

NODO STRADALE E AUTOSTRADALE DI GENOVA

Adeguamento del sistema

A7 – A10 – A12

PROGETTO DEFINITIVO Progetto di Cantierizzazione

STUDIO DI IMPATTO AMBIENTALE

RAPPORTO SUL CONDIZIONAMENTO DEI TERRENI

IL RESPONSABILE PROGETTAZIONE SPECIALISTICA Ing. Ferruccio Bucalo Ord. Ingg. Genova N. 4940 RESPONSABILE UFFICIO MAM	IL RESPONSABILE INTEGRAZIONE PRESTAZIONI SPECIALISTICHE Ing. Orlando Mazza Ord. Ingg. Pavia N. 1496 RESPONSABILE AREA DI PROGETTO GENOVA	IL DIRETTORE TECNICO Ing. Maurizio Torresi Ord. Ingg. Milano N. 16492 RESPONSABILE FUNZIONE STP
---	---	--

WBS	RIFERIMENTO ELABORATO										DATA:	REVISIONE												
	DIRETTORIO				FILE						FEBBRAIO 2011	n.	data											
	codice commessa	N.Prog.	unita'	n. progressivo							01	APRILE 2011												
	1	1	0	7	1	2	0	4	M	A	M	C	A	M	B	X	S	U	0	0	0	2	SCALA:	–

	COORDINATORE OPERATIVO DI PROGETTO Ing. Ilaria Lavander	ELABORAZIONE PROGETTUALE A CURA DI : Dott. Francesco Cipolli
		IL RESPONSABILE ATTIVITA' SPECIALISTICA: Ing. Sara Frisiani
CONSULENZA A CURA DI :		COORDINAMENTO SCIENTIFICO Ing. Mauro Di Prete

VISTO DEL COORDINATORE GENERALE SPEA DIREZIONE OPERATIVA PROGETTAZIONE ED ESECUZIONE LAVORI ASPI Ing. Alberto Selleri	VISTO DEL COMMITTENTE  Ing. Giorgio Fabriani	VISTO DEL CONCEDENTE 
---	--	--



Contratto di Ricerca tra DITAG – Politecnico di Torino e SPEA Ingegneria Europea S.p.A.

Prove di condizionamento del terreno delle gallerie naturali inserite nei lavori di realizzazione del progetto “Gronda di Genova” 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

Ing. Andrea Picchio

Aprile 2011



INDICE

1. Premessa	4
2. Caratteristiche del terreno indagato	5
2.1 Formazione dei calcescisti (CLS)	5
2.2 Formazione degli argillocisti (AGS)	5
2.3 Formazione delle serpentiniti (SRP)	6
2.3.1. Commento alle caratteristiche tecniche delle serpentiniti nell’ottica del condizionamento	6
2.4 Materiale utilizzato ai fini delle prove	7
3. Prove per lo studio del condizionamento a mezzo di schiume.....	9
3.1 Generatore di schiuma adottato.....	9
3.2 Parametri di caratterizzazione della schiuma	10
3.3 Prova per la determinazione del tasso di espansione (Foam Expansion Ratio – FER)	11
3.4 Caratterizzazione dell’agente schiumogeno utilizzato mediante determinazione del tempo di semivita della schiuma (t_{50})	11
4. Prove di slump per lo studio del condizionamento a mezzo di schiume.....	13
4.1 Test di caratterizzazione del materiale condizionato	13
4.2 Caratterizzazione del terreno condizionato con schiuma impostato secondo la procedura definita nel laboratorio TUSC	14
4.3 Prove di slump	15
4.3.1. Prove di slump effettuate sulla formazione dei calcescisti	15
4.3.2. Conclusioni sulle prove di slump realizzate sulla formazione dei calcescisti. 19	
4.3.3. Prove di slump effettuate sulla formazione degli argillocisti.....	20
4.3.4. Conclusioni sulle prove di slump realizzate sugli argillocisti.	24
5. Prove di estrazione controllata con coclea da camera in pressione.....	26
5.1. Caratteristiche dell’apparato sperimentale di estrazione mediante coclea.....	26
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 dei Calcescisti	48



5.3.1 Parametri di condizionamento utilizzati per le prove di estrazione sulla formazione dei calcescisti (CLS).....	48
5.3.2 Prova CLS-A.....	48
5.3.3 Commenti finali della prima prova di estrazione (CLS-A) effettuata sulla formazione dei calcescisti.....	55
5.3.4 Prova CLS-B	58
5.3.5 Commenti alla seconda prova di estrazione (CLS-B) effettuata sulla formazione dei calcescisti.....	63
6. Conclusioni.....	64
7. Bibliografia.....	65
ALLEGATO 1.....	67



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 ha collaborato l'Ing. Andrea Picchio.

Le prove di laboratorio eseguite hanno seguito una procedura ampiamente consolidata e verificata dagli scriventi per numerose gallerie scavate o in fase di scavo con la tecnologia EPB, nonché dalle ricerche sviluppate da due tesi di dottorato e da numerose tesi di laurea presso il Politecnico di Torino negli ultimi 10 anni.

Si è eseguita 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 nel caso di materiali granulari e rocce fratturate.

Successivamente la litologia prevalente (formazione dei calcescisti) è stata sottoposta a due prove di estrazione controllata da camera in pressione mediante attrezzatura di estrazione con coclea sviluppata dal laboratorio Centro di Ricerca e Laboratorio per le Gallerie e lo Spazio Sotterraneo (TUSC) 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 fatto è anche importante 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 ritiene comunque il campione di materiale utilizzato rappresentativo del comportamento della principale formazione che si incontrerà.

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.



2. Caratteristiche del terreno indagato

I terreni studiati sono rappresentativi di due delle prevalenti formazioni geologiche che le gallerie in progetto attraverseranno e sono rispettivamente la formazione dei calcescisti e la formazione degli argiloscisti.

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 dei calcescisti (CLS)

I materiali raggruppati nella denominazione “calcescisti”, sono appartenenti alle unità tettonometamorfiche Voltri e Palmano – Caffarella.

Con il termine calcescisti si indicano metasedimenti di varia composizione, in particolare si riconosce una alternanza di calcescisti carbonatici e di scisti quarzoso micacei.

I calcescisti carbonatici appaiono di colore da marrone (superficie debolmente alterata) a grigio (frattura fresca), mentre se sono più profondamente alterati assumono colorazioni rossastre.

Gli scisti quarzoso micacei, invece, assumono delle tonalità più scure, con colorazioni solitamente da grigie chiare a grigie scure in frattura fresca; sono rocce che spesso si alterano, assumendo tonalità arancione - ocra e si disgregano fino a generare spesse coltri di disfacimento.

Poiché si assume che il comportamento meccanico dei materiali e la risposta alla frantumazione ed all'azione degli utensili a disco di una macchina di scavo a piena sezione, sia praticamente costante al variare delle caratteristiche della litologia oggetto dello studio, il campione da sottoporre a prova si considera rappresentativo per le diverse formazioni dei calcescisti attraversate dal tracciato in progetto.

2.2 Formazione degli argiloscisti (AGS)

I materiali raggruppati nella denominazione “argiloscisti”, sono materiali appartenenti a differenti formazioni geologiche, di seguito descritte.

Il materiale che è stato sottoposto alle prove di condizionamento, nel seguito descritto come “argiloscisti”, è un materiale campione prelevato mediante perforazione a carotaggio. Poiché si assume che il comportamento meccanico e la risposta alla frantumazione ed all'azione degli utensili a disco di una macchina di scavo a piena sezione, sia costante al variare delle caratteristiche della litologia oggetto dello studio, il campione da sottoporre a prova si considera rappresentativo per le diverse formazioni di argiloscisti attraversate dal tracciato in progetto.

Argiloscisti di Costagiutta: alternanze di argiloscisti e di calcari cristallini, metapeliti scistose grigio-nerastre, più o meno siltose, metasiltiti e metaareniti in strati centimetrici. Con intercalazioni di metacalcilutiti siltose più o meno marnose, di colore grigio o grigio-bruno in strati e banchi, più frequenti alla base della sequenza.

Argiloscisti di Murta: alternanza di argiloscisti filladici grigio scuro e grigio argenteo, a patina sericitica, con intercalazioni di sottili straterelli calcarei di spessore centimetrico (1-2 cm), di metasiltiti e metaareniti fini di colore grigio chiaro, nocciola in alterazione, con laminazioni piano-parallele localmente convolute. Gli strati hanno generalmente spessore



da centimetrico a decimetrico; sono presenti orizzonti con strati fino a 30 centimetri di argilliti e metasiltiti. Possono essere presenti noduli allungati e liste di quarzo microcristallino biancastro.

Argillite di montoggio: argillocisti da grigio argenteo a grigio nerastro, privi di carbonati, in strati da centimetrici a decimetrici, con intercalazioni di arenarie fini e arenarie fini calcaree torbiditiche, in strati planari da centimetrici a decimetrici, talora debolmente rinsaldati; al tetto sono dominanti orizzonti di argilliti policrome laminate.

2.3 Formazione delle serpentiniti (SRP)

Serpentiniti e serpentinoscisti derivanti dal materiale peridotitico del mantello superiore. Talvolta mantengono relitti di tessitura lherzolitica originaria. Si presentano di colore verde, da chiaro a scuro, in frattura fresca; quando alterate, invece, assumono colorazioni più arancioni-rossicce, talvolta marroni. In affioramento si presentano con caratteristiche tessiturali e strutturali estremamente varie quindi, ai fini della caratterizzazione geomeccanica di tale unità, si è deciso di distinguere, mediante soprassegni, le porzioni a differente tessitura.

Serpentiniti a tessitura massiccia: presentano un aspetto generalmente compatto, le foliazioni sono presenti ma prevale la componente massiva passano gradualmente a serpentiniti a tessitura foliata (che rappresentano il tipo più diffuso), caratterizzato da clivaggi ben espressi, nei quali si riconoscono diverse generazioni di deformazioni. Queste prime due tessiture sono accomunate da elevata coesione del materiale roccia e conseguentemente dalla loro elevata resistenza.

Le Serpentiniti brecciate sono presenti in Val Branega, si tratta di breccie a clasti serpentinitici eterometrici con matrice solitamente ben cementata.

Le Serpentiniti cataclasate sono state distinte nel settore più prossimo alla linea Sestri - Voltaggio e sono caratterizzate da un intenso grado di fratturazione e fissilità in campo fragile che da luogo a superfici di disgiunzione lisce, spesso con superfici di aspetto vetrificato.

All'interno di tale tipologia sono riconoscibili porzioni di dimensioni da metriche a decametriche di serpentiniti più massicce che talora, in mancanza di affioramenti significativi, sono gli unici elementi morfologicamente evidenti.

2.3.1. Commento alle caratteristiche tecniche delle serpentiniti nell'ottica del condizionamento

L'analisi delle caratteristiche meccaniche e tecniche delle serpentiniti, derivate dalle prove di laboratorio, nonché il comportamento del materiale roccioso disgregato da utensili a disco fa ipotizzare che, realisticamente, la risposta all'azione dell'utensile di scavo e quindi al condizionamento dei calcescisti e delle serpentiniti sia da ritenersi analogo. Questo fatto consente di estendere alle serpentiniti i risultati in termini di condizionamento ottenuti sui calcescisti.

Conseguentemente, ai fini delle analisi chimiche, i dosaggi di prova degli agenti condizionanti saranno da ritenere analoghi.

2.4 Materiale utilizzato ai fini delle prove

Per entrambe le litologie oggetto dello studio, il materiale è stato prelevato dal deposito presente lungo il tracciato dell’autostrada A26, in prossimità della galleria “Turchino”, al km 10+092 circa. Il materiale è stato prelevato in forma di carote di sondaggio, risultanti dalla campagna di sondaggi ed indagini geognostiche realizzata a suo tempo per la redazione delle relazioni geologica, geomeccanica ed idrogeologica relativa al progetto “Gronda di ponente”.

Questi elementi sono stati ridotti di dimensione mediante frantumazione (manuale o con frantoio a mascelle) fino ad ottenere un contenuto di fine (< 1mm) dell’ordine del 12-15% (grafici 2.1 e 2.2).

La curva granulometrica utilizzata rappresenta quella che potrà essere la “matrice” di roccia demolita dagli utensili (dischi) della testa di scavo. Il contenuto di fine ottenuto mediante frantumazione è stato ritenuto, in questa prima fase della ricerca, come rappresentativo delle caratteristiche del terreno che sarà abbattuto dalla macchina. Le curve granulometriche dei campioni dopo la frantumazione sono quelle riportate nei grafici 2.1 e 2.2 mentre il contenuto d’acqua delle rocce recapitate al laboratorio è praticamente nullo per entrambe le formazioni.



Figura 2.1 – Aspetto visivo della formazione dei calcescisti prima della frantumazione (sinistra) e dopo (destra)

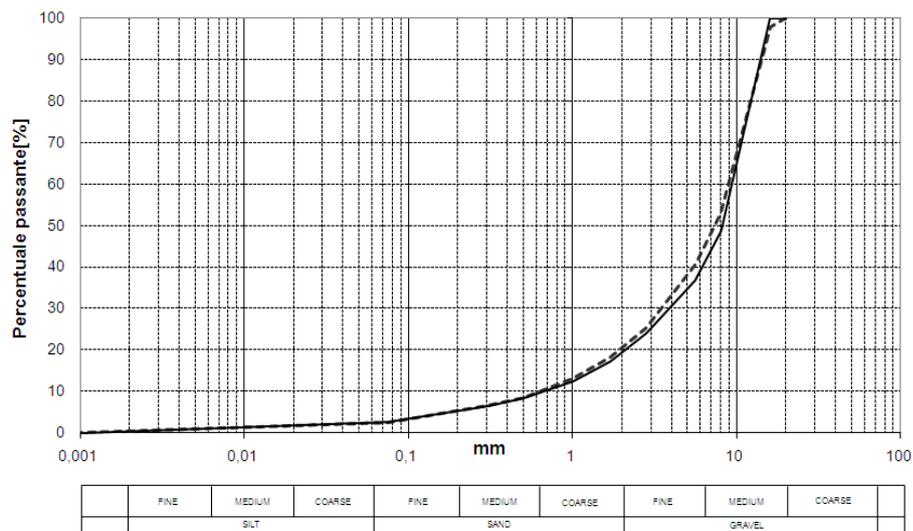


Gráfico 2.1 – Curves granulometriche della formazione dei calcescisti dopo la frantumazione.



Figura 2.2 – Aspetto visivo della formazione degli argilloscisti prima della frantumazione (sinistra) e dopo (destra)

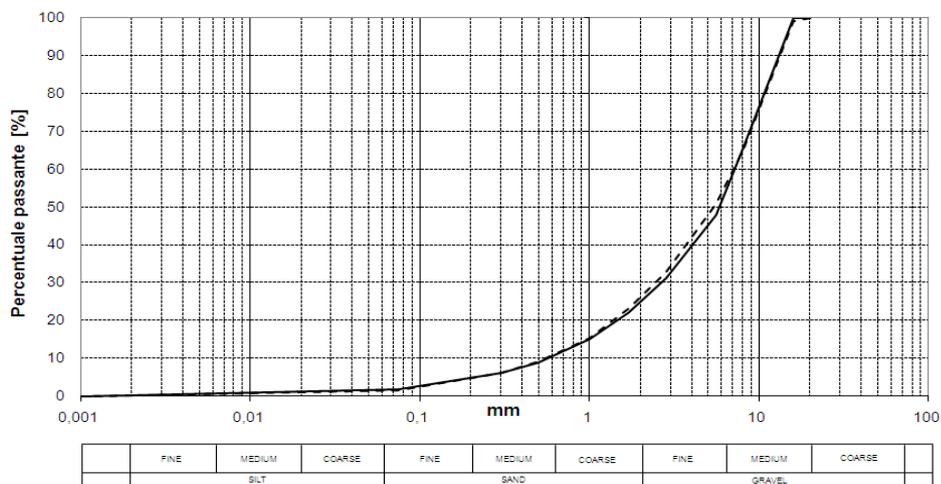


Gráfico 2.2 – Curves granulometriche della formazione degli argilloscisti dopo la frantumazione.

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

3.1 Generatore di schiuma adottato

Il generatore di schiuma utilizzato presso Centro di Ricerca e Laboratorio per le Gallerie e lo Spazio Sotterraneo (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).

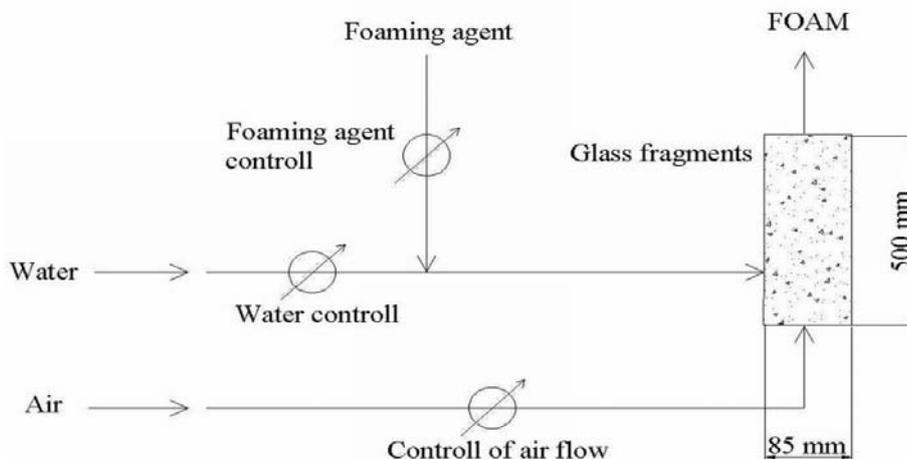


Figura 3.2 – Schema logico di generazione della schiuma.



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.

L'agente schiumogeno utilizzato nel corso della ricerca è stato fornito dal produttore.

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%.

Non essendo note in maniera univoca le condizioni di umidità del materiale abbattuto da condizionare, le prove di slump sono state eseguite con tassi di espansione (FER) variabili, con valori compresi tra 10 e 15, aggiungendo ai diversi materiali una quantità d'acqua, oltre quella naturale, compresa tra lo 0% e il 10% per entrambi i materiali sottoposti a prova.



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 (t₅₀)

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 viene riportato il risultato dei test di semivita effettuati sull’agente schiumogeno utilizzato.

Tabella 3.1 – Tempo di semivita ottenuto per la schiuma utilizzata a differenti valori di FER.

	FER			
	≈7	≈10	≈13	≈17
Agente schiumogeno A	124s	143s	225s	340s

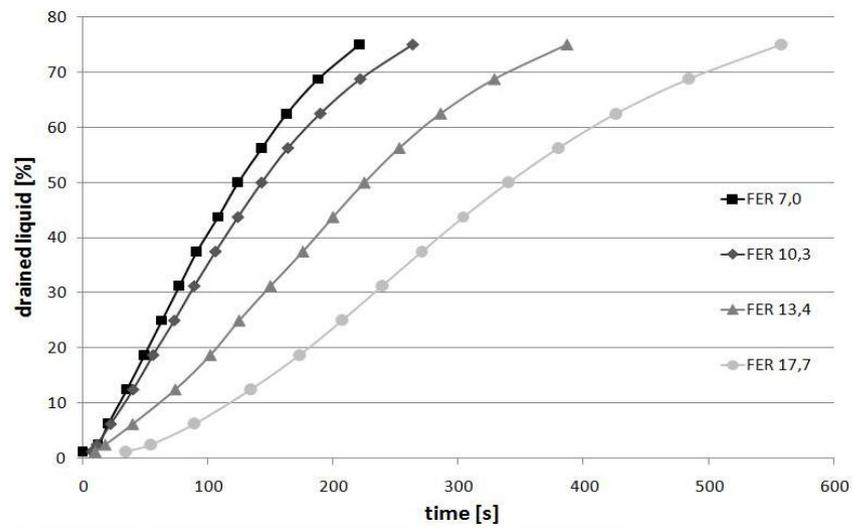


Grafico 3.1 - Tempo di semivita dell’agente schiumogeno A con concentrazione 2%.

