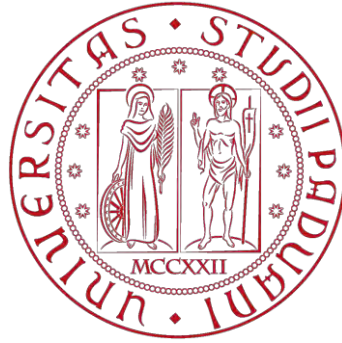


*A questi anni
e ai miei angeli,
e a chi pensa a me*



UNIVERSITA' DEGLI STUDI DI PADOVA

DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA CIVILE EDILE ED AMBIENTALE

TESI DI LAUREA MAGISTRALE IN INGEGNERIA CIVILE

**ANALISI SPERIMENTALE DEL COLLASSO DI
MATERIALE GRANULARE IN REGIME PENDOLARE**

Relatore: Prof. Fabio Gabrieli

Correlatore: Prof. Andrea Santomaso

Matricola: 1041264

Laureanda: Elisa Corà

ANNO ACCADEMICO 2014-2015

Indice

Introduzione	I
Capitolo 1 – Materiali granulari	1
1.1 Considerazioni generali	1
1.2 Regimi di saturazione	2
1.3 La tensione superficiale e i ponti capillari	4
Capitolo 2 – Materiali, strumenti e metodi	11
2.1 Materiali	11
2.1.1 Palline di vetro	11
2.1.2 Carbonato di calcio	11
2.2 Strumenti	12
2.2.1 Vibrovaglio	13
2.2.2 Cella shear	14
2.2.3 Tomografo	17
2.2.4 Apparato sperimentale 1	19
2.2.5 Apparato sperimentale 2	23
2.3 Sviluppo delle prove sperimentali	25
2.3.1 Prova sperimentale 1	25
2.3.2 Prova sperimentale 2	28
2.4 Analisi d'immagine	30
Capitolo 3 – Risultati sperimentali prova di collasso	33
3.1 Dinamica del collasso	33
3.1.1 Dinamica a secco di un materiale ideale	34
3.1.2 Dinamica a umido di un materiale ideale	37
3.2 Relazioni empiriche	38
3.3 Risultati delle prove	40

3.3.1 Palline di vetro	40
3.3.2 Carbonato di calcio	53
3.3.3 Confronto tra i due materiali	64
Capitolo 4 – Risultati sperimentali prova di taglio	73
4.1 Resistenza a taglio	73
4.2 Risultati delle prove	76
4.2.1 <i>Palline di vetro</i>	77
4.2.2 <i>Carbonato di calcio</i>	81
4.2.3 <i>Confronto tra i due materiali</i>	88
Capitolo 5 – Risultati sperimentali prova di evaporazione	91
5.1 Risultati della prova	91
Conclusioni	95
Bibliografia	99

Introduzione

Il problema affrontato in tale tesi riguarda lo studio del comportamento di materiale granulare in condizioni di parziale saturazione, con l'obiettivo di approfondire le conoscenze nella creazione di ponti capillari tra i granuli del materiale considerato, e l'effetto che ne crea in esso.

In particolare, ci si è concentrati nell'illustrare il collasso del materiale, un problema che ha assunto un ruolo sempre più rilevante nelle attività di ricerca, soprattutto in ambito civile e geotecnico che recentemente ha ampliato i suoi studi riguardanti il cedimento di masse granulari con particolare attenzione al fenomeno delle frane.

L'obiettivo principale è quello di riuscire a descrivere il deposito finale attraverso le sue grandezze caratteristiche in modo tale da poter valutare l'effetto del materiale impiegato e della quantità di liquido aggiunto. Nello specifico, ci si propone di capire la variazione dei dati ottenuti, e quali possono essere le cause che portano a certi risultati finali, verificandoli attraverso l'applicazione di formule empiriche che leghino le singole caratteristiche del deposito finale (lunghezza raggiunta, lunghezza e altezza iniziale del provino, lunghezza del materiale che non ha eroso).

Nello specifico, dopo un'introduzione a carattere teorico riguardo il fenomeno della formazione delle forze capillari per materiali granulari, si è passati all'esecuzione di prove sperimentali e non, eseguite presso il laboratorio del Dipartimento di Ingegneria Chimica, al fine di espandere lo studio del fenomeno in un complesso più ampio, per valutare al meglio la caratterizzazione delle forze che si creano, e cosa esse possono comportare.

Nel primo capitolo della tesi ci si propone di esporre la parte teorica riguardo ai ponti capillari e la tensione superficiale, sui quali si basa tutto il lavoro che è stato svolto in laboratorio, utilizzata come punto di partenza per le valutazioni successive.

