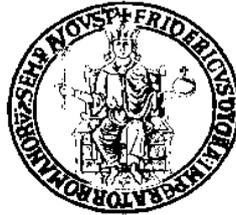


UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI NAPOLI “FEDERICO II”



SCUOLA POLITECNICA E DELLE SCIENZE DI BASE

CORSO DI LAUREA IN
INGEGNERIA PER L'AMBIENTE E IL TERRITORIO

DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA CIVILE EDILE ED AMBIENTALE

SINTESI DELL'ELABORATO DI TESI

**L'uso del calcestruzzo cellulare con inerti speciali nelle
applicazioni di ingegneria geotecnica**

Relatore:

Ch. Mo Prof. Gianfranco Urciuoli

Candidato:

De Sarno Domenico

Correlatore:

Dott. Ing. Raffaele Papa

Matricola:

M67/173

ANNO ACCADEMICO 2014/2015

Introduzione

L'elaborato di tesi riguarda l'utilizzo di tensioattivi in campo geotecnico, e in particolare l'utilizzo di tali additivi per la realizzazione di calcestruzzo cellulare.

I calcestruzzi cellulari sono materiali costituiti da boiaccia cementizia, inerti naturali o artificiali e una schiuma preformata. L'intera massa presenta una grande quantità di piccole bolle d'aria: la massa assume una struttura cellulare simile a quella di una spugna.

Le principali proprietà del calcestruzzo cellulare sono:

- bassa densità; secondo necessità può essere prodotto un calcestruzzo di densità variabile tra 300 e 2000 kg/m³;
- resistenza a compressione direttamente proporzionale alla densità;
- elevata resistenza al fuoco, elevato isolamento termico ed acustico.

Il sistema utilizzato per la produzione di calcestruzzo cellulare in situ, utilizzato anche nelle sperimentazioni eseguite è aggiungere una schiuma preformata al calcestruzzo. Il sistema di bolle viene creato aggiungendo aria pressurizzata ad un agente schiumogeno per creare una schiuma la cui densità dipende dalla pressione dell'aria immessa. Quindi si aggiunge la schiuma alla malta. La densità del prodotto finale dipende dalla densità della schiuma e dalla quantità di schiuma immessa.

Gli agenti schiumogeni sono soluzioni a base di acqua e tensioattivi costituiti da proteine idrolizzate che abbassano la tensione superficiale dell'acqua; sottoposti ad agitazione immettendo aria compressa, generano una grande quantità di bolle di aria formando la schiuma.

La schiuma utilizzata è stata prodotta con la macchina GN-100 AC Bunker che consente di preparare la soluzione di acqua e tensioattivo alla concentrazione desiderata e di regolare la pressione dell'aria immessa. Non è possibile regolare la portata di schiuma.

Nello svolgimento della tesi è stata esaminata prima un'applicazione diretta delle schiume come fluidificante dei terreni negli scavi con Tunnel Boring Machine, quindi è stata analizzata l'applicazione del calcestruzzo cellulare come materiale di rinterro di trincee ed infine sono state analizzate le proprietà del calcestruzzo cellulare con aggregati leggeri di briciole di gomma.

Uso delle schiume negli scavi con TBM-EPB

La TBM è una macchina che permette la meccanizzazione completa dello scavo delle gallerie. L'Earth Pressure Balance è una tipologia di scudo chiuso utilizzato per il sostegno dello scavo in terreni coesivi.

Durante l'esecuzione dello scavo è aggiunta acqua e schiuma preformata per rendere il terreno più fluido; la miscela deve essere abbastanza consistente da poter essere asportata tramite il sistema meccanizzato di nastri trasportatori. Sono quindi necessari dei test di consistenza per valutare le quantità di schiuma ed acqua da aggiungere per ottenere la consistenza ideale.

I parametri utilizzati per definire le quantità di schiuma e la densità sono i seguenti:

La concentrazione C dell'agente schiumogeno. È definita come il rapporto tra volume di tensioattivo e volume di soluzione utilizzata per la produzione della schiuma.