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.

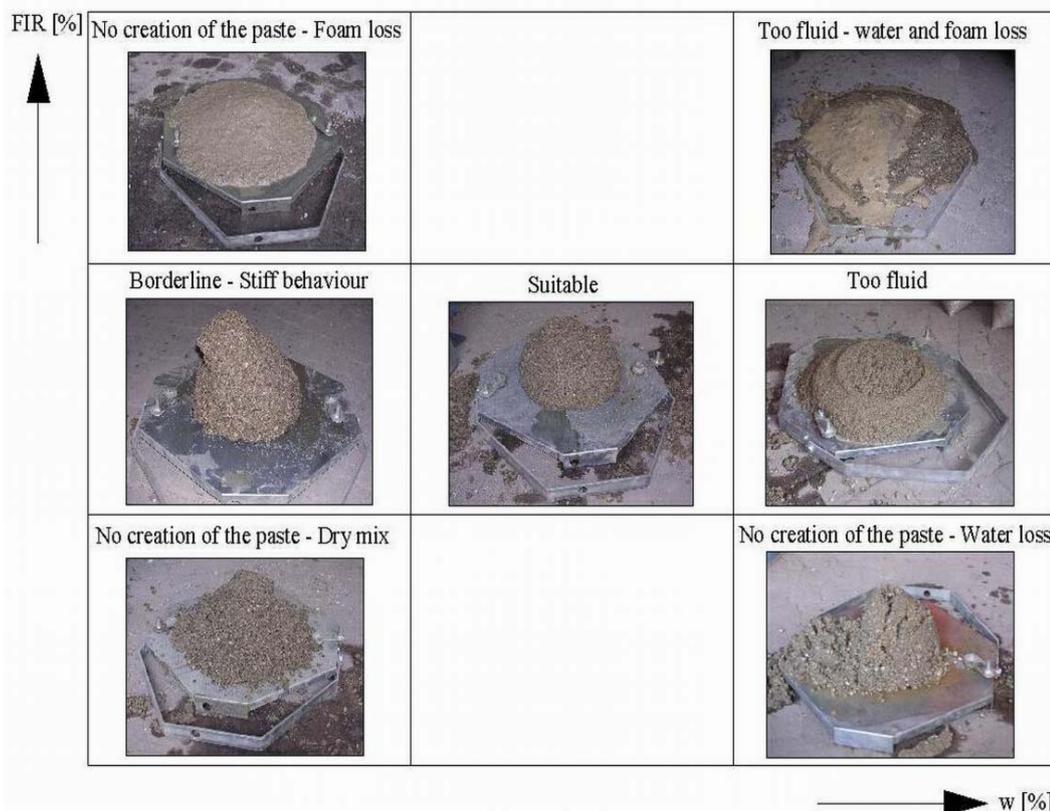


Figura 4.1 – Tabella comparativa per la definizione del comportamento del terreno condizionato utilizzando le prove di slump.

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

4.3.1. Prove di slump effettuate sulla formazione dei calcescisti

I risultati delle prove di slump nel seguito riportati, si riferiscono ai test effettuati sui calcescisti utilizzando l’agente schiumogeno indicato mentre sono state fatti variare i parametri relativi all’acqua aggiunta, 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 le prove di slump realizzate dopo 30’ al fine di indagare, in prima istanza, i possibili effetti del tempo sulla stabilità del mix terreno-schiuma.

Il peso specifico del materiale sciolto è di 1,50 kg/dm³.

Tabella 4.1 - Risultati delle prove di slump sui calcescisti.

Acqua aggiunt a [%]	Acqua aggiunta [l/m ³]	FER	FIR	Additivo aggiunto [l/m ³]	Slump	Commenti	Foto
0	0	..	..	..	..	Il materiale risulta del tutto incoerente	
5	75	15	40	0,53	17 cm	Discreta pastosità del materiale condizionato, materiale un po’ asciutto	
5	75	15	60	0,8	20 cm	Buona pastosità del materiale condizionato, si nota un eccesso di schiuma	

10	150	15	40	0,53	19 cm	Condizionamento discreto a causa di una eccessiva fluidità del materiale. Si nota un eccesso di acqua e schiuma	
10	150	15	20	0,27	19 cm	Condizionamento discreto a causa di una eccessiva fluidità del materiale.	
5	75	15	50	0,67	18 cm	Buon condizionamento del materiale, si nota un leggero eccesso di schiuma	
0	0	15	60	0,8	16 cm	Materiale non condizionato, carenza di acqua e schiuma.	

0	0	15	80	1,07	17 cm	Discreta pastosità del materiale condizionato, materiale un po' asciutto	
5	75	10	50	1	19 cm	Buon condizionamento del materiale, si nota un eccesso di schiuma	
5	75	10	30	0,6	18 cm	Buon condizionamento del materiale, si nota un leggero eccesso di schiuma	

Tabella 4.2 - Risultati delle prove di slump sui Calcescisti. Test sull’influenza del tempo.

Acqua aggiunta [%]	Acqua aggiunta [l/m ³]	FER	FIR	Additivo aggiunto [l/m ³]	Slump	Commenti	Foto
5	75	15	60	0,8	12 cm	Materiale mantenuto nel cono 30'. Materiale non molto pastoso, bolle grandi e poco resistenti. Caduta del solo materiale esterno	

10	150	15	40	0,53	12 cm	<p>Materiale mantenuto nel cono 30'.</p> <p>Materiale simile a prova precedente, più fluido a causa dell’elevato quantitativo di acqua aggiunta</p>	
10	150	15	20	0,27	20 cm	<p>Materiale mantenuto in cono 30'.</p> <p>Materiale non troppo pastoso e piuttosto asciutto, bolle di grandi dimensioni. Il materiale ha drenato acqua durante il riposo nel cono.</p>	
5	75	15	50	0,67	10 cm	<p>Materiale mantenuto in cono 2 ore. Il materiale non presenta pastosità, ma risulta comunque umido e sono ancora presenti bolle.</p>	
5	75	10	30	0,6	16 cm	<p>Materiale mantenuto in cono 30'.</p> <p>Comportamento ancora pastoso, bolle di grandi dimensioni. Acqua drenata durante il riposo in cono</p>	

5	75	10	50	1	15 cm	<p>Materiale mantenuto in cono 30’.</p> <p>Comportamento ancora pastoso, ma peggiore di prova precedente, bolle di grandi dimensioni.</p> <p>Acqua drenata durante il riposo in cono</p>	
---	----	----	----	---	-------	--	---

4.3.2. Conclusioni sulle prove di slump realizzate sulla formazione dei calcescisti.

Dall’analisi dei risultati delle prove di slump effettuate sulla formazione dei calcescisti 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 attestarsi intorno 5% quando non già presente nell’ammasso, superando questa percentuale 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, ma questo diventa molto fluido;
- 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 50%: 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 cono di slump, 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. Quest’ultimo valore è in ottimo accordo con i risultati già ottenuti per la formazione calcarea del “Monte Morello” nell’ottica di garantire l’estraibilità del materiale mediante coclea. Si considera opportuno il dosaggio da usare nelle prove chimiche di cessione vengano eseguite con una combinazione di parametri di condizionamento da definirsi dopo le prove di estrazione.

Di seguito è presentato il grafico riassuntivo delle prove realizzate.

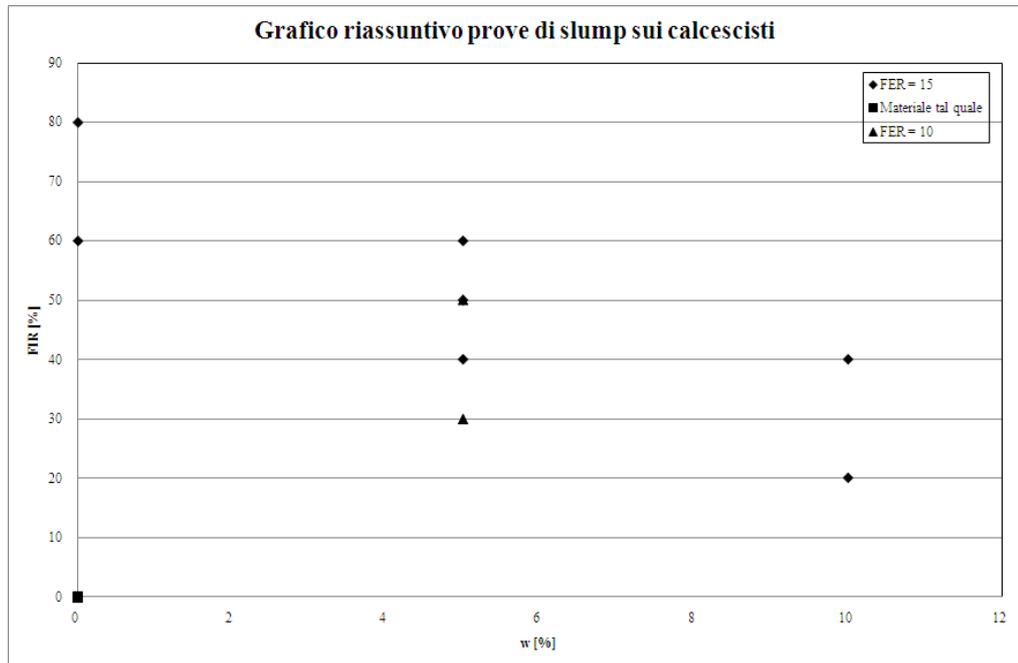


Grafico 4.1 – Quadro riassuntivo slump effettuati a t_0 sulla formazione dei calcescisti.

4.3.3. Prove di slump effettuate sulla formazione degli argillocscisti

I risultati delle prove di slump nel seguito riportati, si riferiscono ai test effettuati sulla formazione degli argillocscisti utilizzando l’agente schiumogeno indicato. Al contrario sono state fatti variare i parametri relativi all’acqua aggiunta, 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 sulla stabilità del mix terreno-schiuma.

Tabella 4.3 – Risultati delle prove di slump sugli argilloscisti

Acqua aggiunt a [%]	Acqua aggiunta [l/m ³]	FER	FIR	Additivo aggiunto [l/m ³]	Slump	Commenti	Foto
0	0	..	..	..	..	Il materiale risulta del tutto incoerente	
5	75	15	50	0,67	14 cm	Buon condizionamento del materiale, materiale un po' asciutto e rigido, condizionamento minimo accettabile	
5	75	15	70	0,93	19 cm	Buona pastosità del materiale condizionato, si nota un leggero eccesso di schiuma	
10	150	15	50	0,67	20 cm	Materiale pastoso ma con condizionamento eccessivo. Si nota un eccesso di schiuma, materiale troppo fluido	

10	150	15	30	0,4	18 cm	Buon condizionamento. Buona fluidità del materiale senza eccessi di schiuma o acqua	
5	75	15	60	0,8	18 cm	Condizionamento decisamente buono, si nota un leggerissimo eccesso di schiuma, Buona consistenza e pastosità. Risultato ottimale	
5	75	10	40	0,8	20 cm	Buon condizionamento del materiale che risulta pastoso senza eccessi di schiuma o acqua. Risultato ottimale	
5	75	10	60	1,2	20 cm	Buon condizionamento ma si nota un eccesso di schiuma	
10	150	10	30	0,6	20 cm	Buon condizionamento del materiale, leggermente più fluido rispetto ad un risultato ottimale, ma comunque accettabile	

Tabella 4.4 – Risultati delle prove di slump sulla formazione degli argilloscisti. Test sull’influenza del tempo.

Acqua aggiunta [%]	Acqua aggiunta [L/m ³]	FER	FIR	Additivo aggiunto [L/m ³]	Slump	Commenti	Foto
5	75	15	50	0,67	14 cm	Materiale mantenuto nel cono 30'. Non ci sono più bolle visibili, materiale asciutto.	
5	75	15	70	0,93	19 cm	Materiale mantenuto nel cono 30'. Buon comportamento pastoso, bolle grosse ma ancora presenti. Buono slump.	
10	150	15	30	0,4	14 cm	Materiale mantenuto in cono 30'. Materiale non troppo pastoso e piuttosto asciutto, bolle di grandi dimensioni. Il materiale ha drenato acqua durante il riposo nel cono.	
5	75	15	60	0,8	18 cm	Materiale mantenuto in cono 30'. Materiale un po' rigido ma accettabile. Bolle di grandi dimensioni ma ancora presenti. Il materiale ha drenato acqua durante il riposo nel cono.	

5	75	10	40	0,8	16 cm	Materiale mantenuto in cono 30°. Bolle di grandi dimensioni, comportamento non molto pastoso ma accettabile	
5	75	10	60	1,2	19 cm	Materiale mantenuto in cono 30°. Bolle di grandi dimensioni e comportamento ancora buono	
5	75	10	30	0,6	17 cm	Materiale mantenuto in cono 30°. Bolle di grandi dimensioni e comportamento non molto pastoso. Il materiale presenta comunque la giusta umidità	

4.3.4 Conclusioni sulle prove di slump realizzate sugli argilloscisti.

Dall’analisi dei risultati delle prove di slump effettuate sugli argilloscisti 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 attestarsi tra il 5% ed il 10 %, superando questa percentuale 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, ma il materiale diventa molto fluido. Questa condizione potrebbe dare problemi nella gestione delle

operazioni di smarino con nastro trasportatore, ma non da problemi nel controllo della pressione;

- la percentuale di schiuma, con FER=15 (ritenuto un valore ragionevolmente idoneo), da introdurre nel terreno per ottenere un discreto comportamento del mix subito dopo il condizionamento è di circa il 60%. Per valori superiori il materiale inizia a presenta una eccessiva fluidità;
- fattori quali tempo e temperatura suggeriscono di incrementare nella macchina la quantità di schiuma, in quanto dopo 30 minuti di permanenza nel cono di slump, 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. Questo risultato è in buon accordo con i risultati ottenuti per i calcescisti e per i calcari della formazione del Monte Morello in relazione alla possibilità di estrazione mediante coclea da camera in pressione.

In conclusione si ritiene che le prove chimiche di cessione vengano eseguite con i seguenti dosaggi di condizionamento:

FER = 15, FIR = 80%, w = 5% e FER = 10, FIR = 40%, w = 5%.

Di seguito è presentato il grafico riassuntivo delle prove realizzate.

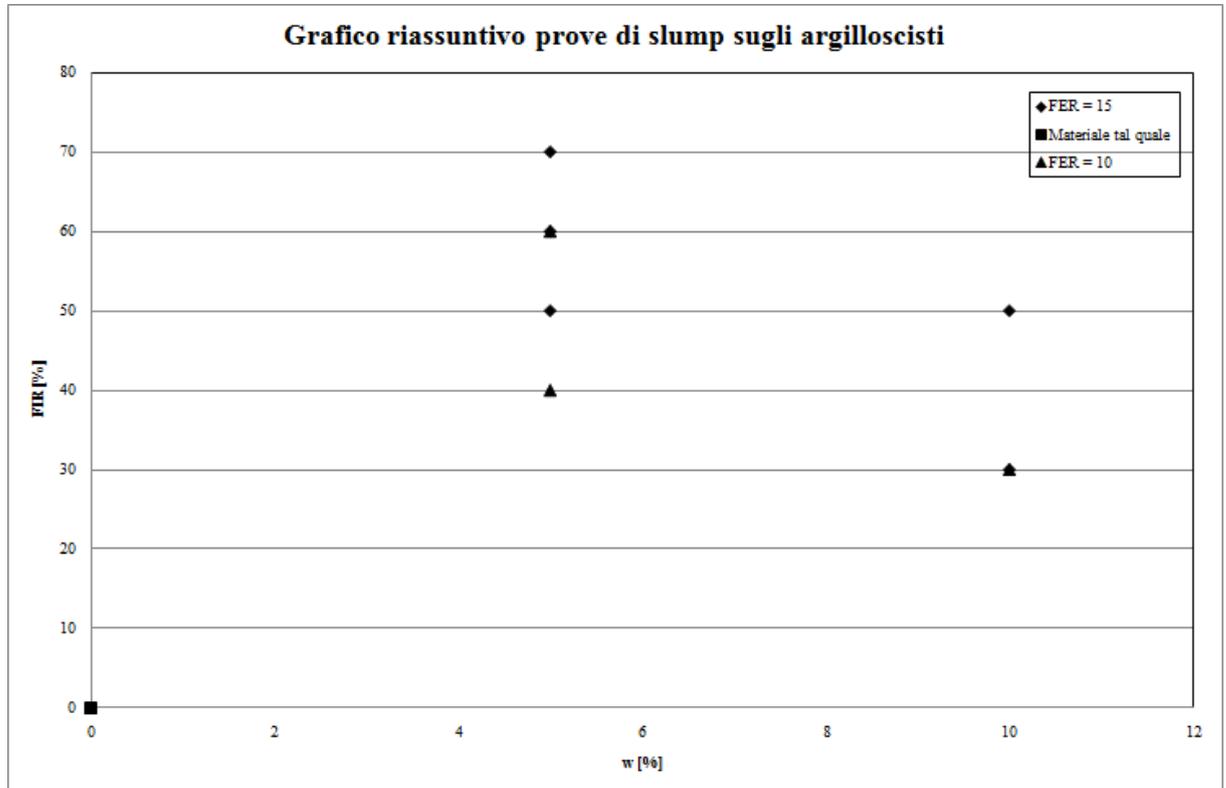


Grafico 4.2 – Quadro riassuntivo slump effettuati a t₀ sulla formazione degli argilloscisti.



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 – Centro di Ricerca e Laboratorio per le Gallerie e lo Spazio Sotterraneo 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.

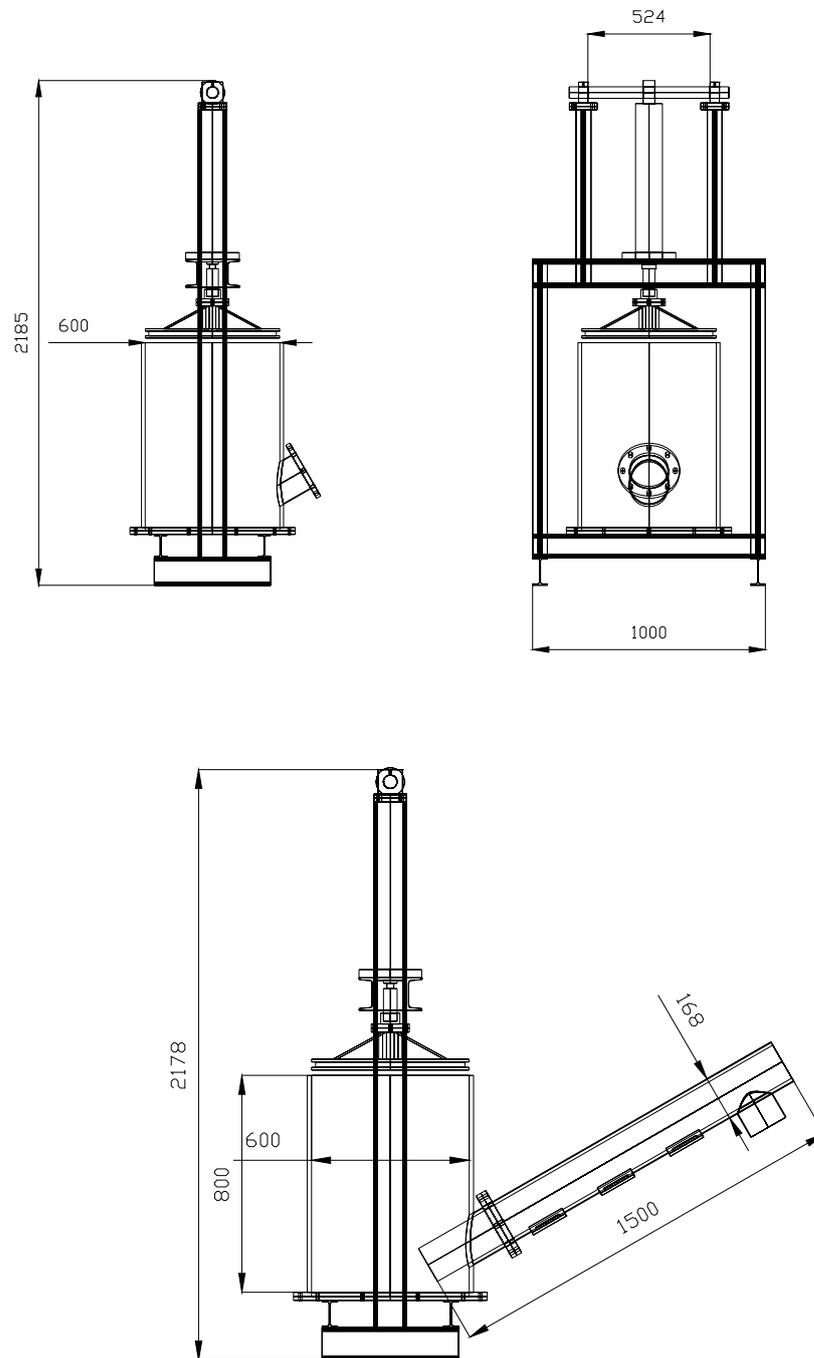


Figura 5.1 - Schema e principali dimensioni dell'apparato sperimentale di estrazione con coclea.



