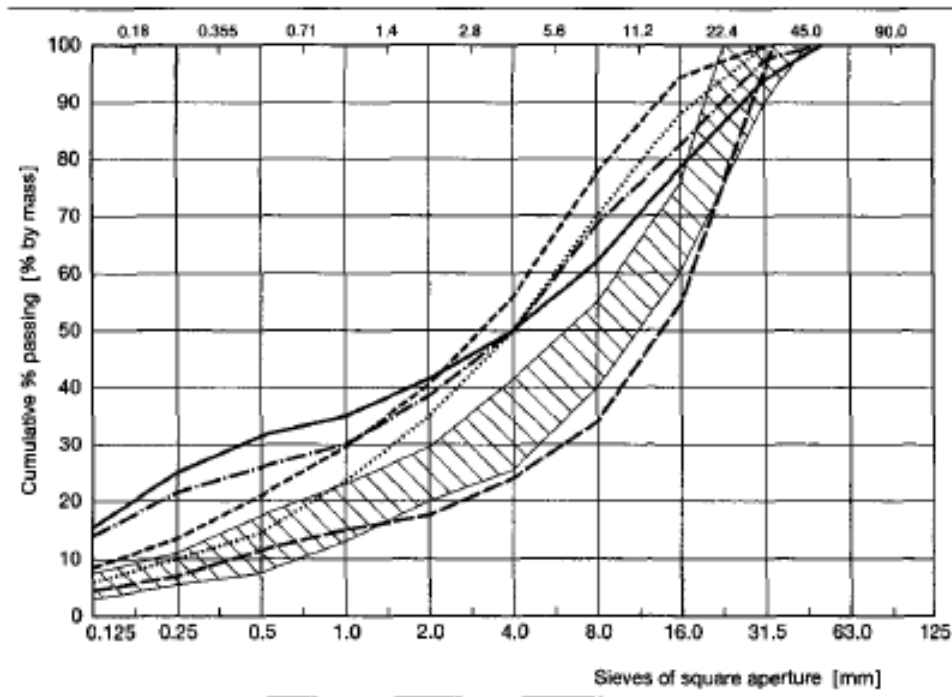


Gráfico 5 - Curve granulometriche del materiale relativo al Caso 3.

Si osserva che il parametro <1mm è compreso tra ~ 12% e ~ 35%.

CASO 4

E. Büchi, C. Thalmann, (1994), “Reuse of TBM muck versus cutter spacing”, TBM symposium, Stockholm, Sweden.

Nell’articolo sono state correlate la spaziatura degli utensili di una TBM e la pezzatura dello smarino.

Le prove sono state svolte nell’ambito dei lavori per la realizzazione dell’Äspö Hard Rock Laboratory in Svezia che è stato scavato in un granito con resistenza a compressione monoassiale di ~250 MPa.

La macchina utilizzata è una TBM Robbins Jarva MK 15 – 1680/5.0 con diametro di 5m, potenza installata alla testa di 1680 KW, coppia alla testa di 8330 kN ed equipaggiata con 34 utensili a disco da 17”

I risultati hanno portato a definire tre curve in relazione a tre differenti spaziature tra gli utensili comprese tra 86mm (100%), 129mm (150%) e 172mm (200%) e sono sintetizzati nel grafico 6:

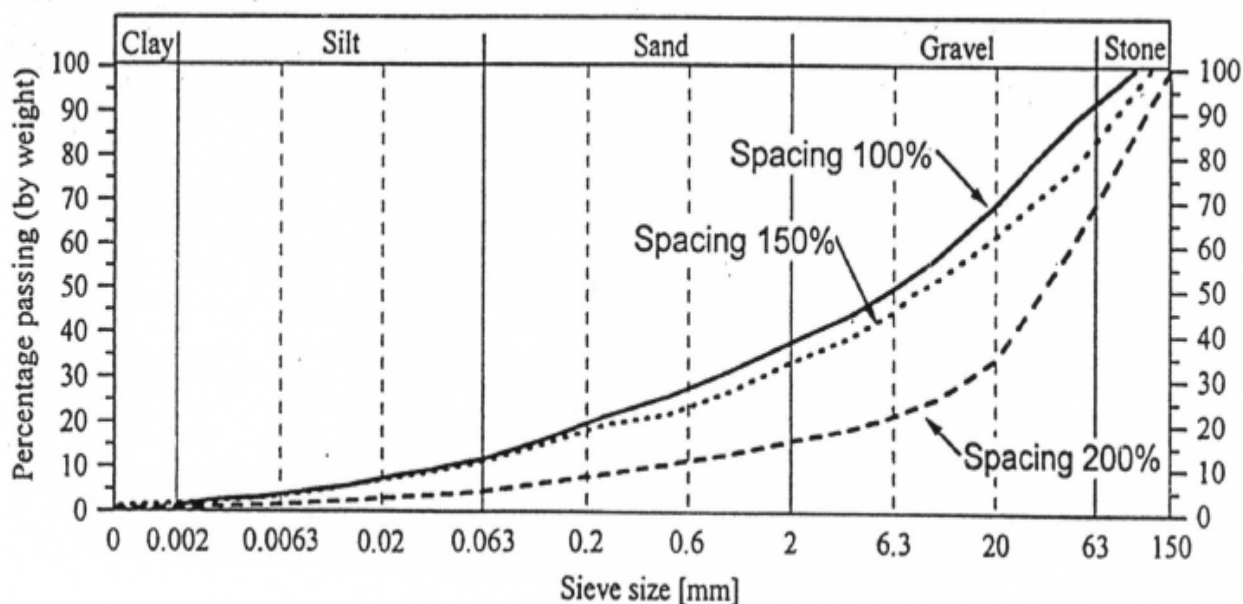


Grafico 6 – Curve granulometriche dei materiali studiati nel caso 4.

Si può osservare che la percentuale di passante inferiore a 1mm oscilla tra il 12% e il 30%.

CASO 5

Maurizio Pepino, (2009) “Scavo meccanizzato di gallerie: previsione qualità del marino nell’ottica del suo riutilizzo”, Tesi di laurea, Politecnico di Torino, non pubblicata.

Nel lavoro sono riportati i dati relativi al marino estratto da due diverse gallerie: il cunicolo esplorativo Aica per la realizzazione del tunnel del Brennero e la galleria idoelettrica dell’impianto “La Thuile” in Valle d’Aosta.

Nel primo caso il litotipo in cui è stata scavata la galleria è un granito di buone caratteristiche meccaniche con resistenza a compressione monoassiale di 133 MPa, resistenza a trazione di 8,1 MPa e un RQD compreso tra 70 e 90. La TBM utilizzata per la realizzazione di questa galleria ha un diametro di 6,30m, 45 dischi con spaziatura 70mm di diametro 17”, una potenza alla testa di 1960 kW ed una massima spinta su ogni disco di

250 kN. Nel secondo caso la galleria è scavata in calcescisti con resistenza a compressione monoassiale di 90 MPa, resistenza a trazione di 7,1 MPa e spaziatura delle discontinuità comprese tra 200 e 400mm. La TBM utilizzata aveva diametro di 3,9m, 26 dischi di diametro 16” ¼ con una potenza alla testa di 1000 kW e una massima spinta su ogni disco di 219 kN. La curva granulometrica ottenuta da un campione prelevato dal marino in uscita dal cunicolo esplorativo Aica è riportata nel grafico 7 dalla quale si vede che la percentuale di passante sotto 1mm è dell’ordine del 15%.