Nel secondo capitolo si presentano gli strumenti utilizzati per la preparazione dei campioni e per l'analisi degli esperimenti, ed i metodi con i quali questi sono stati effettuati; inoltre sono trascritti i materiali utilizzati, e il programma con il quale si è svolto il successivo lavoro di analisi per i dati ottenuti dalla prova di collasso eseguita in laboratorio.

Nel terzo capitolo vengono illustrati i risultati sperimentali ottenuti dalla prima prova sperimentale eseguita, riportando i dati (uniti a risultati analizzati in studi precedenti) ed

inoltre i grafici, illustrando l'andamento delle varie grandezze caratteristiche in funzione sia della dimensione delle particelle del campione, sia della percentuale in peso di liquido aggiunto. Inoltre, si descrivono le formule empiriche adottate per l'elaborazione dei dati, con rispettive considerazioni.

Nel quarto capitolo sono esposti i risultati ottenuti dalla cella shear anulare, cioè l'attrito e la coesione, valutati nelle stesse percentuali di liquido considerate per la prova di collasso, ed unendo dati di altri studi già seguiti. Anche in questo caso, sono stati riportati grafici rappresentanti l'andamento delle due grandezze considerate, al variare delle dimensioni del materiale e della quantità di acqua inserita.

Infine, nel quinto capitolo sono descritti i risultati ottenuti dalla seconda prova sperimentale, ossia la prova di evaporazione, valutati attraverso opportune osservazioni, in relazione a tomografie eseguite al fine di studiare nella completezza il fenomeno di formazione dei ponti capillari.

Capitolo 1

Materiali granulari

1.1 Considerazioni generali

Quando si dà la definizione di materiali granulari, ci si riferisce a sistemi composti da un numero estremamente elevato di particelle macroscopiche; tali materiali sono molto comuni sia nell'ambiente naturale, sia nelle attività quotidiane: i cereali, il sale, la ghiaia, la sabbia, le polveri, i detriti ne sono esempi particolarmente diffusi, e si può affermare che sono, dopo l'acqua, tra le maggiori sostanze con cui l'uomo viene a contatto nella sua vita quotidiana.

Una loro caratteristica fondamentale è il fatto che le particelle costituenti, per quanto a volte possano essere molto piccole, sono sempre di dimensioni macroscopiche (dell'ordine cioè delle centinaia di μm , dei mm o anche dei cm): questa proprietà ha conseguenze importanti sul loro comportamento (spesso non intuitivo), ed è una delle cause principali delle difficoltà che si riscontrano nel costruirne una teoria sistematica e completamente soddisfacente.

Un'ulteriore caratteristica che li descrive, è che possono essere considerati come dei sistemi a temperatura nulla, in quanto la loro energia tipica è di molti ordini di grandezza maggiore rispetto all'energia termica. A causa del gran numero di particelle di cui sono formati, potrebbe sembrare naturale applicare la meccanica statistica, considerando come costituenti elementari i grani; tuttavia, poiché questi ultimi sono di dimensioni macroscopiche, le loro interazioni sono dissipative (vale a dire che l'energia, a livello macroscopico, non si conserva) e questo rende molto più difficile applicare loro le metodologie usate con successo nello studio dei gas e dei liquidi.

Si sottolineano inoltre comportamenti peculiari nei processi di mescolamento: se consideriamo infatti due gas (o liquidi) diversi, inizialmente separati da un setto, notiamo che una volta rimossa la parete che li divide si ha un rapido mescolamento, al termine del quale diventa praticamente impossibile separare nuovamente i due gas; al contrario, due polveri diverse, se ben miscelate, possono essere comunque separate facendo vibrare opportunamente il recipiente che le contiene, mentre il loro mescolamento è assai difficile da realizzare, come è ben noto in alcuni settori come l'industria farmaceutica.

Si può affermare come ulteriore definizione di tali materiali, che possono essere definiti come aggregati naturali polifasici costituiti da uno scheletro solido, formato da particelle di forma e dimensione diversa sul quale agiscono le forze di contatto, e da vuoti riempiti da aria e acqua in diversa proporzione. La parte solida è costituita da frammenti di roccia e da particelle

minerali, risultato dell'alterazione fisica, chimica e biologica delle rocce e dei processi di trasporto e sedimentazione, e possiede aspetti meccanici di rigidità e resistenza molto elevate; l'acqua, se presente nei vuoti, possiede una elevata tensione superficiale, e sembra risultare come fluido incomprimibile, non in grado di trasmettere sforzi tangenziali, mentre l'aria presenta un certo grado di comprimibilità, e solitamente entra in equilibrio termodinamico con il fluido.