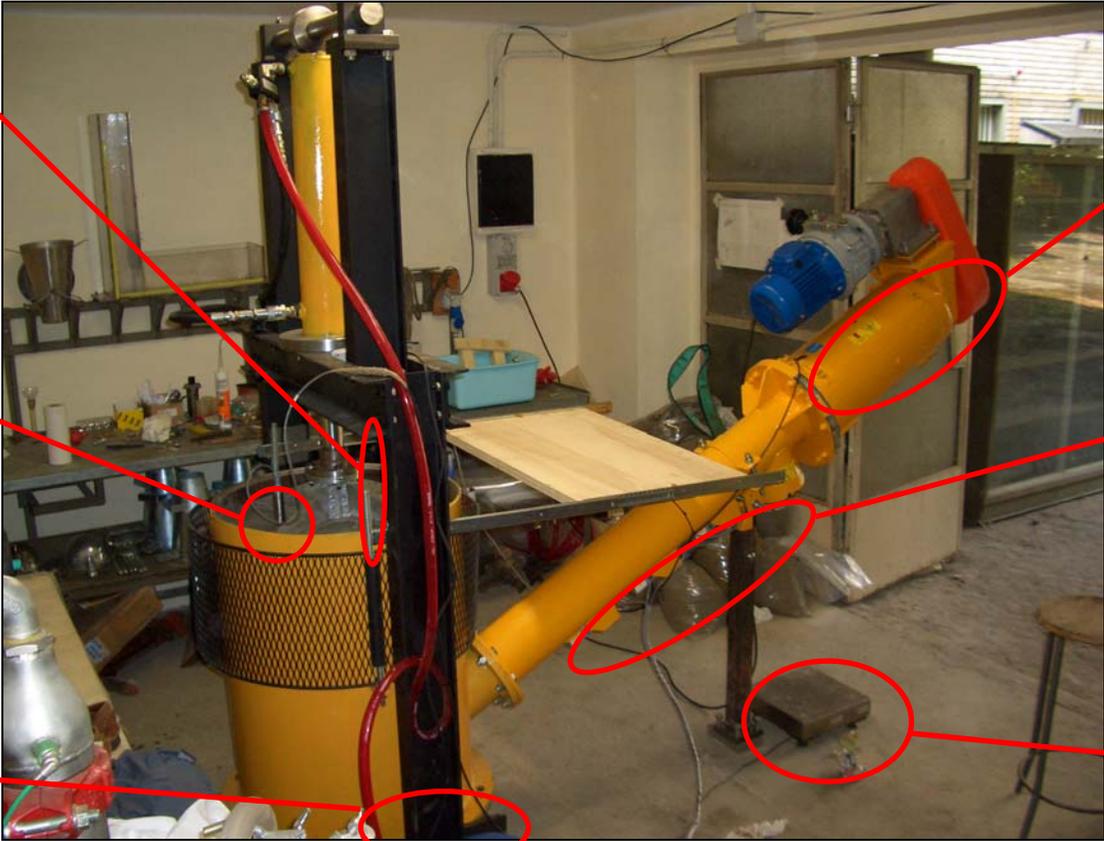
Sensore di posizione



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.



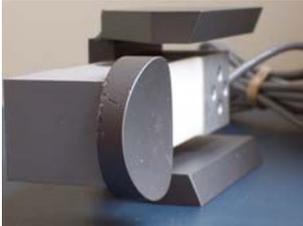
Strumenti	Foto	Quantità	Dimensioni	Tipo	Range
Unità acquisizione dati		1	N.A.	HBM Spider 8 8 canali tecnologia in frequenza di portante a 600 HZ Alim. trasduttori 2,5V Software di gestione HBM Catman Easy	N.A.
Celle di pressione	 	2	Φ 112 mm	Cella di pressione con cuscino di liquido deareato e trasduttore 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.

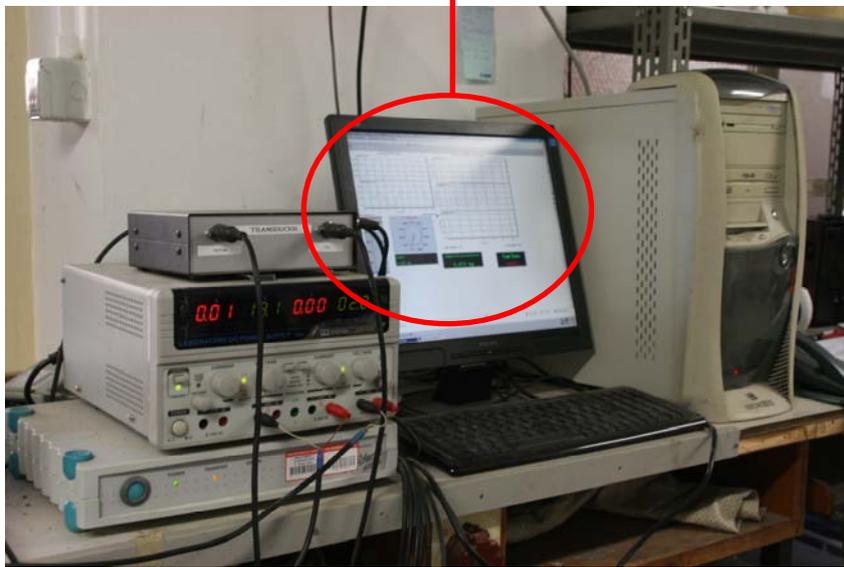
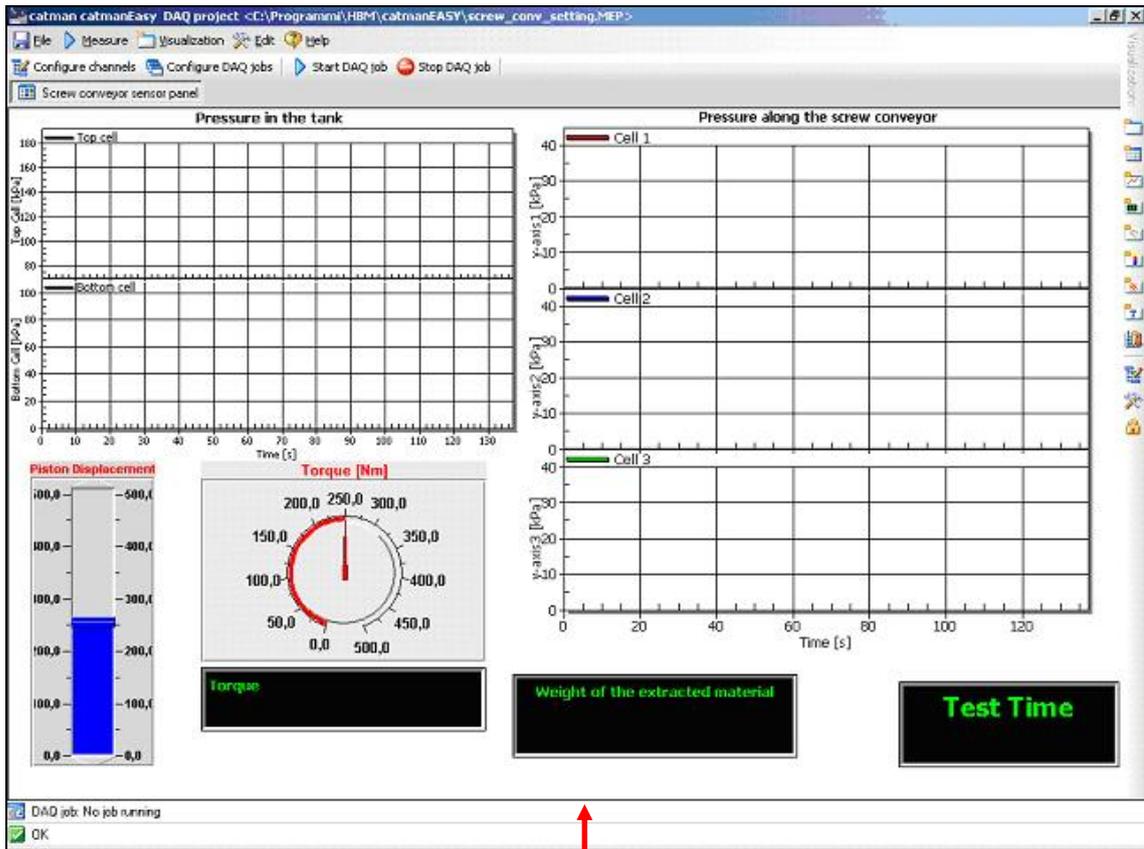
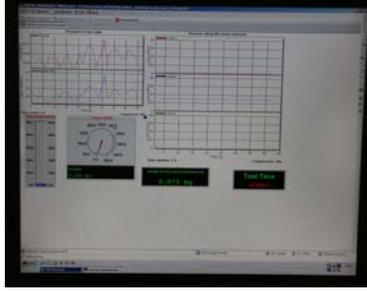


Figura 5.3 - Layout del pannello di controllo virtuale per la gestione dei sensori installati.

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>	

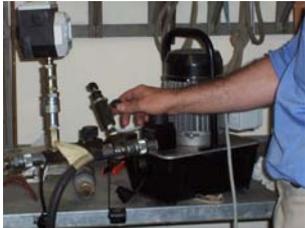
Fasi di prova	Fotografia
Attraverso la centralina oleodinamica si attiva il movimento del pistone finché non si raggiunge all’interno del serbatoio la pressione desiderata	
Si avvia la coclea di estrazione e contemporaneamente si mantiene la pressione all’interno del pistone al valore desiderato	
Il 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 5.1).

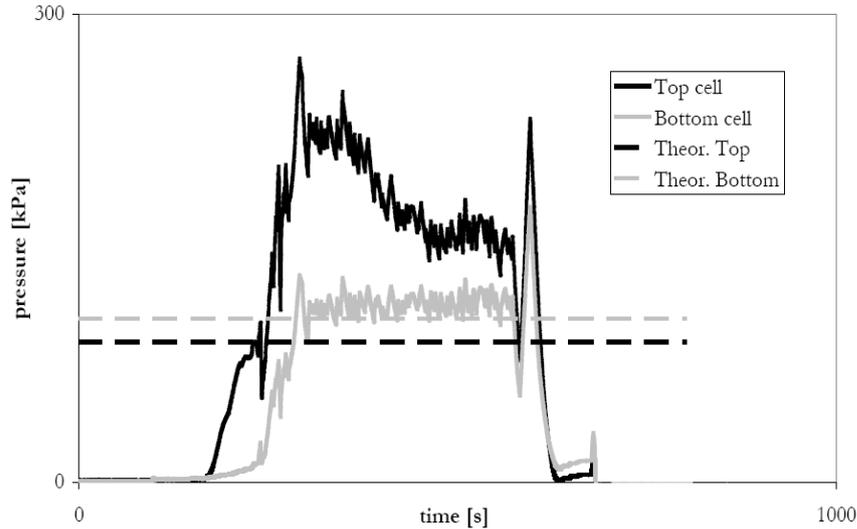


Grafico 5.1 - Andamento delle pressioni all'interno del serbatoio per la prova S3 – campione saturo.

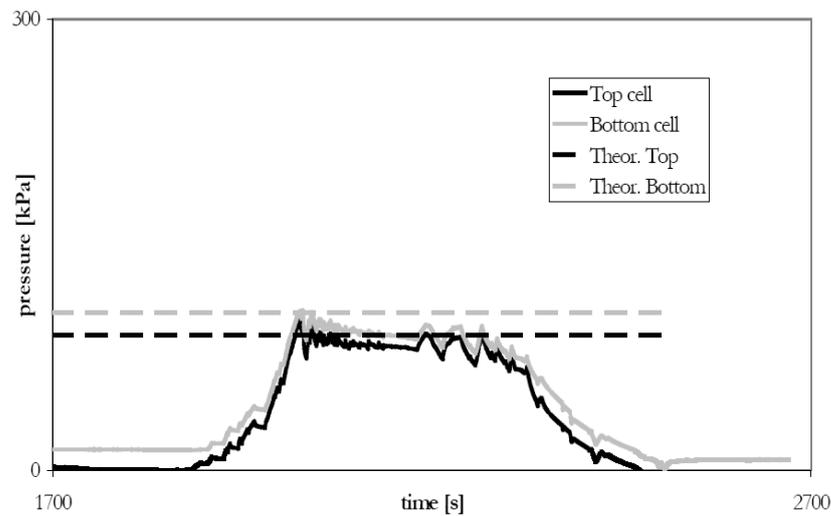


Grafico 5.2 - Andamento delle pressioni all'interno del serbatoio per la prova C2 – campione condizionato.

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 saturo 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.

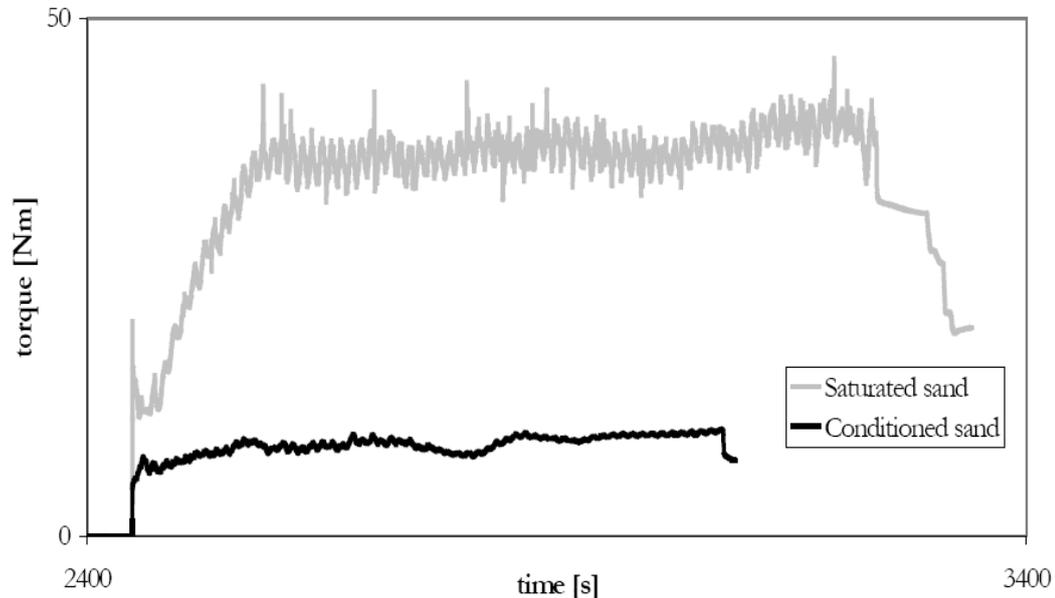


Grafico 5.3 - Andamento dei valori di coppia torcente della coclea per la prova S3 – campione saturo e per la prova C1 – campione condizionato.

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)

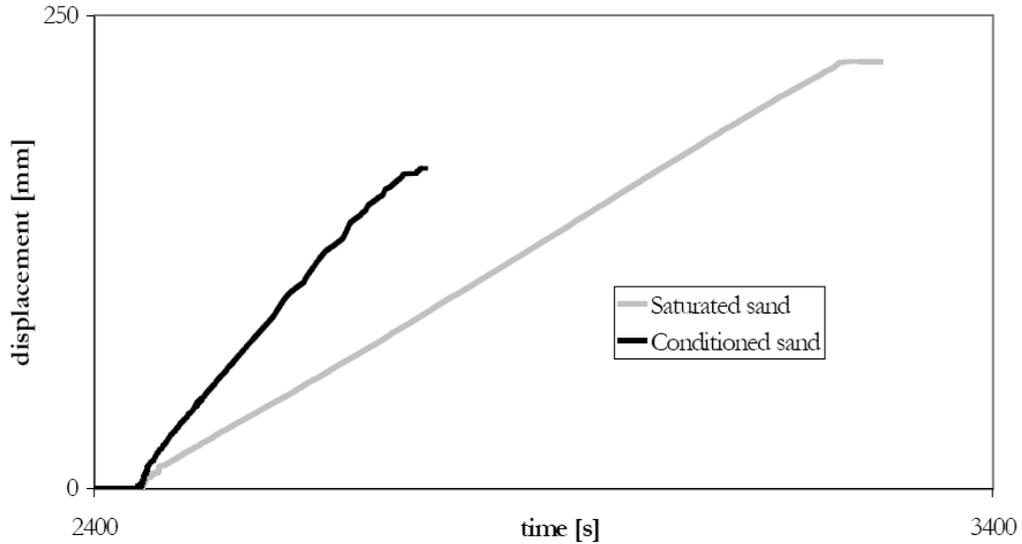


Grafico 5.4 - Spostamento del piattello di carico per la prova S3 – campione saturo e per la prova C2 – campione condizionato.

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 satura (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 satura 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 satura: $\rho = 1,78 \text{ kg/dm}^3$

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

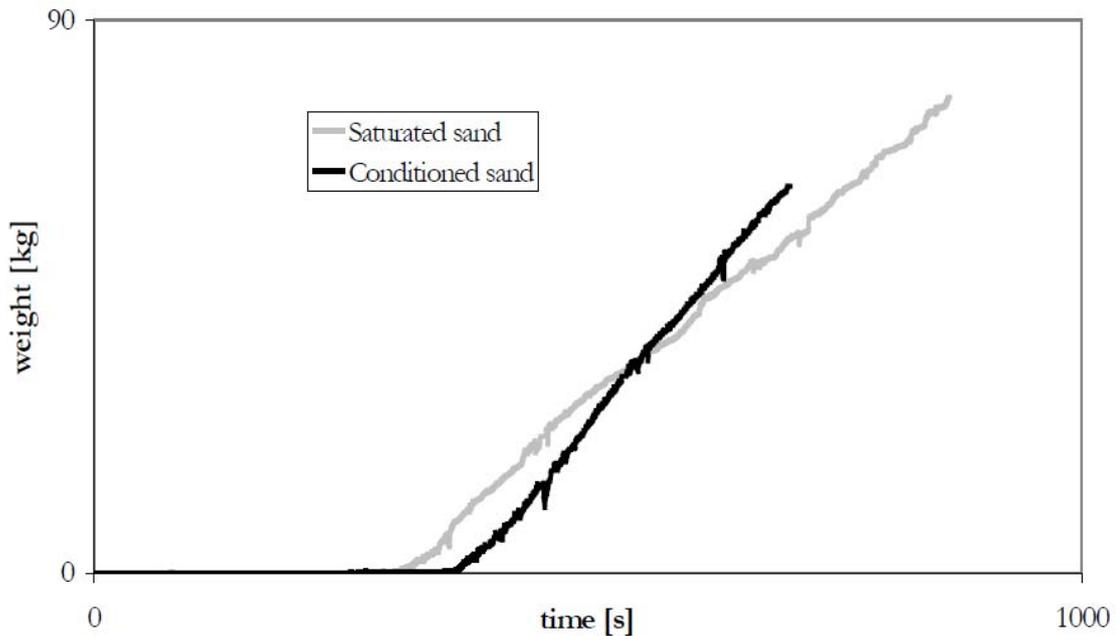


Grafico 5.5 - Peso del materiale estratto per la prova S3 – campione saturo, e per la prova C2 – campione condizionato.