Il FIR-Foam Injection Ratio, definito come rapporto tra il volume di schiuma immessa e il volume di terreno a cui è aggiunta.

Il FER-Foam Expansion Ratio, definito come il rapporto tra il volume di schiuma prodotta e il volume di soluzione utilizzato. Esso dipende principalmente dalla pressione dell'aria immessa.

terreno	Additivo	c	FER	FIR
Pozzolane	Profoam SH	2.5%	13	40-50-60%
Flysch	Condat AC	1.5%	10	80-100-120%
Flysch	Condat L	1.5-2%	10	80-100-120%
Argille	Condat AC	1.5%	10	80-100-120%

Sono stati eseguiti 15 slump test per ogni coppia terreno/agente schiumogeno, fissando la concentrazione, il FER ed il FIR e facendo variare il contenuto d'acqua iniziale. In tabella sono riportati gli schiumogeni ed i parametri utilizzati. I primi test sono stati eseguiti su pozzolana asciutta disponibile nel laboratorio di geotecnica del DICEA. Sono poi stati eseguiti slump test su Flysch ed Argille di Caposele, terreni attraversati durante uno scavo con TBM-EPB.

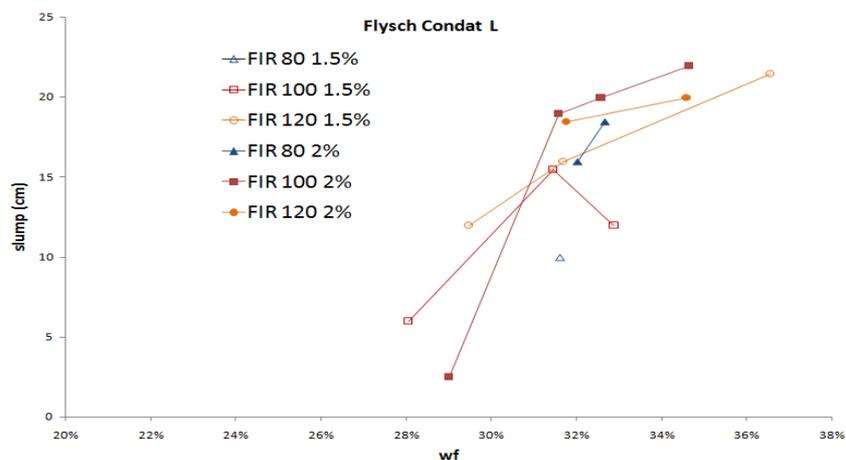
La prova consiste nel:

- preparare un campione di massa predefinita;
- aggiungere un volume d'acqua noto per raggiungere il contenuto d'acqua desiderato;
- miscelare il campione con l'acqua aggiunta fino ad ottenere una miscela omogenea;
- preparare il volume di schiuma da aggiungere, alla concentrazione e densità desiderata;
- verificare che la densità della schiuma sia quella desiderata;
- aggiungere la schiuma e miscelare fino ad ottenere una miscela omogenea;
- eseguire lo slump test in cono di Abrams

Questa è la scheda tecnica della composizione ideale per miscela di pozzolana, la composizione attraverso cui si è ottenuto lo slump di 19 cm che si è avuto con un FIR del 60% ed un contenuto d'acqua finale del 31%.

Prova 27/4	13	Note	FOTO
Peso materiale [kg]	8	composizione ideale	
Volume materiale [l]	8.25		
w acqua libera aggiunta [l]	2.1		
w iniziale [%]	26.3%		
FIR [%]	60%		
FER	13		
Peso schiuma [g]	378		
Altri additivi	-		
Quantitativi additivi [%]	-		
Quantitativi additivi [l]	-		
Liquido totale aggiunto [l]	2.48		
Liquido totale aggiunto [%]	30.04%		
w finale	31%		
Slump [cm]	19		

Le prove su flysch con condat L sono state realizzate con due concentrazioni diverse. Questo ha permesso di valutare l'influenza di questo parametro. Si può notare che con una concentrazione più alta si ha sistematicamente uno slump maggiore delle corrispondenti prove a concentrazione più bassa.