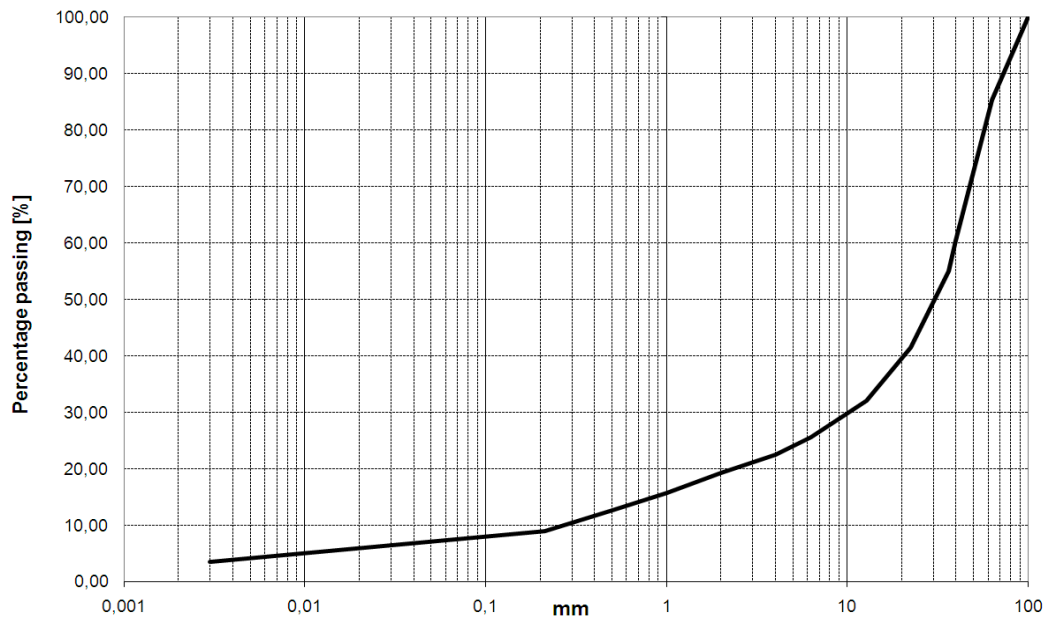


Grafico 7 – Curva granulometrica cunicolo esplorativo Aica

La curva granulometrica ottenuta da un campione prelevato dal marino in uscita dalla galleria idroelettrica dell’impianto “La Thuile” è riportata nel grafico 8 dalla quale si vede che il passante con dimensioni < 1mm sale al 30%.



Grafico 8 - Curva granulometrica galleria idroelettrica “La Thuile”



CASO 6

H. Tuncdemir, N. Bilgin, H. Copur, C. Balci, (2008), “Control of rock cutting efficiency by muck size”, International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, 45, 278 – 288.

In questo articolo è stata valutata l’efficienza di scavo di una TBM, in base alle dimensioni del materiale in uscita dalla macchina stessa.

In particolare sono state sviluppate prove nel Tarabya Tunnel a Istanbul, scavato utilizzando una TBM Herrenknecht del diametro di 2,9m, attrezzata con 24 dischi da 13”, con una potenza totale installata di 620 kW, una coppia di 725 kNm e velocità di rotazione pari a 16 rpm all’interno di un calcare con resistenza a compressione monoassiale pari a 80 MPa.

La curva granulometrica dello smarino è riportata nel grafico 9 il quale fornisce una percentuale di passante < 1mm dell’ordine del 5-6%.