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 satura 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 satura.

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 satura e la variazione della pressione in un lasso di 60 secondi ha una migliore uniformità.

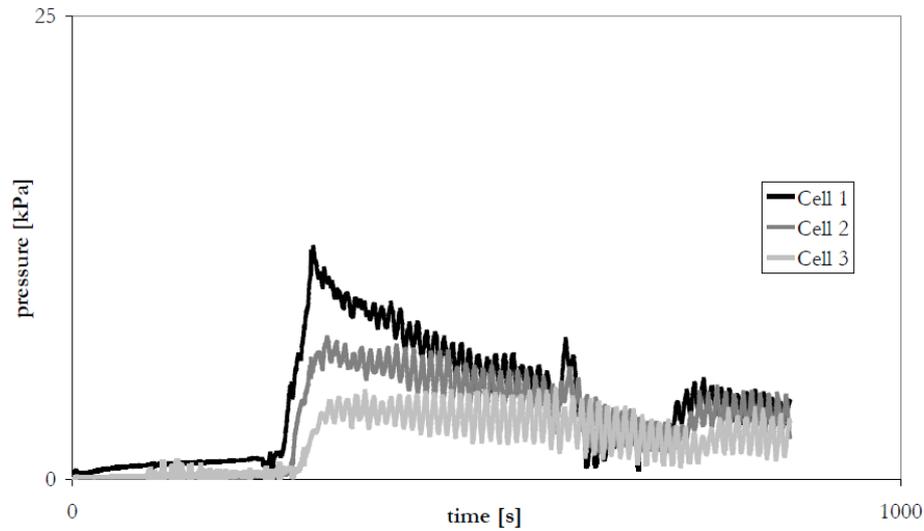


Grafico 5.6 - Pressioni lungo la coclea durante la prova S2 – campione saturo. Le celle sono numerate seguendo la direzione di estrazione: la cella 1 è la più vicina al serbatoio, la cella 3 è la più vicina al punto di sbocco del materiale.

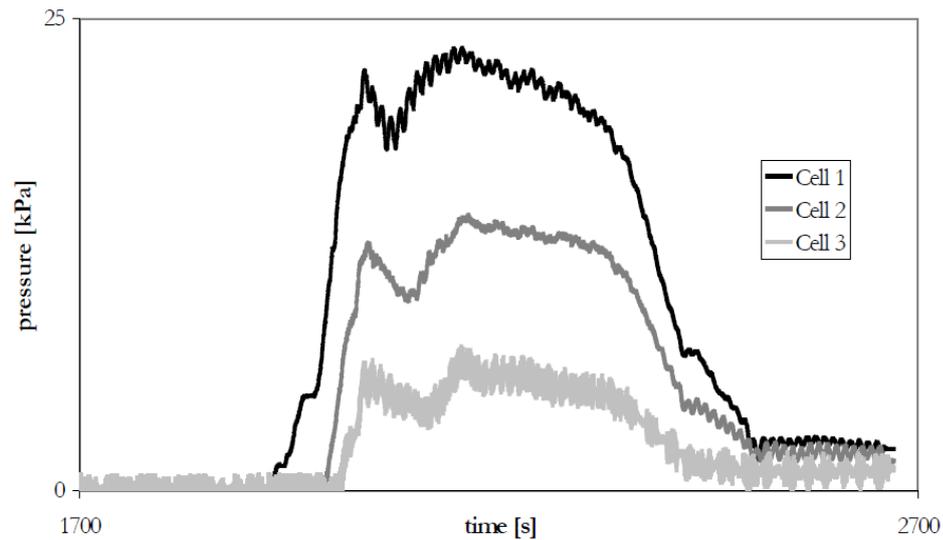


Grafico 5.7 - Pressioni lungo la coclea durante la prova C2 – campione condizionato.

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 dei Calcescisti

5.3.1 Parametri di condizionamento utilizzati per le prove di estrazione sulla formazione dei calcescisti (CLS).

Per quel che riguarda la prima delle due prove (CLS-A), 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 un buon condizionamento ad un tempo t_{30min} calcolato a partire dal momento di aggiunta della schiuma nel terreno.

Per la prova 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 5% in peso. Questo valore è stato definito sulla base e di accordo con quanto determinato ed accertato in sede di campagna di prove di slump.

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

Il tasso di iniezione FIR è stato del 70% con una concentrazione di agente schiumogeno del 2%. I valori qui riportati sono stati concordati anche con i tecnici della casa produttrice dell'agente schiumogeno.

Per la seconda prova è stato scelto un set di parametri di condizionamento che desse un mix più fluido, poiché, come si vedrà in seguito, il primo test ha dato risultati non ottimali. Con l'obiettivo di ottenere un mix più fluido l'acqua aggiunta al materiale è stata aumentata dal 5% al 7%. Il tasso di iniezione della schiuma FIR è stato del 75%.

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

Tabella 5.5 - Parametri di condizionamento delle prove di estrazione sulla formazione dei calcescisti

Prova	P_{terreno}	w_{agg}	w_{agg}	c	FER	FIR	Q_{additivo_agg}
-	[kg]	[%]	[l/m ³]	[%]	[-]	[%]	[l/m ³]
CLS-A	320	5	75	2	15	70	0,933
CLS-B	320	7	105	2	15	75	1,000

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 Prova CLS-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 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, è stato interrotto a circa 250 s dall’inizio della prova a causa di un disagio verificatosi durante la prova, del quale verrà discusso in seguito.



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

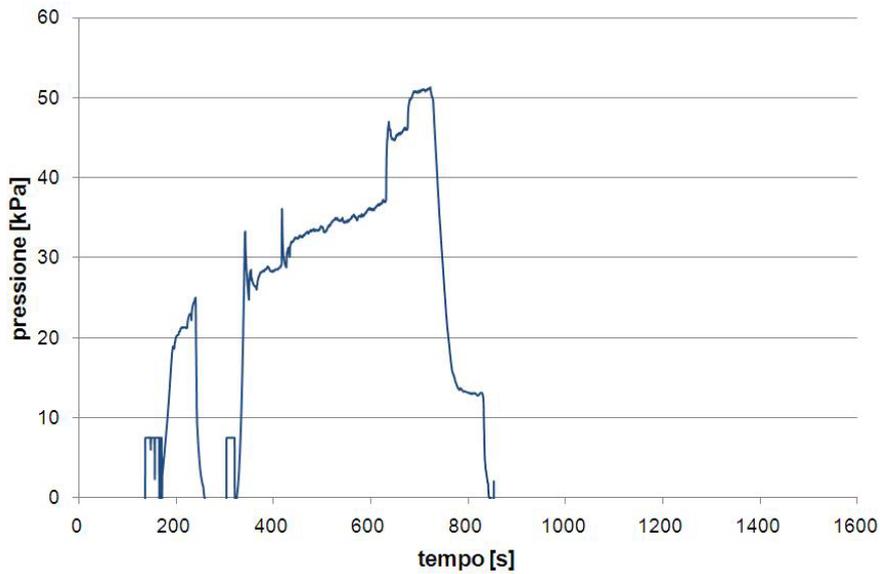


Grafico 5.8 - Andamento delle pressioni registrate dalla cella superiore nel serbatoio durante la prova CLS-A

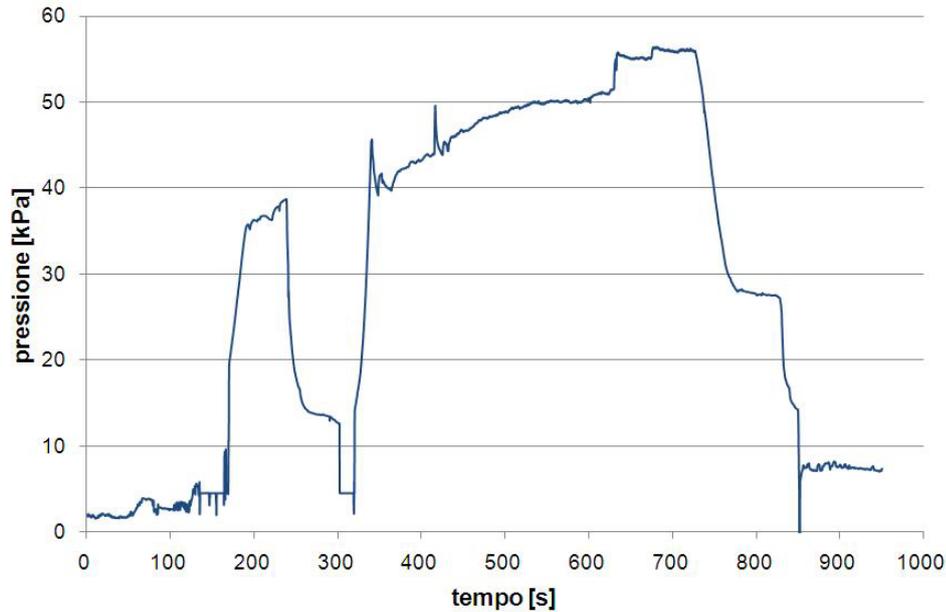


Grafico 5.9 - Andamento delle pressioni registrate dalla cella inferiore nel serbatoio durante la prova CLS-A

Osservando i grafici relativi alle pressioni registrate dalla cella superiore e da quella inferiore della camera in pressione si può notare come, mentre nella cella superiore l'incremento della pressione, dopo un picco iniziale, ha un andamento pendente, e quindi con incrementi maggiormente rilevabili man mano che il materiale viene caricato, nella cella inferiore dopo il picco iniziale, l'andamento sia evidentemente meno pendente e quindi con incrementi che vengono percepiti in maniera meno visibile.

Questa evidenza è da considerarsi segnale di un materiale eccessivamente rigido, e quindi non sufficientemente fluido e pastoso da permettere una corretta trasmissione della pressione.

Coppia della coclea

La coppia richiesta alla coclea per l'estrazione del terreno condizionato parte da un valore di circa 2 Nm per poi aumentare rapidamente nel momento in cui è iniziata l'applicazione della pressione, fino a raggiungere valori estremamente elevati (oltre 700 Nm), fenomeno questo dovuto alle difficoltà di estrazione del materiale durante la prova. Questi altissimi livelli di coppia hanno portato, a 250 s circa dall'inizio della prova all'attivazione di un giunto di sicurezza che ha scollegato la coclea dalla trasmissione del motore elettrico che la alimenta. Questo è il fenomeno che ha portato ad una momentanea interruzione nell'applicazione della pressione, come chiaramente visibile nei grafici relativi alle celle di pressione superiore ed inferiore.

Il motivo di questi elevati valori di coppia è da imputarsi ad un materiale che, durante la fase di caricamento, dalla durata di circa 30 minuti, si sia asciugato e compattato. La coclea ha così iniziato immediatamente ad estrarre un materiale che, a metà del suo percorso attraverso l'estrattore, risultava troppo asciutto e compatto per poter essere estratto, ed ha iniziato ad accumularsi in un punto della coclea molto prossimo alla cella 2, presente lungo l'estrattore.

I picchi di valore di minore entità che conferiscono alla curva riportata un andamento “frastagliato” 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.

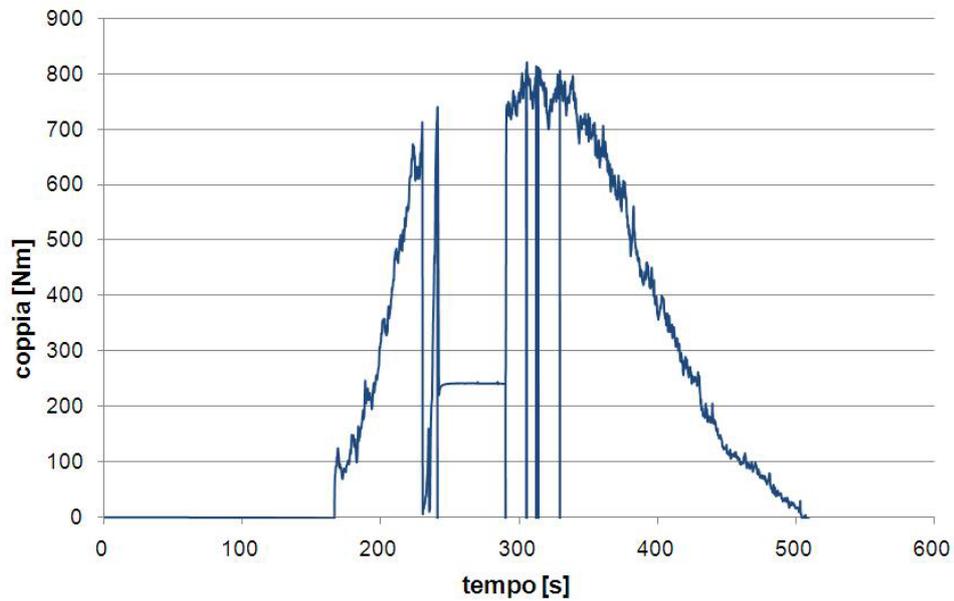


Grafico 5.10 - Coppia assorbita dalla vite della coclea durante la prova CLS-A

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) il piattello si abbassa con un gradiente di avanzamento pari a 0,038 mm/s.

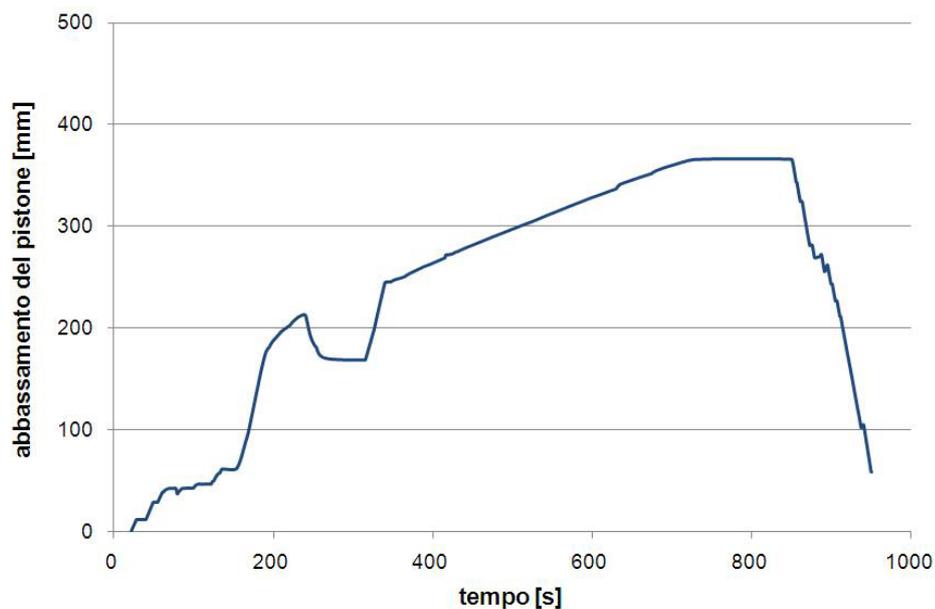


Grafico 5.11 - Spostamento del piattello di carico durante la prova CLS-A

Peso del materiale estratto

Il grafico 12 indica come l'estrazione del materiale dalla coclea sia stata piuttosto efficiente nonostante le problematiche riscontrate durante la prova, a conferma delle difficoltà di estrazione dei calcescisti con i parametri di condizionamento utilizzati per la prova si può notare dal già citato fermo a circa 250 s dall'inizio della prova.

Il δ peso medio di tutta la prova è pari a 0,092 kg/s

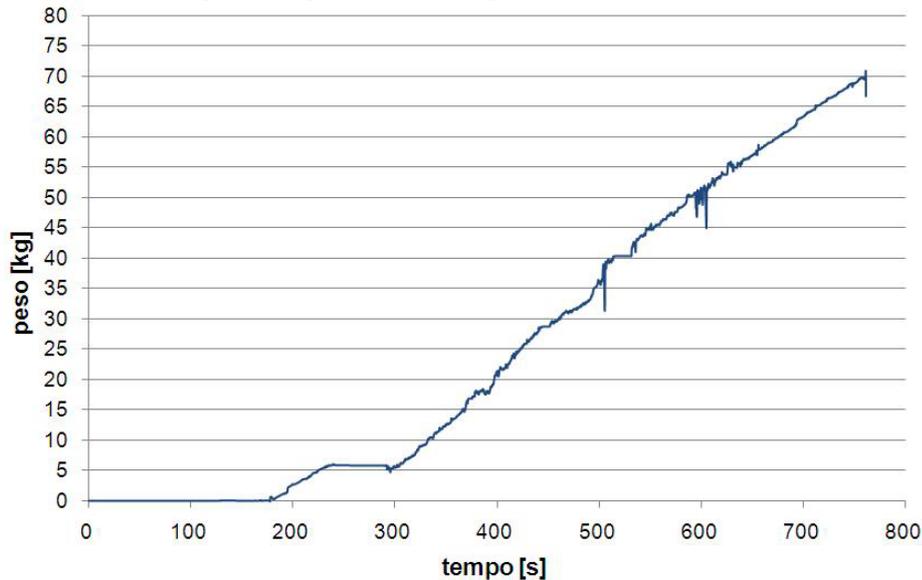


Grafico 5.12 - Peso del terreno estratto durante la prova CLS-A

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 riempimento della coclea, ma uno riempimento iniziale che ha però portato ad un accumulo di materiale all'incirca in corrispondenza della cella 2. Questo fenomeno è evidenziato da un tratto di riempimento della coclea pressoché simile a quanto atteso. Poco prima della rottura del giunto di sicurezza si può però notare che la pressione registrata dalla cella due supera quella registrata dalla cella 1, fatto che, in condizioni normali, non dovrebbe verificarsi. Dopo la riduzione della pressione in camera e la successiva ripresa della prova, si può notare come l'anomalia si vada gradualmente spostando tra la cella 2 e la cella 3, con un superamento della pressione registrata dalla cella 2 da parte di quella registrata dalla cella 3 a circa 400 s dall'inizio della prova. Quindi è come se il "tappo" formatosi inizialmente si sia spostato dopo la riduzione della pressione in camera andando a svuotare gradualmente la coclea.

Si può anche notare come, una volta che questa anomalia non interessava più le prime due celle, la pressione sia andata notevolmente abbassandosi nelle celle 1 e 2 (ma con la cella 1 che ha registrato valori superiori alla cella 2), a causa di un limitato pescaggio della coclea all'interno della camera in pressione dovuto alla formazione di una cavità autostabile in

prossimità dell'imbocco della coclea. Questo fatto è l'ennesima conferma della presenza all'interno della camera in pressione di un materiale poco fluido ed eccessivamente rigido.

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.