Calcestruzzo cellulare come materiale di rinterro

In questa parte della sperimentazione è stato analizzato il comportamento del CLS cellulare come materiale di rinterro di trincee per la posa di condotte in pressione.

Il materiale di rinterro ordinario è la sabbia ben compattata. Un'insufficiente compattazione causa cedimenti al p.c. che hanno anche l'effetto indiretto di consentire l'accumulo di acqua che ha così la possibilità di infiltrarsi. Inoltre eventuali perdite idriche possono erodere facilmente terreni poco compattati infiltrandosi nei terreni circostanti.

Per tale ragione si è pensato di utilizzare il CLS cellulare come materiale di rinterro. Tale materiale ha il vantaggio tecnologico di non richiedere compattazione, fornisce un maggiore isolamento termico e migliora la distribuzione dei carichi riducendo le sollecitazioni sulle tubazioni, quindi riducendone potenzialmente il rischio di rottura.

Il CLS cellulare può essere competitivo anche dal punto di vista economico in quanto non richiede compattazione quindi i tempi di esecuzione sono minori, non sono necessari macchinari per la compattazione, non è necessario che operai entrino nello scavo e quindi le sue dimensioni possono essere ridotte al minimo, anche grazie al migliore isolamento termico. Tutto questo va sommato alla riduzione di problemi a lungo termine e quindi dei costi di manutenzione per quanto suddetto.

Obiettivo della sperimentazione è stato valutare il comportamento del CLS cellulare in presenza di una perdita idrica; la trincea è stata riprodotta in una vasca nel laboratorio di idraulica del DICEA. Le prove sono state eseguite in collaborazione con il prof. Giugni e l'ing. De Paola.

All'interno della vasca è presente una condotta in PEad con diametro nominale di 140 mm, con un foro lungo la generatrice inferiore del diametro di 6 mm, collegata ad una condotta di adduzione in acciaio tramite una valvola di intercettazione.

Il fondo è forato per consentire lo smaltimento delle portate disperse; al di sopra di esso è disposto uno strato drenante costituito da un foglio di geotessuto, uno strato di ghiaia ed un ulteriore foglio di geotessuto.



Sono state eseguite due prove, una di riferimento con rinterro di materiale ordinario (piroclastite) ed una con rinterro con CLS cellulare.



La strumentazione di misura utilizzata è composta da un misuratore elettronico di pressione a monte, un misuratore di portata a monte e a valle per stimare la portata idrica persa e, nel caso della prova con rinterro di sabbia, da 4 tensiometri per misurare la suzione a monte e a valle della perdita, al di sopra e al di sotto della condotta.

Nella prova con rinterro di sabbia, la vasca è stata riempita con terreni compattati con particolare cura intorno alla condotta per simulare le condizioni in situ. Sono poi stati disposti i 4 tensiometri.

Nel caso della prova con calcestruzzo cellulare è stato eseguito uno scavo di dimensioni 0.6x0.5m in pianta e 0.6m di profondità intorno alla condotta. Prima del riempimento della trincea con il CLS cellulare, la condotta è stata avvolta con uno strato di geotessuto per non otturare il foro. Una volta determinato il volume da riempire e la densità da realizzare (420 kg/m^3), sono state definite le quantità necessarie di cemento, acqua e schiuma da usare per la preparazione del cls cellulare. La densità della schiuma realizzata è stata di 50 g/l , con l'additivo isocem S/L ad una concentrazione del 2.5%.