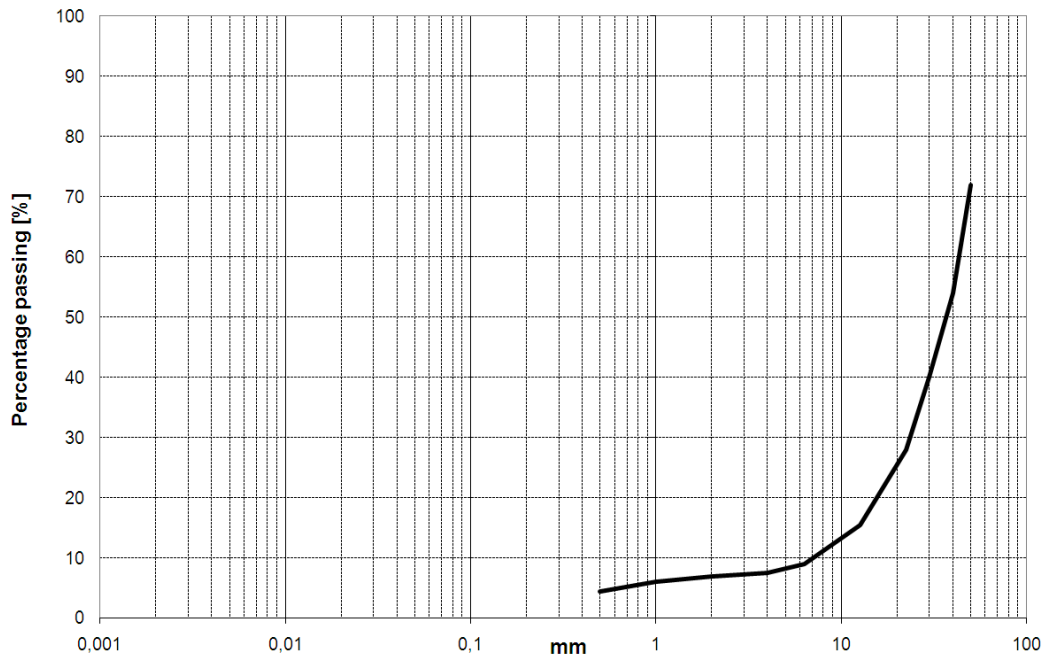


Grafico 9 - Curva granulometrica Tarabya Tunnel

CASO 7

N. Bilgin, T. Özbayir, N. Sözac, Y. Eyigün, (2009), “Factors affecting the economy and the efficiency of metro tunnel derivate with two TBM’s in Istanbul in very fractured rock”, ITA – AITES World Tunnel Congress 2009, con dati aggiuntivi in merito alle caratteristiche del marino trasmessi personalmente dal Prof. N. Bilgin.

Il litotipo in cui sono state realizzate le due gallerie oggetto degli studi sono calcari aventi resistenza a compressione monoassiale di 32,6 MPa mentre la macchina utilizzata è una TBM Herrenknecht di con diametro 6,57 m, 38 utensili con una potenza installata alla testa di 1260 kW e una spinta massima sugli utensili di 26t.

Le curve granulometriche dello smarino ottenute da prove a diverse progressive lungo il tracciato sono riportate nel grafico 10 di seguito presentata.

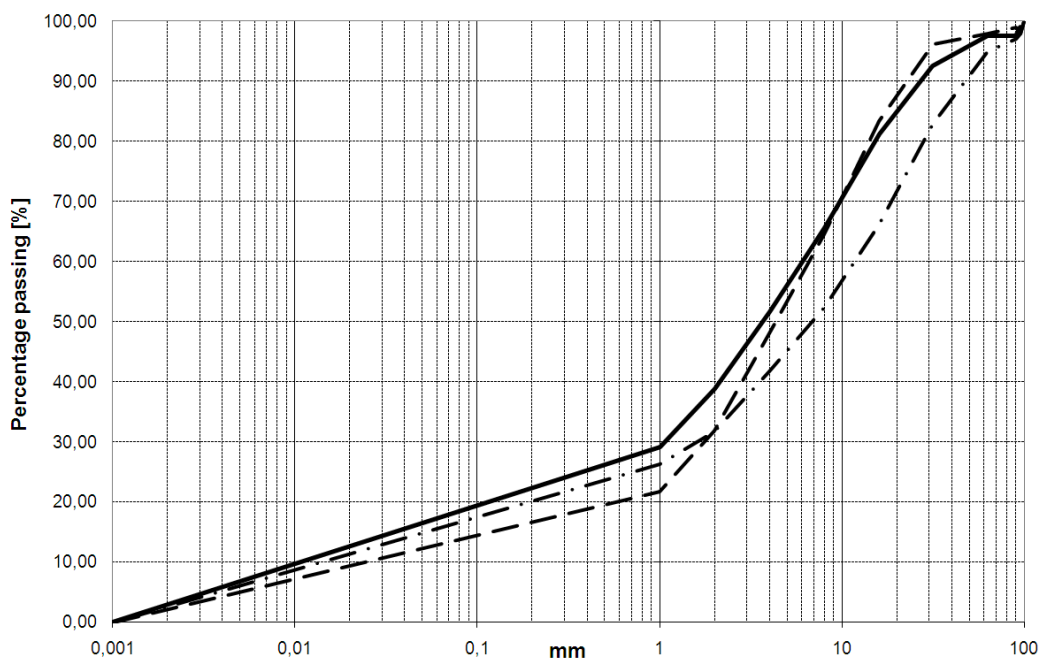


Grafico 10 – Curve granulometriche Elek Tunnel

CASO 8

M. Concilia, R. Grandori, (2004), “New Viola Water Transfer Tunnel”, International Congress on Mechanized Tunneling: Challenging case histories, GEAM, Torino, pp.

I dati relativi alle curve granulometriche del marino sono stati ottenuti in gentile concessione dall’ing. Concilia M.

La galleria e il nuovo Canale Viola (Premodio) si sviluppano in formazioni di micascisti, calcari e dolomie.

Lo scavo è stato realizzato con una TBM di 3,70m di diametro con 24 dischi ad interasse 92mm con una potenza installata di 5280 kW e una spinta massima per disco di 220 kN.

Le curve granulometriche dello smarino proveniente da un ammasso roccioso metapelitico-filladico sono riportate nel grafico 11 mentre quelle ottenute in un ammasso al contatto tra micascisti e gneiss sono riportate nel grafico 12.