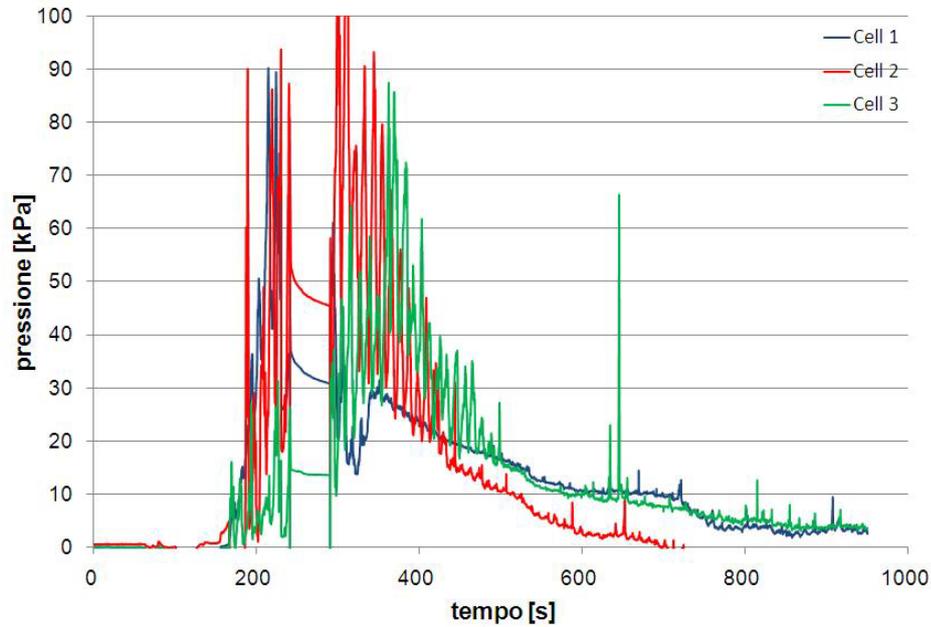


Grafico 5.13 - Andamento delle pressioni lungo coclea durante la prova CLS-A

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 prova di estrazione mediante coclea sono state eseguite alcune prove di slump, finalizzate a valutare le condizioni di plasticità del materiale estratto dopo l’ estrazione attraverso la coclea.

La tabella 5.6 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 Dopo l’ estrazione	17	
#2 Dopo l’ estrazione	18	
#3 Dopo l’ estrazione	16	

<p>#4 Dopo l'estrazione</p>	
<p>#5 Dopo l'estrazione</p>	

Tabella 5.6 - Risultati ottenuti dalle prove di abbassamento al cono di slump - Prova CLS-A

5.3.3 Commenti finali della prima prova di estrazione (CLS-A) effettuata sulla formazione dei calcescisti.

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

Il risultato della prova di estrazione precedentemente descritta, nonostante l’accuratezza con cui è stata portata a termine la campagna di prove di slump, ha dato un risultato non accettabile a causa delle caratteristiche granulometriche del terreno che, prodotto da frantumazione (che comunque realisticamente simula il materiale che esce dalla macchina) si presenta con un’elevata spigolosità dei grani che tendono ad “ingranare” reciprocamente. Inoltre il contenuto di materiale fine del materiale usato nelle prove (come già descritto si intende per fine il materiale passante al setaccio da 1mm) è risultato pari a circa il 19%, leggermente superiore al 12% presente nel materiale usato nelle prove di slump come mostrato nel grafico 5.14.

La sensibilità del sistema a questa variabilità, che comunque potrebbe verificarsi nella realtà, ha suggerito l’esecuzione di una nuova prova (CLS-B) di estrazione nella quale sono stati aumentati i dosaggi relativi a schiuma ed acqua di cui sono stati riportati i risultati.

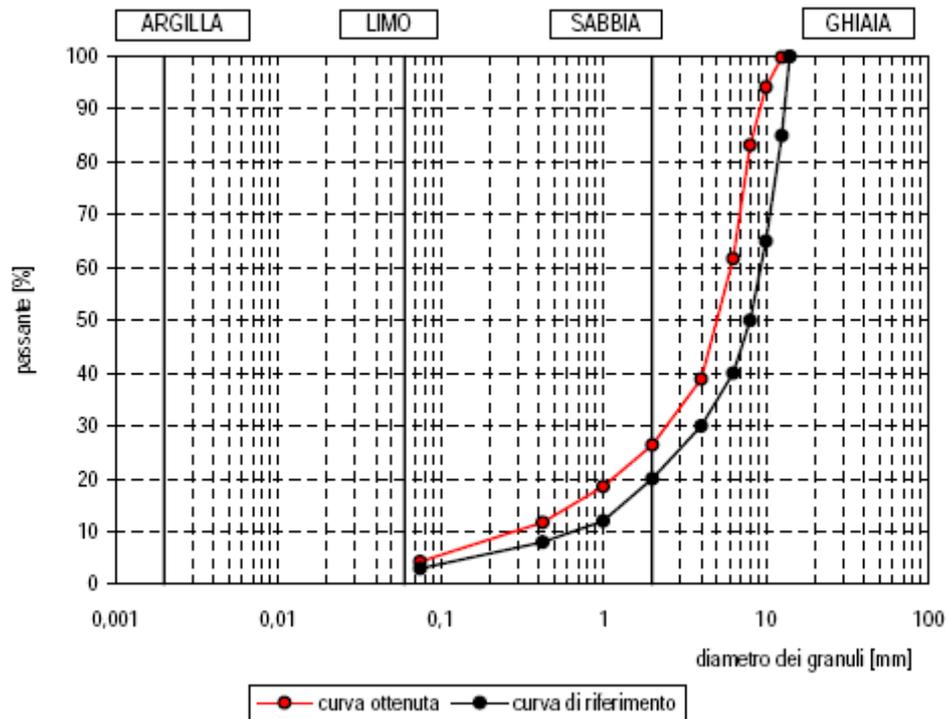


Grafico 5.14 – Confronto tra la curva granulometrica del campione utilizzato per la prova CLS, in rosso, e quello utilizzato per la campagna di prove di slump, in nero.

La differenza tra i campioni utilizzati nelle diverse fasi della ricerca ha portato quindi al risultato che il condizionamento definito durante la prima serie di prove è stato insufficiente per una corretta estrazione del materiale. Come dimostra l'esperienza maturata in anni di ricerca dagli scriventi (Borio L., 2010), la granulometria è un fattore determinante per la definizione di un corretto set di parametri di condizionamento.

Per questo motivo, poiché le operazioni di scavo possono produrre un marino con caratteristiche granulometriche differenti in funzione della spinta applicata alla testa, alle condizioni di usura degli utensili e di quelle che sono le naturali variazioni della massa rocciosa, è da tenere comunque in considerazione il risultato della prova di estrazione descritta. Nell'ottica di completare e rendere più attendibile il lavoro di ricerca sono state effettuate altre prove di caduta al cono di slump, sia per verificare l'effettiva differenza di comportamento tra i due campioni utilizzati, sia per definire un set di parametri di condizionamento che permetta al materiale utilizzato di dare risultati ottimali anche in una prova di estrazione.

I risultati di questa seconda serie di prove di slump sono riportati nella tabella 5.7.

Sulla base di queste prove si ritiene opportuno effettuare la seconda prova di estrazione con $FIR=75\%$, $FER=15$ e $w=7\%$.

Acqua aggiunta [%]	Acqua aggiunta [l/m ³]	FER	FIR	Additivo aggiunto [l/m ³]	Slump	Commenti	Foto
5	75	15	80	1,07	..		
7	105	15	70	0,93	--		
5	75	15	80	1,07	--		
7	150	15	70	0,93	--		

Tabella 5.7 – Prove di slump integrative effettuate sulla formazione dei calcescisti.

5.3.4 Prova CLS-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.

Il tempo di applicazione della pressione è di circa 300s, e precisamente tra il tempo di prova 111s e il tempo di prova 410s.



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

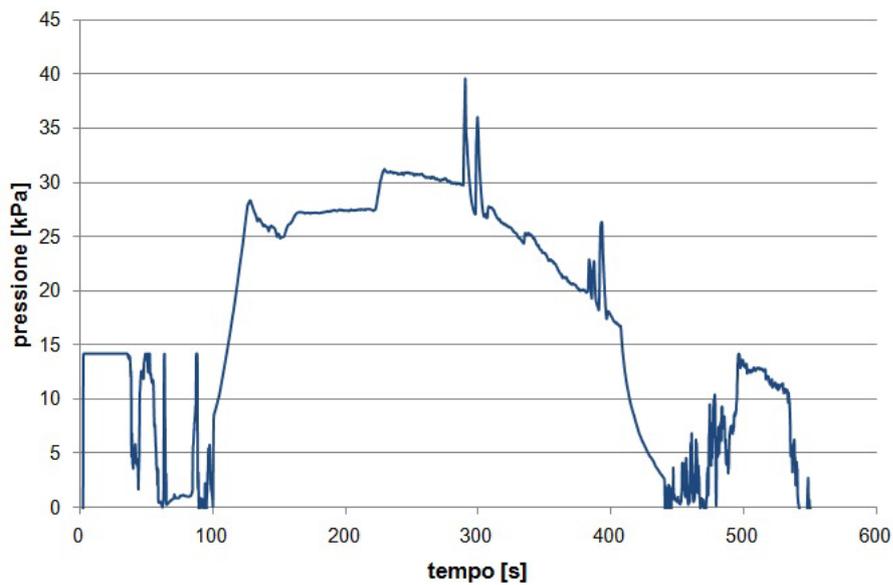


Grafico 5.15 - Andamento delle pressioni registrate dalla cella superiore nel serbatoio durante la prova CLS- B

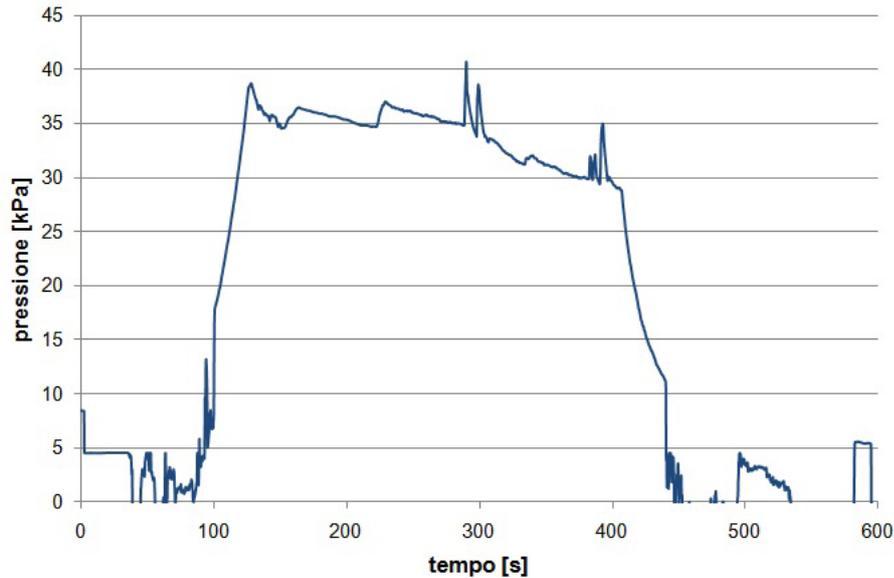


Grafico 5.16 - Andamento delle pressioni registrate dalla cella inferiore nel serbatoio durante la prova CLS-B

Come si può notare dal confronto tra i grafici relativi alle due celle di pressione che attrezzano il serbatoio, la trasmissione della pressione da parte del materiale è decisamente buona, dal momento che, ad ogni variazione della pressione nella parte superiore corrisponde una variazione della pressione sul fondo. Chiaramente le variazioni risultano molto più accentuate nel grafico relativo alla cella superiore a causa dell'inevitabile effetto di smorzamento dato dal terreno condizionato.

Coppia della coclea

La coppia richiesta alla coclea per l'estrazione del terreno condizionato presenta un valore iniziale variabile tra i 10 ed i 20 Nm. Durante lo riempimento della coclea il valore è cresciuto fino ad un massimo di circa 180 Nm. Si può notare dal confronto con i grafici relativi alla pressione in camera, che la coppia registrata sale fino al momento in cui aumenta la pressione trasmessa al materiale. La causa di questo andamento parallelo di coppia e pressione è causato da una compattazione del materiale durante l'applicazione della pressione che rende difficoltoso il movimento della coclea fino a che si ha la stabilizzazione della pressione nel serbatoio e quindi si riduce l'effetto di ingranamento e compattazione del materiale. Una volta smaltito il materiale estratto in questa fase "transitoria", il valore di coppia si attesta intorno ai 20 Nm fino a fine prova.

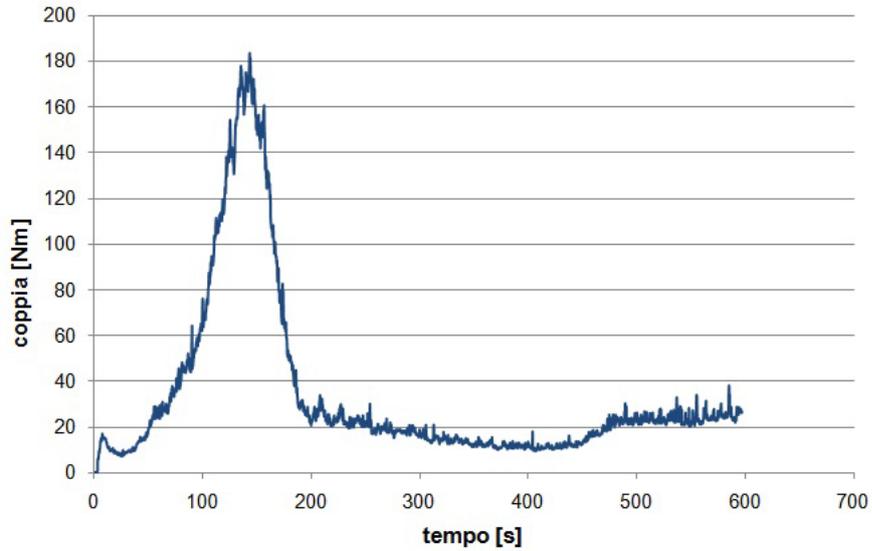


Grafico 5.17 - Coppia assorbita dalla vite della coclea durante la prova CLS-B

Spostamento del piattello di carico

Il grafico 17 riporta l'andamento dello spostamento del piattello di carico ed è evidente come la corretta estrazione del materiale da parte della coclea consenta un abbassamento lineare e costante durante la prova. In seguito all'abbassamento iniziale per entrare in contatto con il materiale (circa 250mm) il piattello si abbassa con un gradiente di avanzamento pari a 1,33 mm/s.

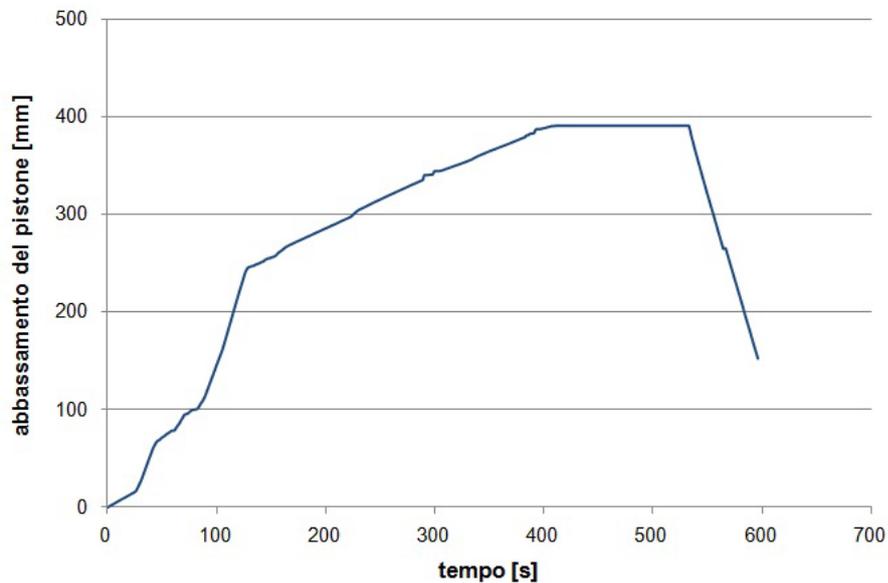


Grafico 5.18 - Spostamento del piattello di carico durante la prova CLS-B

Peso del materiale estratto

Il grafico 12 indica come l'estrazione del materiale dalla coclea sia stata piuttosto efficiente e costante. Il peso del materiale estratto dalla camera in pressione durante la prova è di circa di 53 kg.

Il δ peso medio di tutta la prova è pari a 0,17 kg/s.

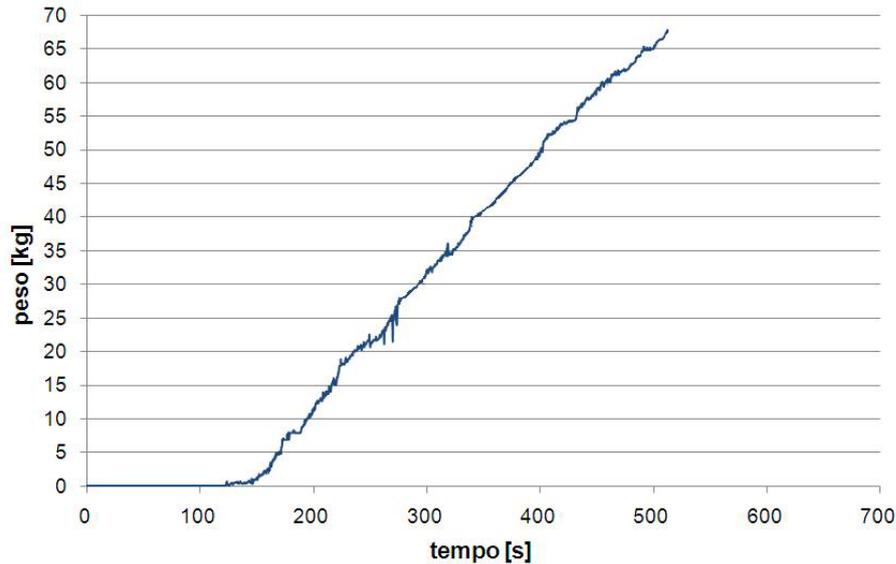


Grafico 5.19 - Peso del terreno estratto durante la prova CLS-B

Pressioni lungo la coclea

Le pressioni registrate dai sensori mostrano un andamento piuttosto 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 $t=440s$ 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.

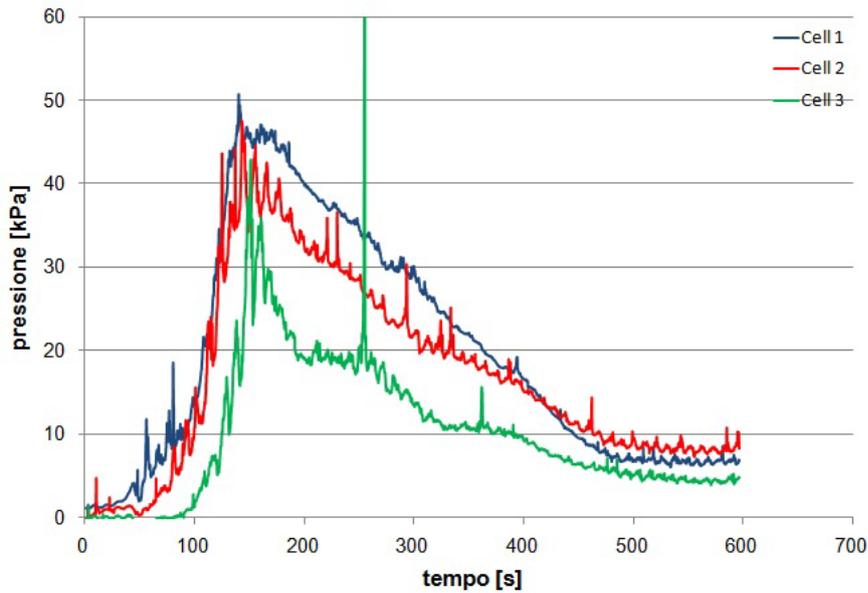


Grafico 5.20 - Andamento delle pressioni lungo coclea durante la prova CLS-B

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 5.7 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, ha un comportamento buono per quel che riguarda le caratteristiche di plasticità e di abbassamento al cono, con un leggero eccesso di schiuma, ad eccezione della prima quota parte di materiale estratto, che risulta più asciutto.