	1 mc	0.2 mc
cemento (kg)	249	50
acqua (l)	100	20
schiuma (l)	796	159

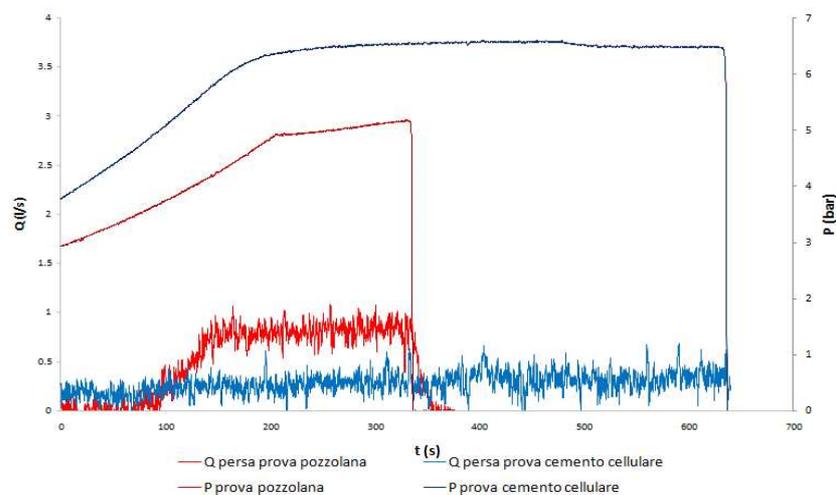
Il calcestruzzo cellulare è stato preparato nel laboratorio di geotecnica in due fasi, per facilitarne il trasporto al laboratorio di idraulica. Il calcestruzzo è stato fatto maturare per 11 giorni, dopodiché è stata eseguita la prova.

- Preparazione del software per la registrazione dati
- Accensione del gruppo motore-pompa
- Apertura di valvole di intercettazione
- Riempimento della condotta di adduzione
- Apertura della saracinesca per far confluire l'acqua nella tubazione in PEad
- Chiusura della saracinesca quando l'acqua è al p.c.

Si riportano i risultati delle prove eseguite.



Dalla foto risulta evidente la saturazione uniforme del volume occupato dal calcestruzzo cellulare e quindi l'assenza di erosione. Si riporta il confronto tra i risultati delle due prove.



Nei primi istanti della sperimentazione con rinterro di sabbia la portata persa risulta nulla. Ciò è dovuto all'accurata compattazione eseguita intorno alla condotta. Successivamente, la perdita cresce pressoché linearmente fino ad un valore che si mantiene costante, per l'erosione

intorno al foro. L'acqua ha raggiunto il p.c. dopo 3 minuti e ha creato un battente idrico dopo circa 6 minuti.

La prova con calcestruzzo cellulare è durata più a lungo in quanto l'acqua ha raggiunto il p.c. dopo 6 minuti ed ha impiegato più di 10 minuti per creare un battente idrico sul piano campagna.

Mentre la perdita nella sabbia cresce fino a circa 1l/s, la perdita nel calcestruzzo cellulare non supera i 0.5 l/s. I due dati non sono però direttamente confrontabili in quanto è necessario tener conto del fatto che nella prova con calcestruzzo cellulare la pressione applicata è più elevata che nella prova con sabbia. Con la stessa pressione la perdita sarebbe stata ancor minore.

In conclusione si è visto che l'utilizzo del calcestruzzo cellulare, oltre ai vantaggi suddetti:

- riduce la portata di un'eventuale perdita;
- non presenta segni di erosione dovuti alla perdita, verificatasi nelle sabbie per quanto compattate;
- permette una completa saturazione del volume di calcestruzzo con risalita verticale dell'acqua, che consente:
 - di non creare erosione nei terreni circostanti in quanto c'è una forte dissipazione di energia all'interno del calcestruzzo cellulare;
 - di individuare velocemente la perdita.

Calcestruzzo cellulare con aggregati leggeri di briciole di gomma

L'ultima applicazione studiata è l'utilizzo di pneumatici triturati come inerti leggeri per la produzione di calcestruzzo cellulare.

Gli pneumatici fuori uso vengono riutilizzati come materiale attraverso triturazione meccanica per la produzione di briciole di gomma usate nella miscela per la produzione di isolanti e manufatti vari.