Dalle curve si osserva che il passante con dimensioni inferiori ad 1mm è compreso, per le metapiliti filladiche tra il 10% e il 40% mentre per i micascisti e gneiss il valore è più basso e dell'ordine di pochi %.

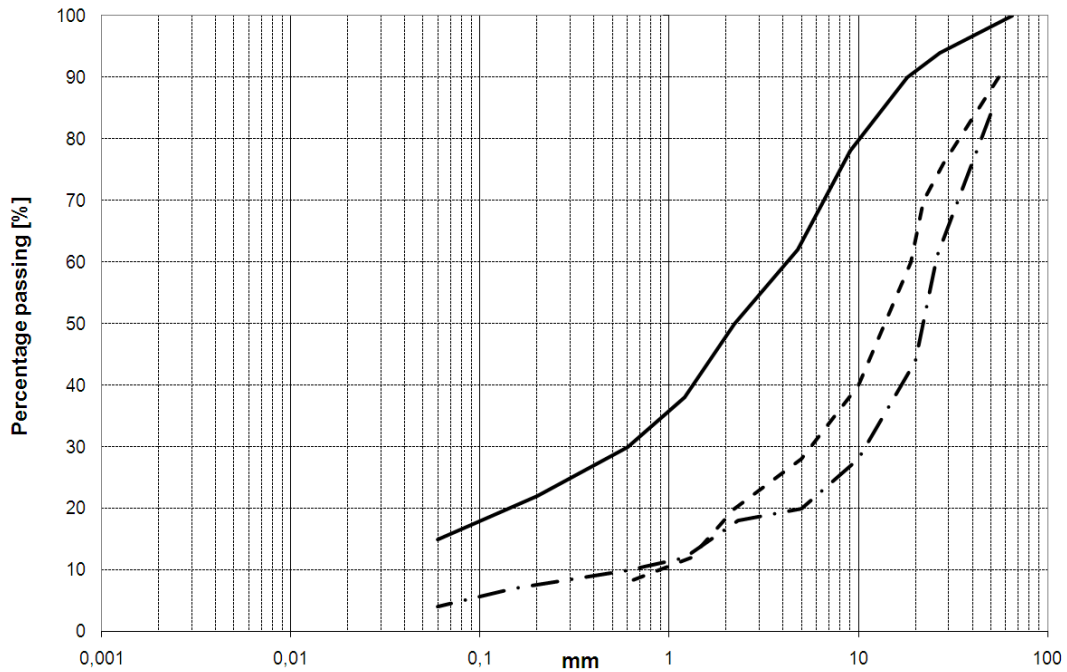


Grafico 11 - Curve granulometriche delle formazioni metapilitiche filladiche

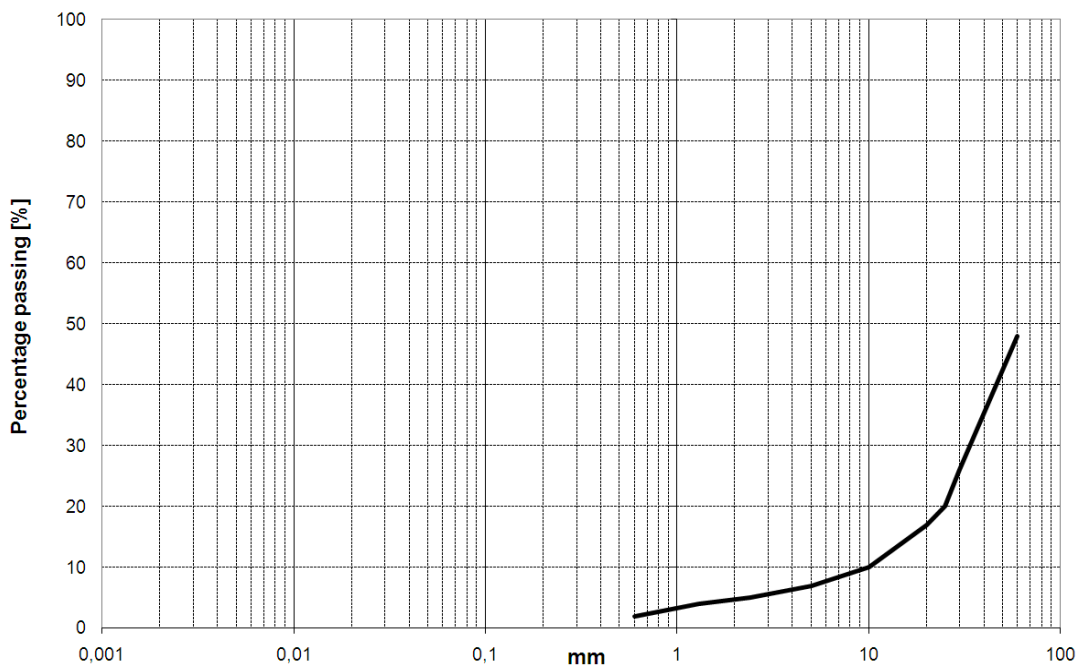


Grafico 12 - Curve granulometriche delle formazioni micascisti-gneiss

CASO 9