Ordine dello slump	Abbassamento al cono [cm]	Fotografia
#1 Prima dell'estrazione	20	
#2 Dopo l'estrazione	17	

#3 Dopo l'estrazione	19	
#4 Dopo l'estrazione	22	
#5 Dopo l'estrazione	17	
#6 Dopo l'estrazione	21	

Tabella 5.8 - Risultati ottenuti dalle prove di abbassamento al cono di slump - Prova CLS-B

5.3.5 Commenti alla seconda prova di estrazione (CLS-B) effettuata sulla formazione dei calcescisti.

Dall’analisi dei risultati, già presentati nei precedenti paragrafi, è chiaro come il materiale condizionato con i parametri di cui alla prova CLS-B sia idoneo all’ estrazione da camera in pressione.

6. Conclusioni

La ricerca sperimentale presentata nel presente rapporto ha come obiettivo la verifica dell'applicabilità, nello scavo delle gallerie del progetto "Gronda di Genova", della tecnologia EPB.

La fattibilità di questa tipologia di macchina di scavo è stata valutata mediante l'uso delle seguenti prove di laboratorio: prove di slump e prove di estrazione da camera in pressione mediante coclea con l'attrezzatura sviluppata dal TUSC - "Centro di Ricerca e Laboratorio per le Gallerie e lo Spazio Sotterraneo" del DITAG 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.

Per quanto riguarda la simulazione del quantitativo d'acqua negli ammassi rocciosi che la macchina di scavo incontrerà lungo il tracciato, esso è stato valutato in via preliminare accettando un certo grado di variabilità. È comunque noto che aumentando l'acqua il materiale ha una maggiore fluidità e quindi una migliore condizionabilità. Questi valori sono stati ottenuti in laboratorio addizionando acqua al materiale frantumato contestualmente alla miscelazione con la schiuma. Durante lo scavo, comunque, sarà relativamente facile, se il materiale risultasse troppo asciutto, aggiungere acqua dalla macchina all'interno della camera di scavo mediante le pompe che sono presenti in tutte le macchine di nuova generazione, 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 per tutte le formazioni litologiche studiate, 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.

I risultati ottenuti a seguito delle due campagne di prove hanno portato ad ottenere i valori attorno ai quali si sono ottenuti i migliori risultati del condizionamento, sulla base delle granulometrie e delle condizioni di laboratorio. Questi valori 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]
Calcescisti e Serpentiniti	7	105	2	15	75	1,00	90
Argilloscisti	5	75	2	15	70	0,93	90

Con i valori sopra indicati si indicano i livelli di condizionamento che ragionevolmente possono essere rappresentativi dei casi in esame e da utilizzarsi per i test preliminari di tipo ambientale.

7. 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. **Borio L., Chierigato A., Picchio A., Peila D. (2010)**, studio della permeabilità di terreni condizionati con schiume, *GEAM. GEOINGEGNERIA AMBIENTALE E MINERARIA*, pp. 6, 2010, Vol. XLVII, pagine da 75 a 80, ISSN: 1121-9041
8. **Borio L., Picchio A., Chierigato A., Peila D., Pelizza S., Tanzi A., Marchionni M., Tanzini M., Sanfilippo R., Mele P. (2011)**, Studio di fattibilità per l'applicazione in roccia di EPB, *Gallerie e opere in sotterraneo*, 2011
9. **EFNARC (2005)**, Specification and guidelines for the use of specialist products for Mechanized Tunnelling (TBM) in Soft Ground and Hard Rock, *EFNARC recommendations*
10. **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
11. **Langmaack L. (2002)**, Soil conditioning for TBM: chances & limits, *Aftes - Journées d'études internationales -Toulouse - Octobre 2002, AFTES*, pp. 207 - 209
12. **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
13. **Maidl, B., Herrenknecht, M. and Anheuser, L. (1995)**, *Mechanised Shield Tunnelling*, Ernst&Sohn, Berlin, p.428.
14. **Mair R., Merritt A., Borghi X., Yamazaki H., Minami T. (2003)**, Soil conditioning for Clay Soils, *Tunnels & Tunnelling International*, April 2003, pp. 29 - 33
15. **Merritt, A. and Mair, R.J. (2006)**, Mechanics of tunnelling machine screw conveyor: model tests, *Geotechnique*, Vol. 56, pp. 605-615.
16. **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.
17. **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

18. 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)

19. Peña M. (2003), Soil conditioning for sands, Tunnels & Tunnelling international, July 2003, pp. 40 - 42

20. 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

21. Vinai R. (2004), Screw conveyor performance tests, Internal report - University of Oxford - unpublished

22. 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.

23. Vinai R., Borio L., Peila D., Oggeri C., Pelizza S. (2008), Soil conditioning for EPB Tunnelling, T&T INTERNATIONAL, , Vol. XII,

24. 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 ABBATTURO 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.

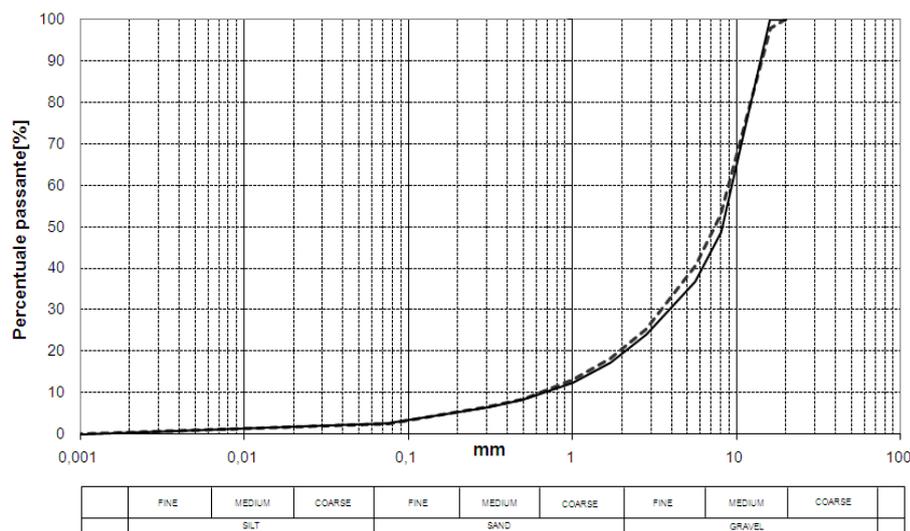


Grafico 1 – Curva granulometrica della formazione dei calcescisti.

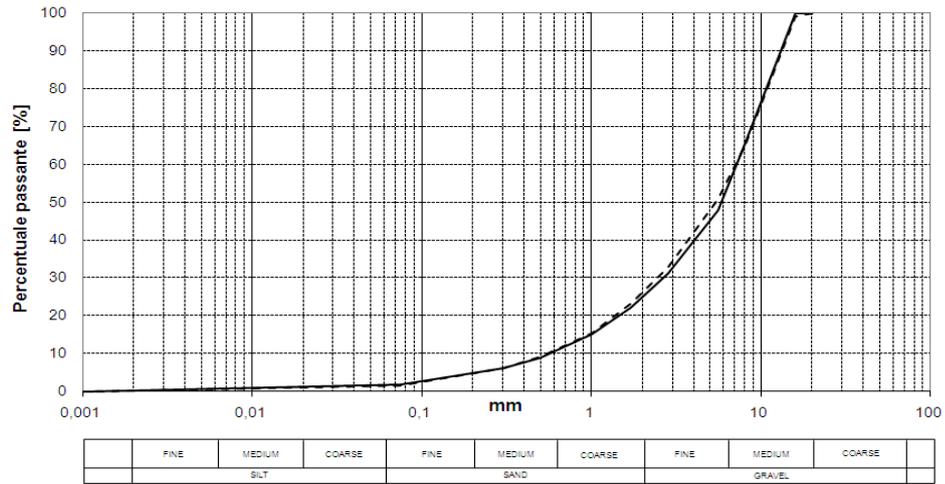


Grafico 2 – Curva granulometrica della formazione degli argilloscisti.

SINTESI DEI DATI DISPONIBILI

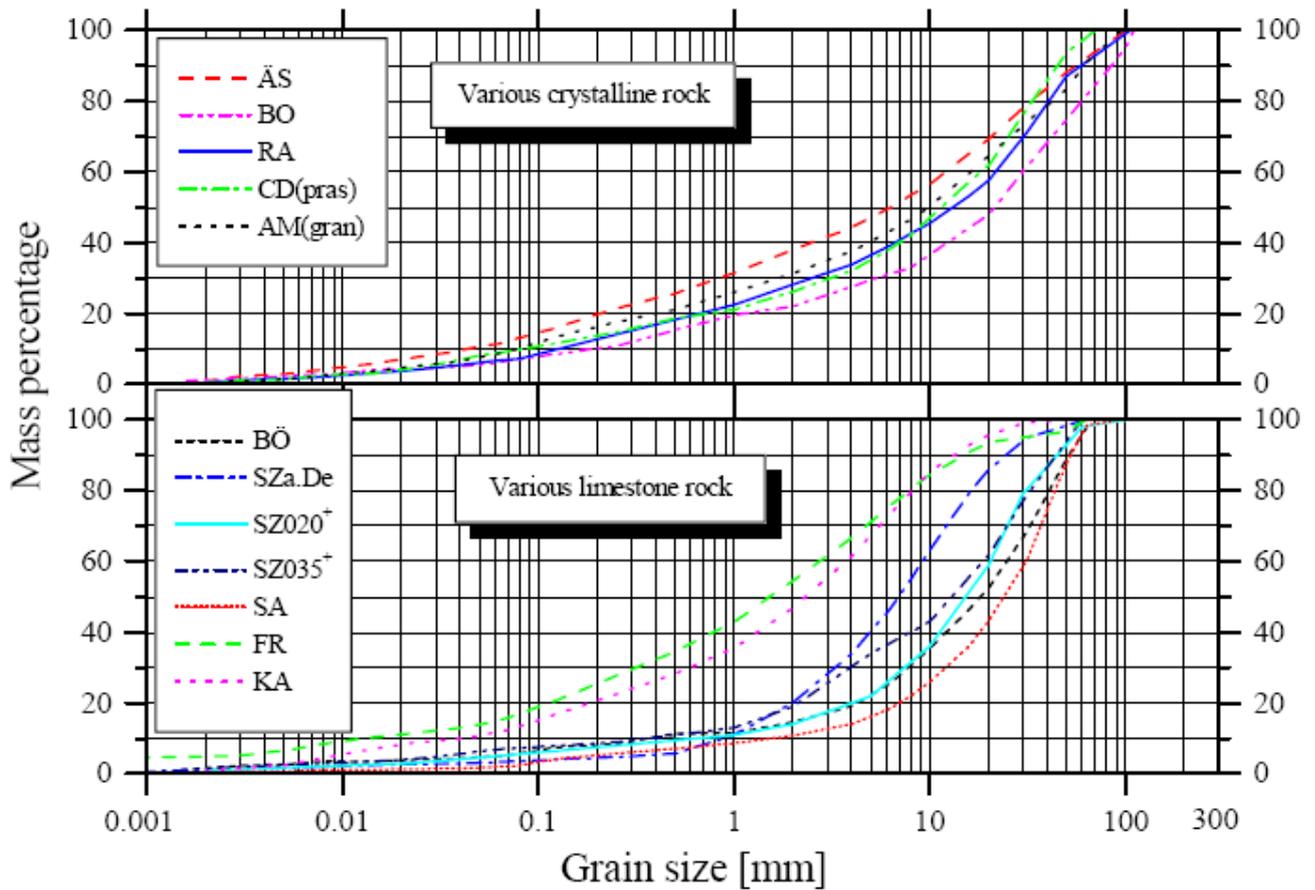
Nel seguito sono sinteticamente riportati i dati reperiti e la fonte da cui sono stati estratti.

CASO 1

Dott. Cedric N Thalmann-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	0/4mm	>32mm	>100mm
	[mm]	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.

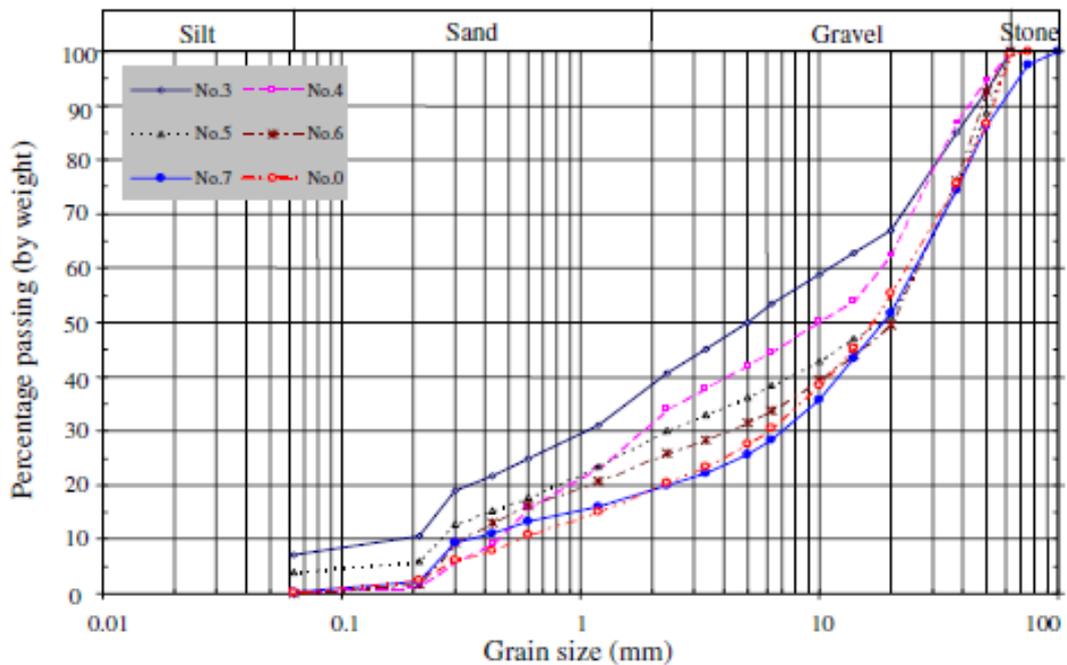


Gráfico 4 - Curve granulometriche del materiale relativo al Caso 2.

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.

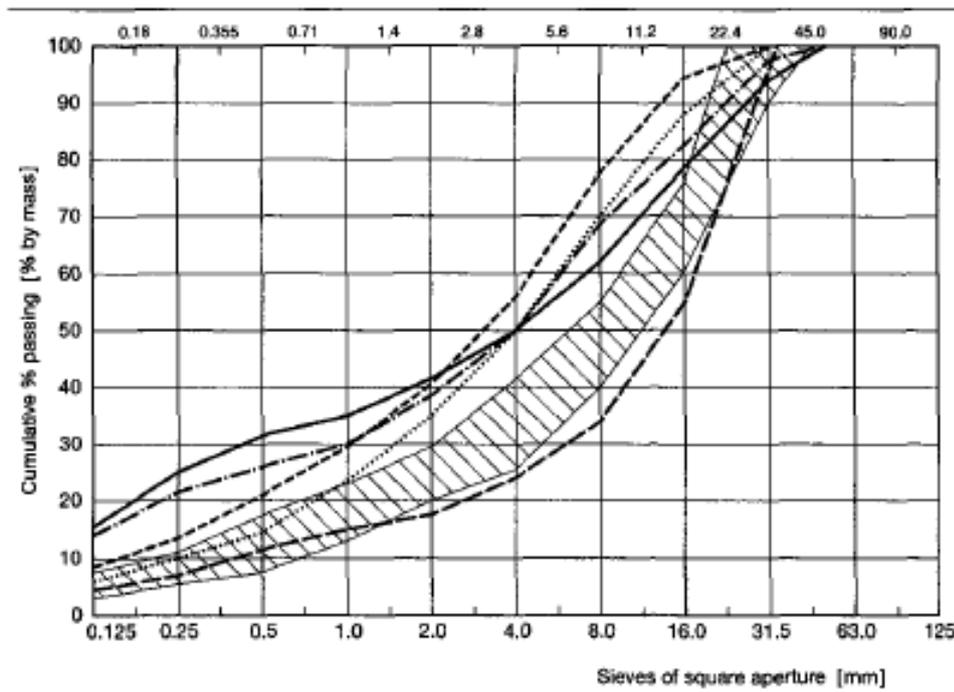


Grafico 5 - Curve granulometriche del materiale relativo al Caso 3.

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:

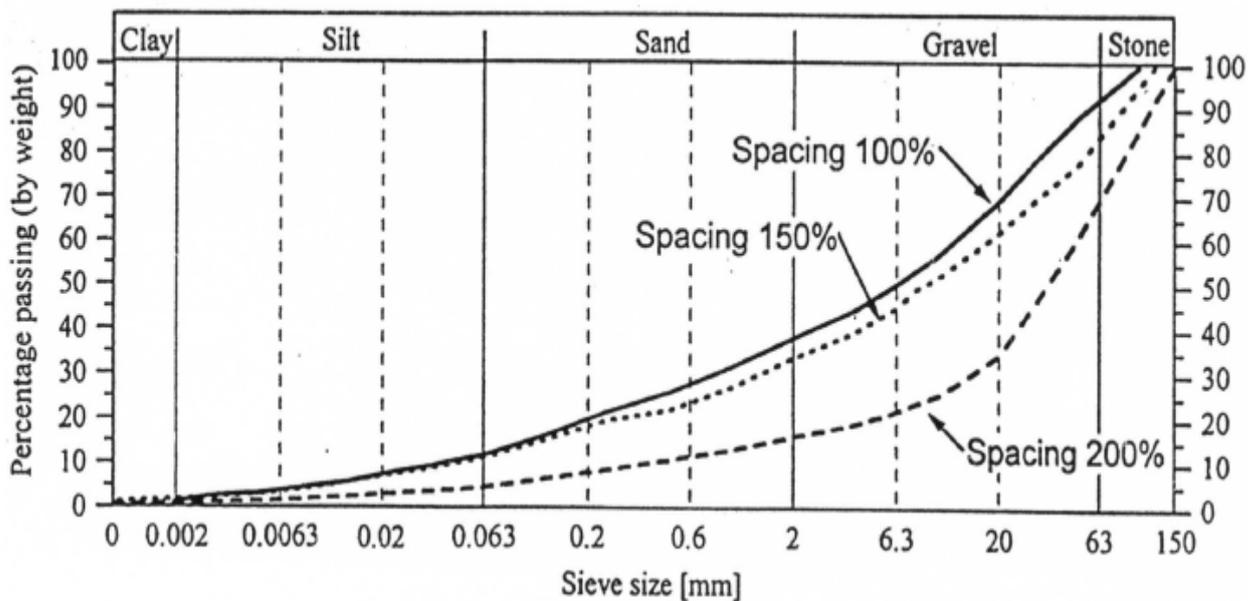


Grafico 6 – Curve granulometriche dei materiali studiati nel caso 4.

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%.