L'utilizzo di tale materiale come inerte leggero per il calcestruzzo presenta l'evidente vantaggio ambientale di offrire un'ulteriore possibilità di riutilizzo di un materiale difficile da smaltire. È però necessario indagarne le proprietà per valutarne eventuali impieghi.

Nella sperimentazione si vuole valutare la capacità smorzante del calcestruzzo cellulare con gomme. Una possibile applicazione potrebbe essere ad esempio l'utilizzo come materiale per la costruzione di massetti di fondazione per macchine vibranti, nel caso di necessità di smorzamento delle vibrazioni.

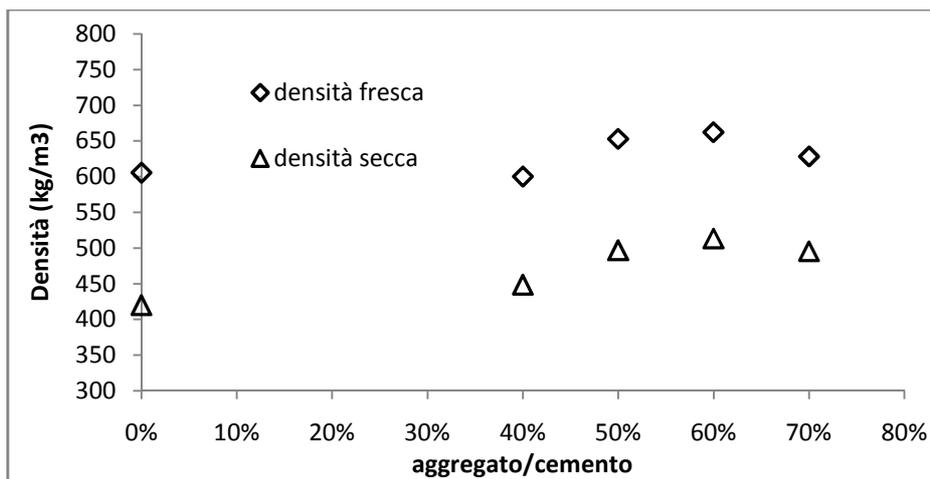
A tal fine si è deciso di eseguire delle prove di colonna risonante, che consentono di valutare il modulo di taglio e il damping di un materiale al variare del livello deformativo. Per valutare l'effetto smorzante delle gomme è stato fatto variare il rapporto inerte/cemento fissando la densità del calcestruzzo cellulare senza inerti a 600kg/m^3 . Per ogni miscela sono stati preparati 6 campioni. Noti i volumi necessari e la densità da riprodurre è stato possibile fissare le quantità di cemento, acqua e schiuma per la preparazione di ogni miscela.

cemento (kg)	0.250
acqua (l)	0.125
schiuma (l)	0.375
concentrazione schiuma	2.5%
densità schiuma (g/l)	70

Il calcestruzzo cellulare è stato disposto in fustelle preparate appositamente per tali campioni.

All'interno è stato disposto un foglio di acetato per facilitarne l'estrazione.

La densità fresca del calcestruzzo è stata misurata in contenitori di volume noto. Si riportano graficamente la densità fresca e la densità dopo essiccamento in forno per 24 h.