Metro di Barcellona. I dati relativi alle curve granulometriche del marino sono stati ottenuti in gentile concessione dall'ing. Della Valle Nicola.

Lo scavo è stato realizzato con una TBM di 5,98m di raggio con dischi da 17” una potenza installata di 12.250 kW e una spinta massima della testa di 13.034 kN. Le formazioni attraversate sono lavagna, scisti, porfido, cornubiana e grano diorite.

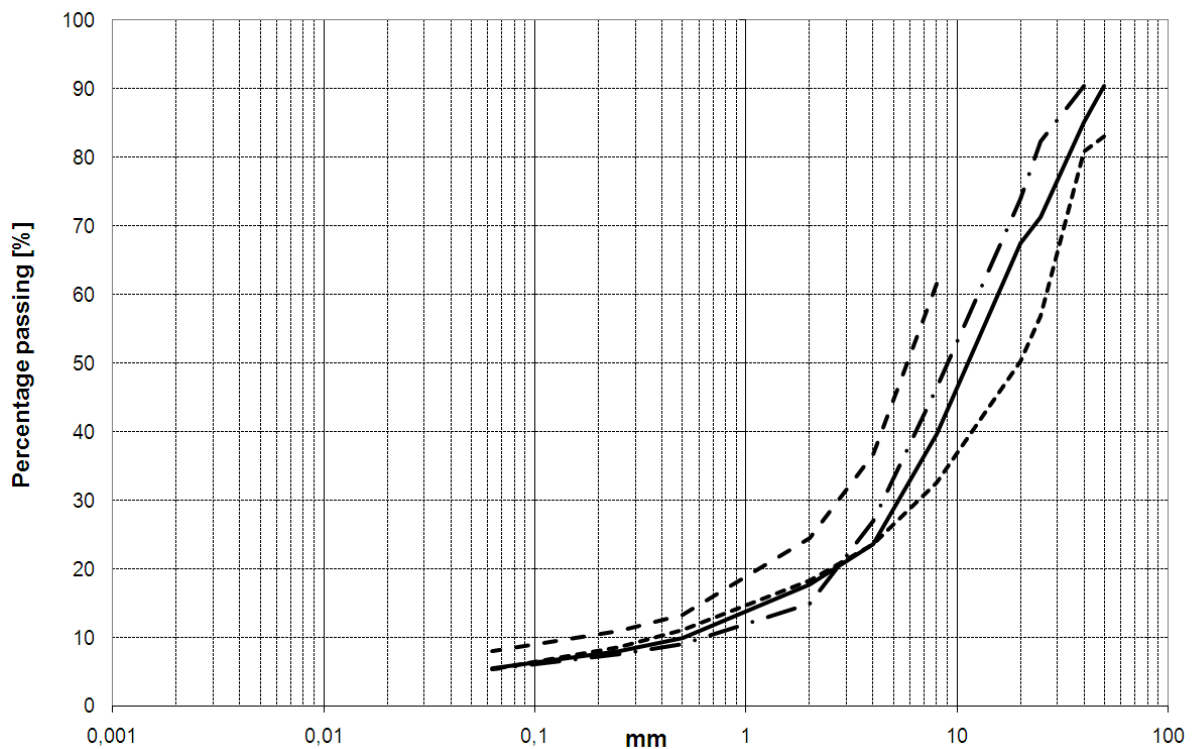


Grafico 13 – Curve granulometriche delle formazioni attraversate nel cantiere di Barcellona.