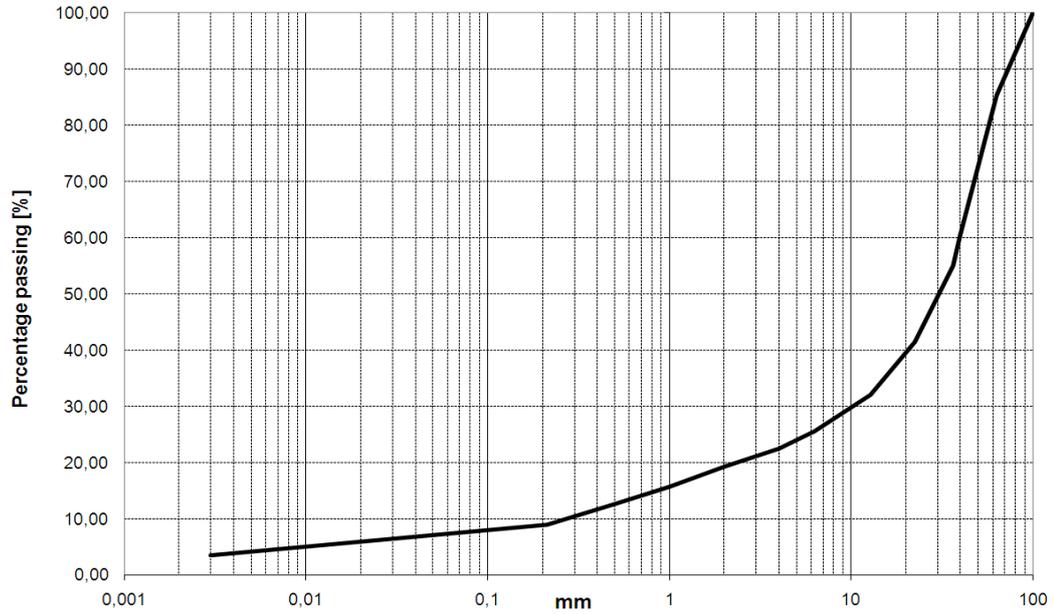


Grafico 7 – Curva granulometrica cunicolo esplorativo Aica

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%.

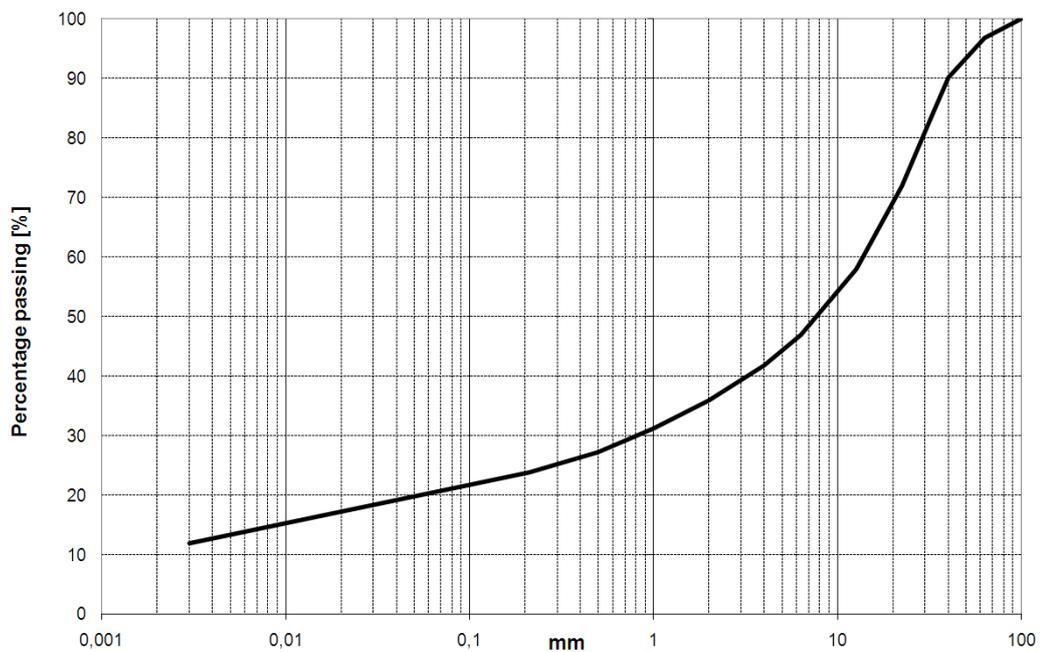


Grafico 8 - Curva granulometrica galleria idroelettrica “La Thuile”

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%.

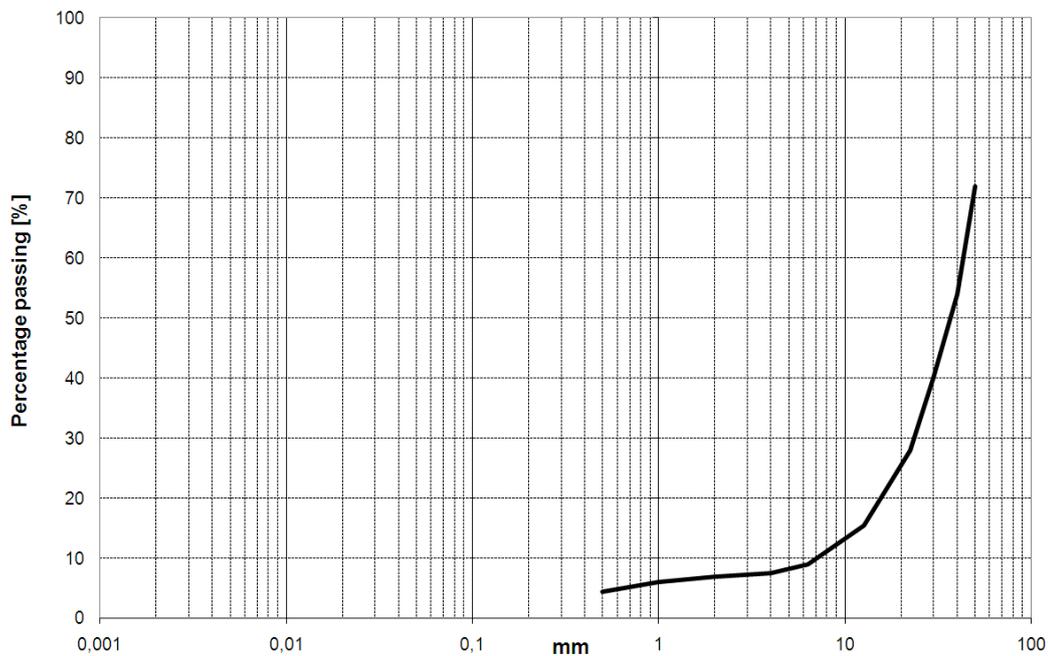


Grafico 9 - Curva granulometrica Tarabya Tunnel

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.

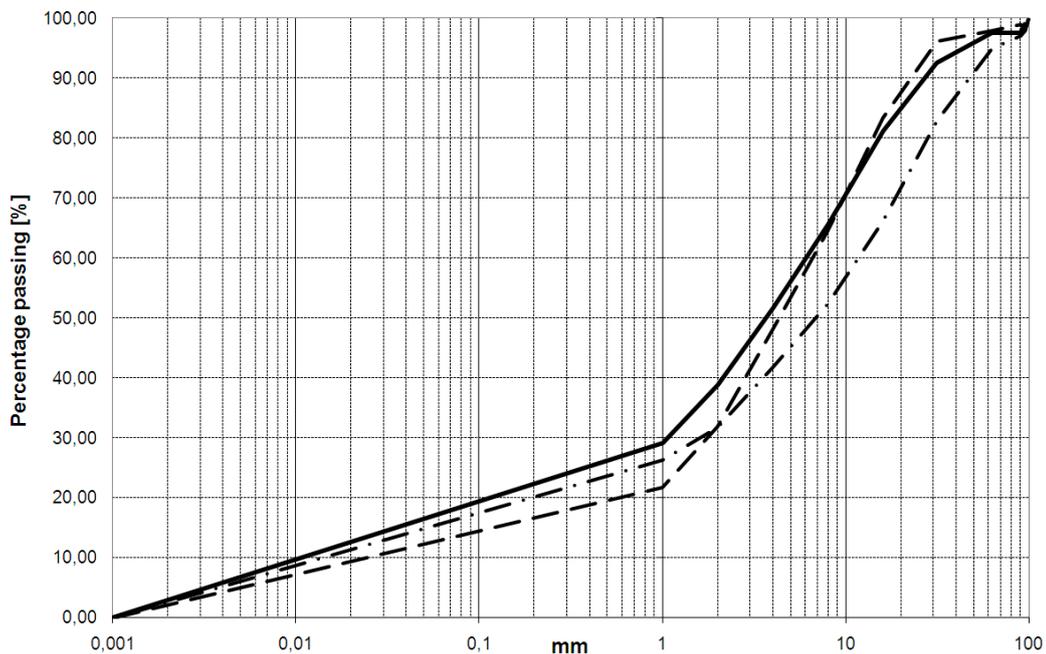


Grafico 10 – Curve granulometriche Elek Tunnel

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 %.

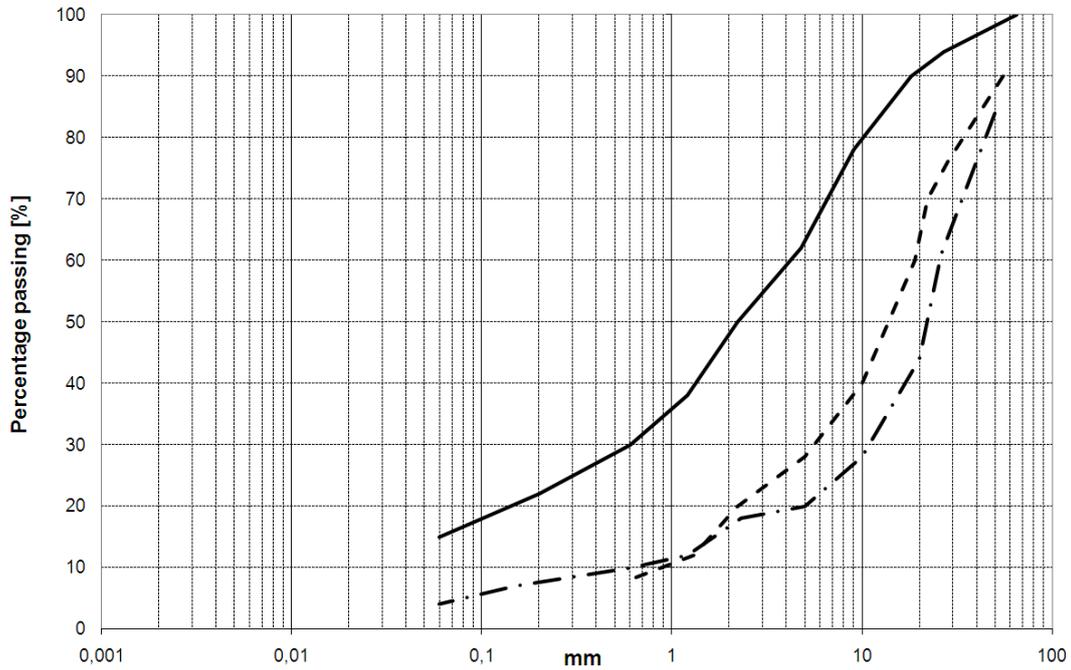


Grafico 11 - Curve granulometriche delle formazioni metapilitiche filladiche

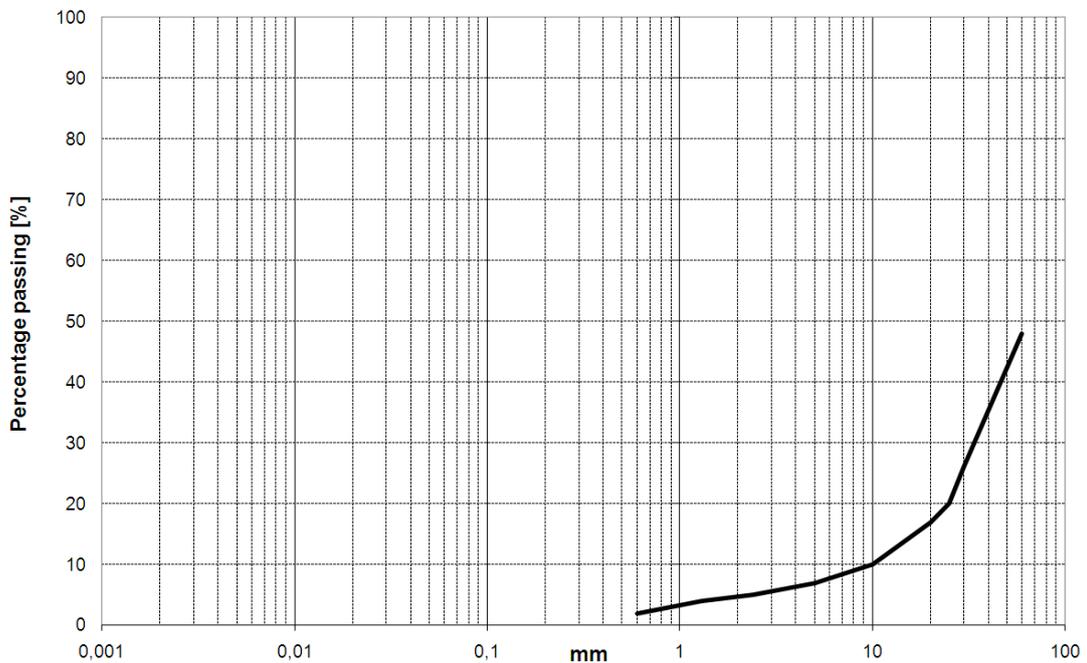


Grafico 12 - Curve granulometriche delle formazioni micascisti-gneiss

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.

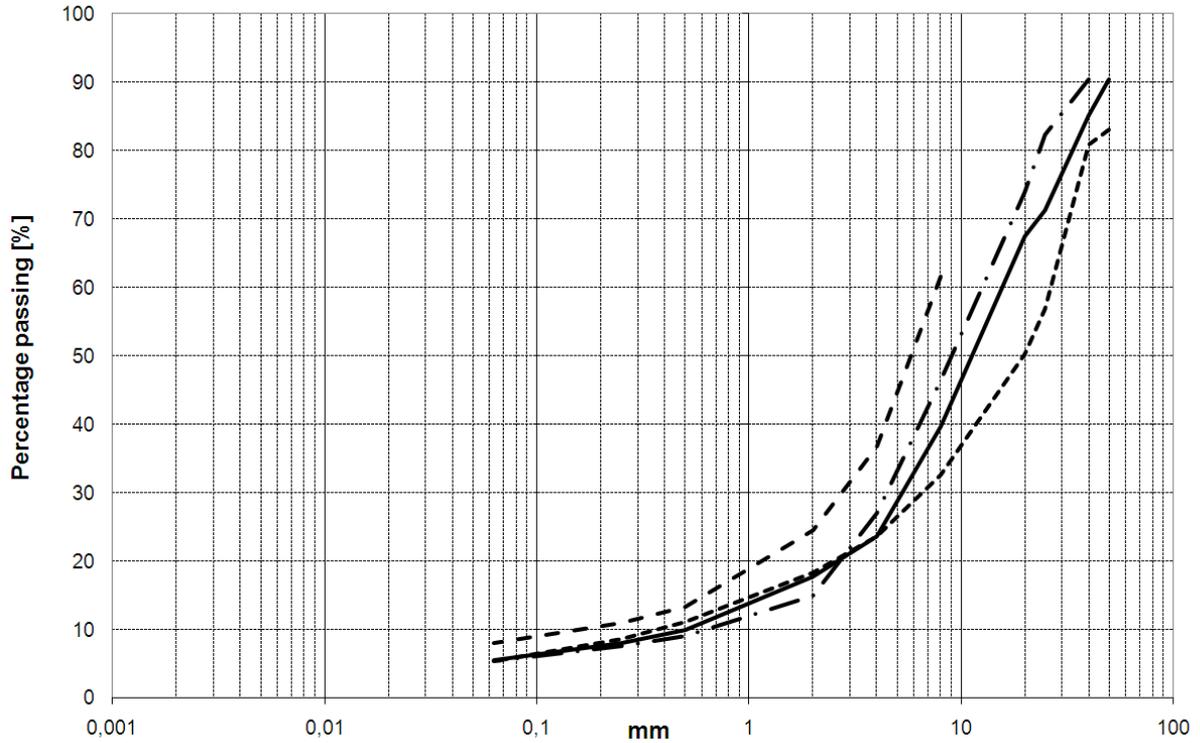


Grafico 13 – Curve granulometriche delle formazioni attraversate nel cantiere di Barcellona.

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.

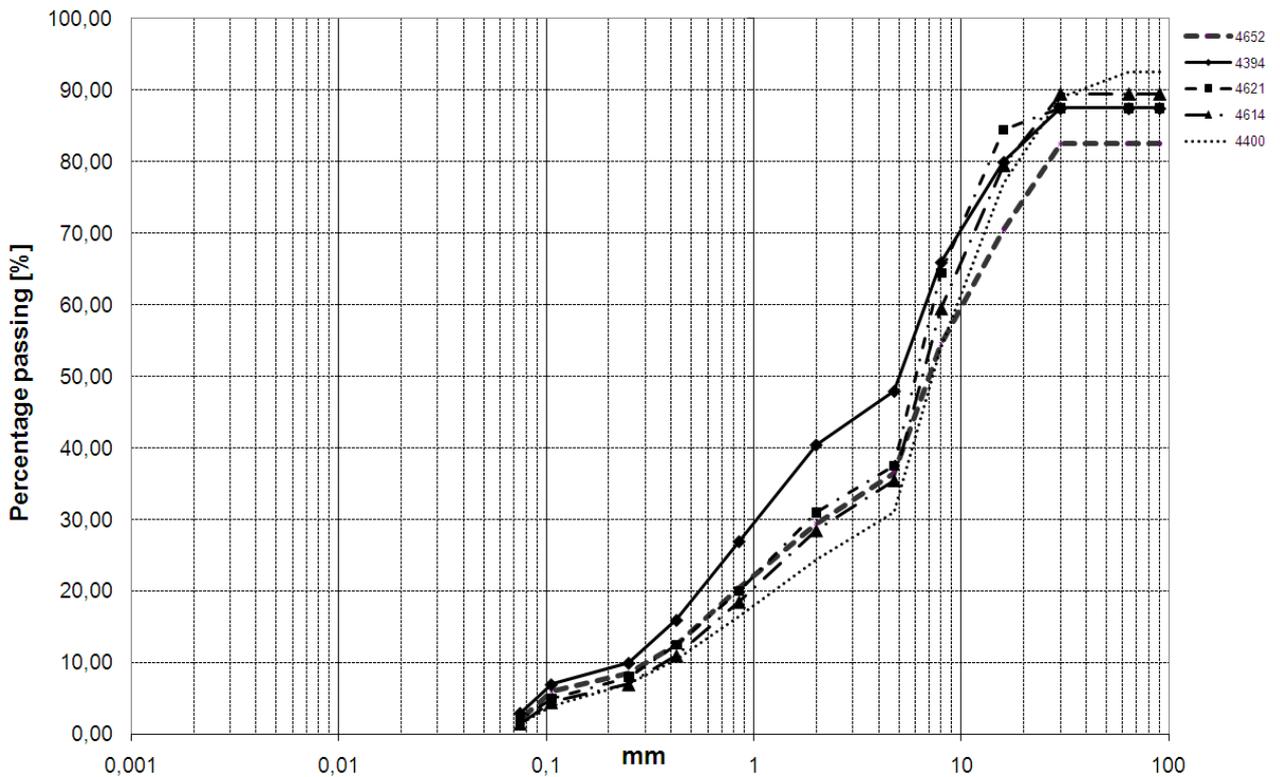


Grafico 14 – Curve granulometriche prodotte dallo scavo della galleria Vaglia

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

CASO 11

Materiale prelevato nel cantiere della galleria di sicurezza del traforo del Gran San Bernardo.