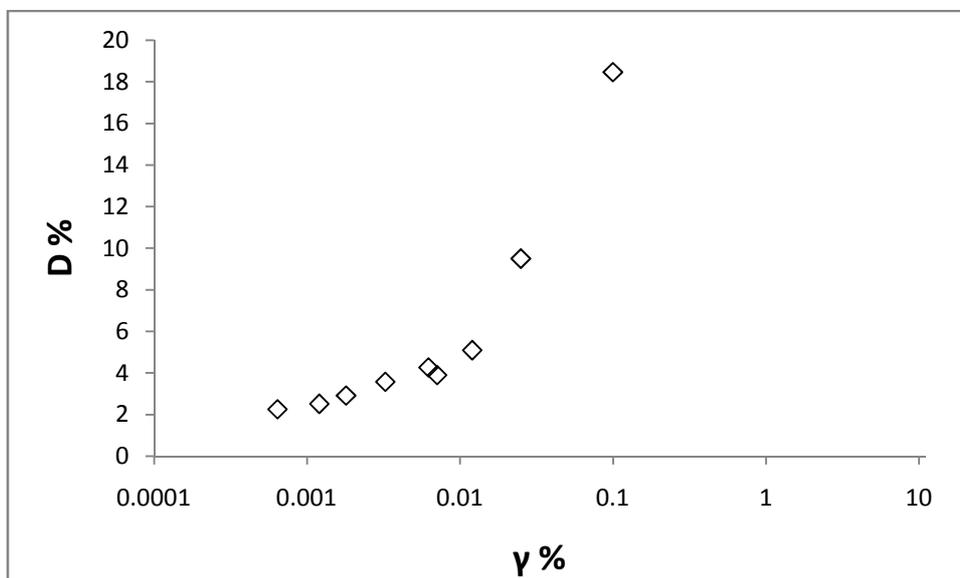
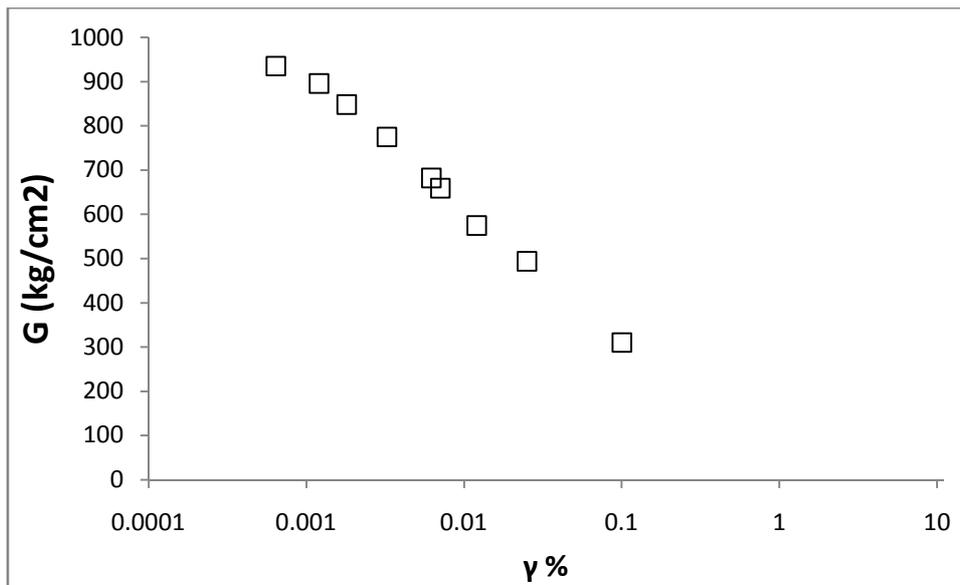
Si può notare che l'aggiunta di inerti causa dei lievi incrementi di densità, a conferma della capacità delle gomme di intrappolare bolle d'aria ed accrescere la porosità riducendo la densità.

Dopo 20 h il calcestruzzo risultava indurito tanto da poter estrarre i campioni. Sono mostrati i campioni a rapporto inerte/cemento crescente.



È stata quindi preparata la macchina di colonna risonante. Il provino è stato incastrato alla base incollandolo con una resina bicomponente.





Dai risultati si può notare come il calcestruzzo cellulare senza inerte abbia già buone capacità smorzanti con un damping del 2% tipico delle argille; presenta inoltre la rigidezza tipica di una roccia tenera. È stata eseguita quindi una prova su un campione con rapporto ponderale gomma/cemento del 70%. Il materiale risulta meno rigido, mentre lo smorzamento cresce al 3%. Per quanto il risultato sia positivo, l'obiettivo è raggiungere smorzamenti dell'ordine del 10%.

	0%	70%
G₀ (kg/cm²)	936	277
D₀ %	2.26	3.01
γ_{max} %	0.1	0.4