Dalle curve si osserva che il passante con dimensioni inferiori ad 1mm è compreso tra il 12% e il 20% .

CASO 10

M. Vanarese, P. Vannocci, (2006), “Nuove tecniche di campionamento ed analisi di rocce granulari o coesive da scavo durante i grandi progetti geo-ingegneristici”, Giornale di Geologia Applicata, 4, 115-222.

Nel presente articolo sono riportate 5 curve granulometriche ricavate dal marino di scavo del cunicolo esplorativo della galleria Vaglia. Queste curve sono particolarmente importanti perché si riferiscono ad una galleria interamente scavata all'interno del complesso geologico del Monte Morello in cui in parte sarà scavata la galleria oggetto di studio.

Lo scavo è stato realizzato con una TBM di 6,23m di diametro con 43 dischi da 17' di tipo back-loading che accettano una spinta di 250 kN/cad, con una potenza installata di 3000 kW e una coppia di scavo di circa 5 kNm.

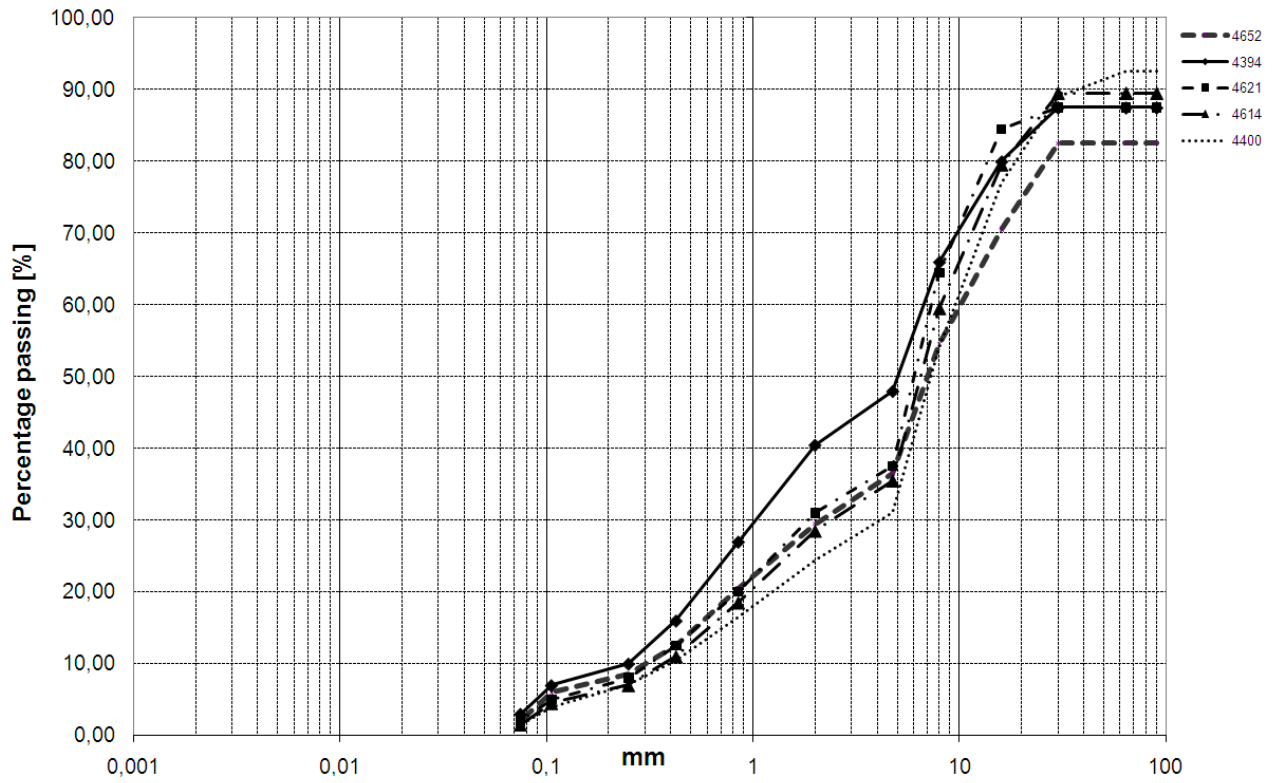


Grafico 14 – Curve granulometriche prodotte dallo scavo della galleria Vaglia

Dall'analisi delle curve granulometriche si evince che il passante < 1mm oscilla tra il 18% e il 28%