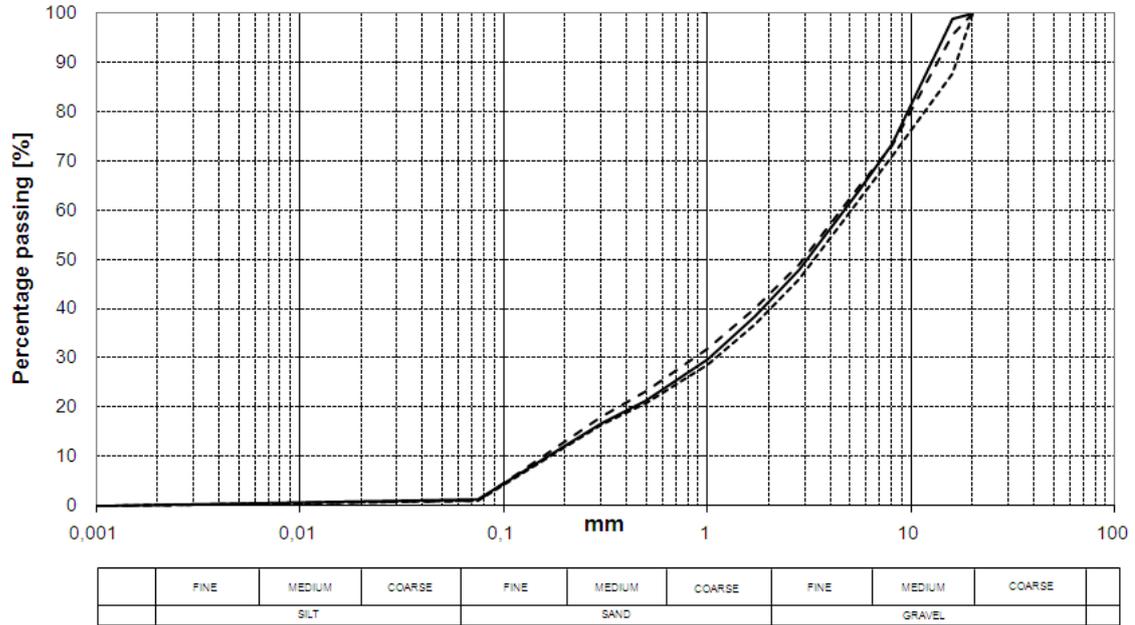


Grafico 15 – Curve granulometriche del materiale prelevato dal cantiere della galleria di sicurezza del traforo del Gran San Bernardo

La roccia scavata del momento in cui è stato prelevato il materiale direttamente dal nastro primario della TBM è un micascisto con una importante componente micacea, ed è per questo motivo che si ha un'elevata quantità di materiale di dimensioni inferiori al millimetro (circa il 30 %).

La spinta primaria media della macchina durante il prelievo è di circa 500 ton, la penetrazione media è di 24 mm/minuto, ma con massimi di 46 mm/minuto e la velocità della testa è pari a 5 rpm.



Contratto di Ricerca tra DITAG – Politecnico di Torino e SPEA Ingegneria Europea S.p.A.

**Prove comparative di condizionamento del terreno delle
gallerie naturali inserite nei lavori di realizzazione del
progetto “Gronda di Genova” per l’applicazione dello
scavo meccanizzato di gallerie con tecnologia EPB**

RELAZIONE INTEGRATIVA

Prove di permeabilità su calcescisti condizionati

Responsabile scientifico:

Prof. Ing. Daniele Peila

Gruppo di lavoro:

Prof. Ing. Daniele Peila

Ing. Andrea Picchio

Aprile 2011



POLITECNICO DI TORINO

TUSC – Centro di Ricerca e Laboratorio per le Gallerie e lo Spazio Sotterraneo

Premessa

La presente nota, redatta dai sottoscritti Prof. Daniele Peila e Ing. Andrea Picchio, integra la relazione conclusiva del contratto di ricerca tra la SPEA Ingegneria Europea SpA e il DITAG del Politecnico di Torino, datata 20 Aprile 2011, nel quale sono presentate le risultanze delle prove di laboratorio in merito al condizionamento degli ammassi rocciosi attraversati dallo scavo della gronda di Genova.

Prove di permeabilità

La permeabilità è uno dei più importanti parametri che influenzano il comportamento e le prestazioni di una EPB, infatti come chiaramente definito da Anagnostou e Kovari (1996) se esiste un flusso d'acqua tra il terreno e la camera di scavo si instaurano delle forze di filtrazione che possono ridurre le condizioni di stabilità del fronte.

Inoltre la permeabilità del terreno influenza la capacità dello stesso di trasmettere la corretta contro-pressione al fronte. Infatti un basso valore di permeabilità del terreno condizionato permette di controllare la graduale riduzione della pressione lungo la coclea.

Per prevenire il flusso d'acqua all'interno della camera di scavo la permeabilità del materiale condizionato viene consigliato che la permeabilità venga mantenuta al di sotto di 10^{-5} m/s.

La valutazione di questo parametro è molto complicato considerando che l'uso della prova di permeabilità convenzionale non può essere usata in quanto questa prevede che si mantenga il flusso fino a quando quest'ultimo non è costante, ma così facendo, nel caso del terreno condizionato le bolle degli agenti schiumogeni vengono dilavate.

Per questo motivo nel Centro di Ricerca e Laboratorio per le Gallerie e lo Spazio Sotterraneo (TUSC) del Politecnico di Torino è stata messa a punto una prova specifica per valutare il grado di impermeabilità dei materiali condizionati con agenti schiumogeni.

Descrizione della strumentazione di prova

La strumentazione utilizzata per la prova è la seguente (figura 1):

- Cella di permeabilità a battente fisso da 75 mm.
- Serbatoio a livello costante con capacità pari a 2 l.
- Tubo di collegamento tra serbatoio e permeametro con diametro 8 mm.
- Pinzette stringi tubo.
- Cilindro graduato da 1000 ml.

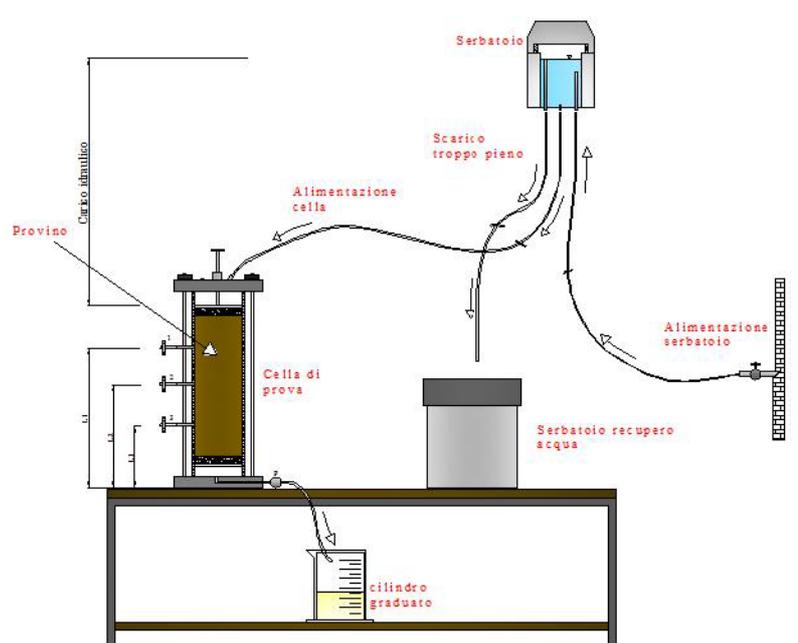


Figura 1 – Schema della strumentazione utilizzata per la prova di permeabilità

Preparazione del campione

Dal terreno originario è stato ottenuto un campione rappresentativo.

Il campione di prova non viene fatto essiccare per non ostacolare la successiva fase di saturazione. Il terreno viene quindi inserito all'interno del cilindro avvalendosi di un imbuto metallico a bocca larga e di una sessola metallica. Ogni prova è stata preparata mediante una compattazione dinamica del campione, allo scopo di ottenere un certo livello di addensamento costante; in questo caso si è adottata una compattazione mediante pestello Proctor, articolata in 8 colpi per ogni strato di terreno dello spessore di 10 cm.

Per la realizzazione di ogni strato all'interno del cilindro si è utilizzata una sessola, rimescolando più volte il materiale prima del prelievo e rovesciandolo all'interno della cella da un'altezza costante, in modo da evitare che le particelle più fini tendano ad addensarsi nelle zone periferiche del singolo strato.

La base del cilindro di prova è collegata tramite un ugello metallico e uno spezzone di tubo ad un cilindro in vetro graduato della capacità di 1 l, al fine di misurare con una certa precisione la quantità di fluido in uscita in seguito alla saturazione. Raggiunto il livello di riempimento desiderato, viene rimosso il materiale in eccesso e si sistema la piastra superiore del permeametro, fissandola al cilindro tramite le viti in dotazione (vedi foto).

Si abbassa quindi il pistone fino a portare la piastra a contatto con il campione e si avvita il collare metallico per fissarne la posizione.

Molto importanti al fine di un corretto funzionamento della prova sono i due filtri, posti rispettivamente in fondo al cilindro (per evitare un dilavamento della porzione granulometrica più fine) e in testa, a contatto con la piastra forata. Prima dell'esecuzione delle misure, si allenta la pinzetta stringi tubo collegata al circuito di ingresso e si apre la valvola inferiore del permeametro in modo da iniziare il moto di filtrazione verticale dall'alto verso il basso.

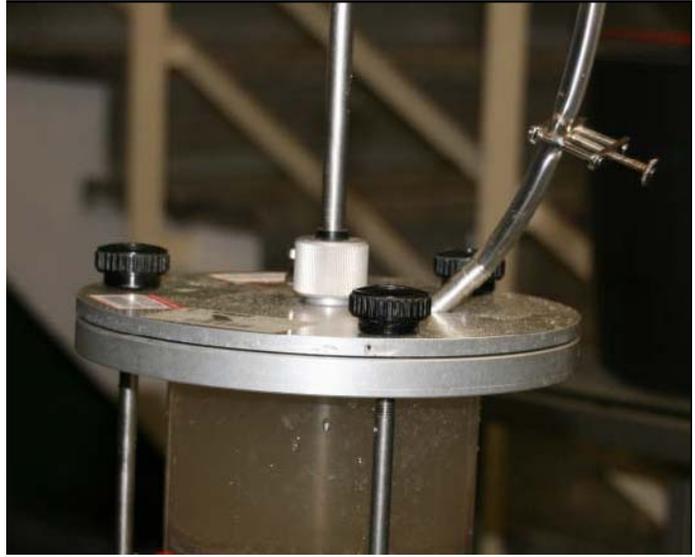


Figura 2 – permeametro pronto per la prova e particolare delle connessioni

Procedura di prova

Considerando la necessità di valutare un indice per i terreni condizionati, il test è stato modificato rispetto alla procedura standard in modo da comparare il comportamento del materiale condizionato e quindi prevenire il passaggio dell'acqua.

Per questa ragione nel test proposto non è stato considerato un flusso costante d'acqua attraverso un materiale saturo, ma una misura di resistenza al passaggio dell'acqua da parte della miscela. Per valutare la differenza tra le diverse miscele si è scelto che l'indice sia il tempo trascorso per il passaggio di 2 litri d'acqua attraverso il campione, e questo è stato chiamato Indice di Impermeabilità (I_i [s]).

Le fasi seguite nella procedura di prova:

- Il campione di terreno, precedentemente miscelato con la schiuma all'interno del mixer, è chiuso all'interno della cella di permeabilità e il piatto viene abbassato in modo da venire a contatto con il materiale testato, senza compattare il campione;
- Il test inizia con l'introduzione dell'acqua a differente pressione all'interno della cella;
- Inizia la registrazione della prova;
- Quando l'acqua inizia ad uscire dalla valvola posizionata in fondo alla cella, la misura del tempo viene fermata (t_0);
- Quindi il tempo trascorso per il passaggio di 0,5 litri di acqua all'interno di un cilindro graduato viene misurato e registrato;
- La prova continua fino alla fuoriuscita di 2 litri di acqua e il tempo totale viene registrato;
- Viene misurato il possibile abbassamento del campione all'interno della cella di prova.



Prove effettuate

Per lo studio della permeabilità dei materiali attraversati dalle gallerie della “Gronda di Genova”, sono stati effettuati tre test su un campione omogeneo di materiale frantumato fino ad ottenere la curva granulometrica riportata nel grafico 1.

Le tre prove sono state effettuate a differenti livelli di condizionamento nell’ottica di verificare l’influenza degli additivi schiumogeni sulle proprietà di impermeabilità del materiale presente nella camera di scavo.

La descrizione dei parametri delle tre prove è riportata in tabella 1.

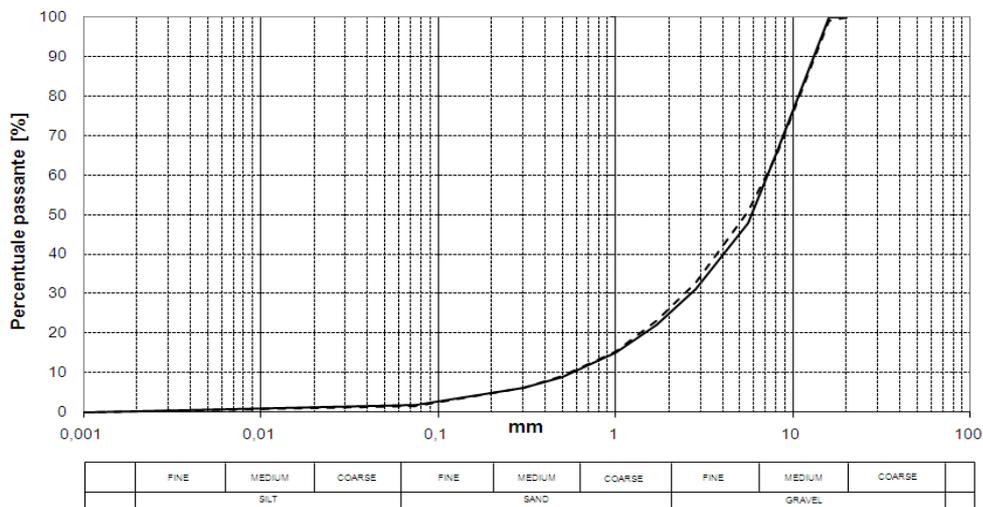


Gráfico 1 – Curva granulometrica del materiale sottoposto a prova

Prova	FER [-]	FIR [%]	w [%]	Carico idraulico [m]	Pressione [bar]
1	//	//	//	10	1
2	15	50	5	10	1
3	15	70	5	10	1

Tabella 1 – Sintesi dei test di permeabilità eseguiti

Le prove sono state quindi eseguite sul materiale tal quale con l’obiettivo di valutare la permeabilità di partenza del materiale, e quindi su due campioni condizionati, il primo ai livelli ottimali secondo quanto ottenuto dalle prove di slump, il secondo con un condizionamento valutato adeguato per l’estrazione del materiale con coclea da camera in pressione.



Risultati ottenuti

I risultati ottenuti sono riassunti nel grafico 2.

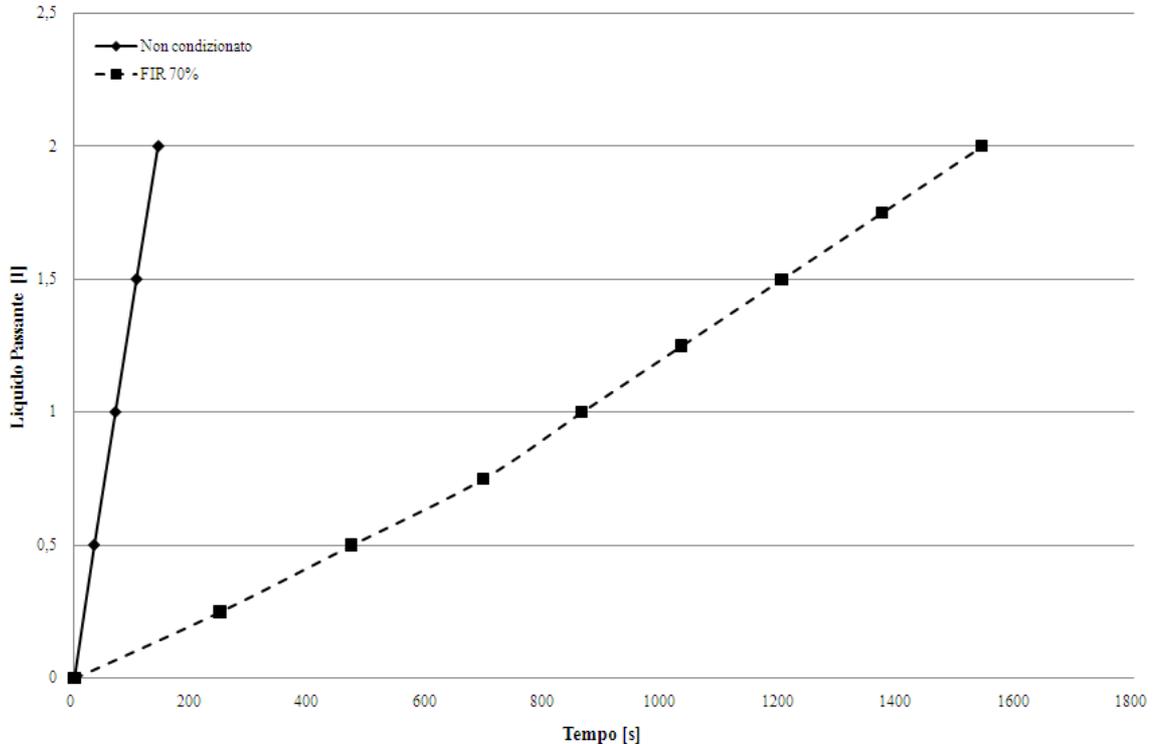


Grafico 2 – risultati dei test di permeabilità 1 e 3

La prova 1, sul materiale tal quale ha dato come risultato un indice I_i pari a 143 secondi, che è un valore piuttosto elevato se messo a confronto con quello di una sabbia di riferimento che ha dato come risultato un I_i di 61 secondi.

Nella prova 2, che non è riportata nel grafico 2, dopo un'iniziale fuoriuscita di schiuma, il passaggio dell'acqua attraverso il campione è stato impedito dalla presenza di un condizionamento evidentemente ottimale ai fini di questa proprietà del materiale additivato.

Il motivo per cui la prova 2 non è stata riportata nel diagramma è proprio la totale impermeabilità del materiale, che non è praticamente riportabile sul diagramma proposto.

La prova 3, sul materiale condizionato con i parametri di condizionamento $FER = 15$, $FIR = 70\%$ e $w = 5\%$, ha dato come risultato un indice I_i pari a 1541 secondi. Valore molto elevato se si considera anche il tempo di permanenza del terreno nella camera di scavo. Si consideri che la sabbia di riferimento con cui è stata calibrata la prova ha dato un I_i di 1543 secondi, seppur con parametri di condizionamento leggermente differenti ($FER = 12$, $FIR = 60\%$)



POLITECNICO DI TORINO

TUSC – Centro di Ricerca e Laboratorio per le Gallerie e lo Spazio Sotterraneo

Conclusioni

I parametri di condizionamento utilizzati per i test di permeabilità descritti risultano dare risultati ottimali in termini di impermeabilità del materiale additivato nell'ottica di prevenire l'ingresso di acqua libera attraverso la coclea.

Pertanto si può dire che, con i set di parametri indicati in precedenza nella relazione finale, ottenuti mediante prove di caduta al cono di slump e prove di estrazione controllata da camera in pressione, il materiale condizionato con schiume presenta anche ottime caratteristiche di impermeabilità, com'è necessario per una corretta applicazione della tecnologia EPB.