Non sono applicabili le regole di omogeneizzazione, come già precedentemente anticipato, utilizzate per determinare proprietà di miscele, sospensioni o gas reali; questa condizione deriva dalla rigidità dello scheletro e dalla deformabilità dei gas, ed inoltre, dalla non linearità della risposta meccanica dei fenomeni dissipativi che si formano, ma difficili da quantificare.

1.2 Regimi di saturazione

Nella realtà, si può definire il terreno (esempio tipico di materiale granulare) come un sistema trifasico, identificato cioè da tre fasi distinte, che risultano essere solida, liquida e gassosa; in particolare, a seconda della quantità di liquido presente in un sistema di tale tipo, si possono osservare condizioni di parziale saturazione oppure avere un materiale parzialmente secco.

In generale, la condizione di saturazione può essere classificata in cinque regimi, corrispondenti a cinque diverse condizioni fisiche del materiale granulare, ed ogni regime differisce dall'altro in base alla quantità di liquido aggiunto al sistema. Questi si classificano come:

- Stato secco: si identifica con un grado di saturazione nullo, quindi con l'assenza totale di acqua, e le forze prevalenti risultano essere quelle di contatto, oltre a quelle di gravità;
- Stato pendolare: è lo stato in cui l'aggiunta di liquido è minima, con un grado di saturazione dallo 0 al 5%, in cui si vede la formazione di ponti capillari singoli che sfruttano la tensione superficiale, per cui risultano condivisi da coppie di grani, considerando quindi oltre alle forze di contatto e di gravità, anche quelle di natura capillare che si sono create;
- Stato funicolare: è lo stato in cui l'aggiunta di liquido risulta maggiore, e il grado di saturazione varia dal 5 al 30%; può essere identificato come lo stato di transizione tra il precedente e il successivo. In questo caso i ponti liquidi risultano essere condivisi tra più particelle, portando al raggruppamento di tre o più di esse, ottenendo strutture complesse;

- Stato capillare: il grado di saturazione, con ulteriore aggiunta di liquido, oscilla tra il 30 e il 90%, creando un dominio liquido connesso con bolle d'aria, e avendo quindi una situazione nella quale le particelle risultano immerse nel liquido che occupa tutto lo spazio interparticellare, e tutte le particelle risultano legate da ponti capillari;
- Stato saturo: tutti i vuoti del materiale risultano pieni di liquido, e quindi il grado di saturazione va dal 90 al 100%. Se è presente dell'aria in esso, risulta essere disciolta parzialmente nel liquido.

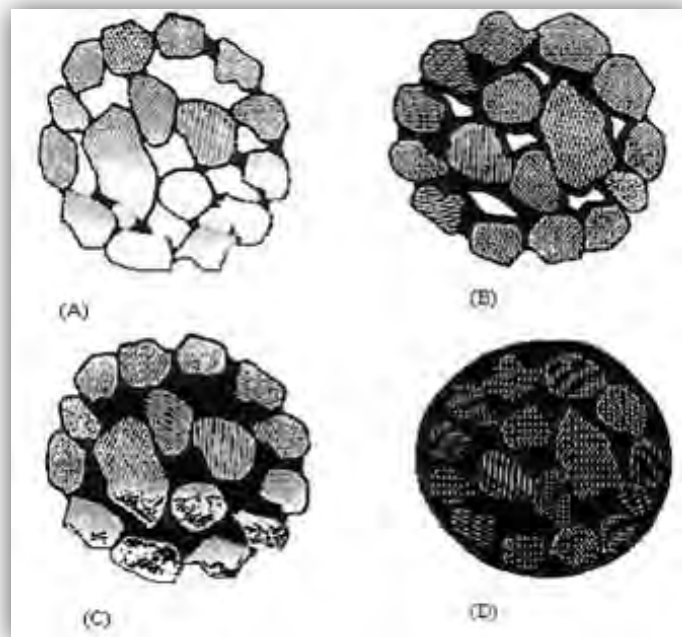


Figura 1.1: Stati di saturazione di un sistema solido-liquido. Si osservano gli stati pendolare (A), funicolare (B), capillare (C) e saturo(D).

Da un punto di vista micromeccanico, ad ogni stato corrispondono un set di forze, che sono state poco fa menzionate, e risultano essere prevalenti tra le singole particelle; la forza di gravità è presente in ogni stato, e rappresenta la forza di massa di ogni singola particella; dipende dalla densità del solido, dalla sua dimensione, ma anche il liquido risulta esserne soggetto. Le forze di contatto sono quelle forze che si scambiano i grani del materiale nel contatto tra esse, e possono avere direzione ed intensità variabili. Infine, le forze capillari: si creano per effetto della tensione superficiale del liquido, in equilibrio con la pressione del gas, ed anche esse possono avere direzione ed intensità variabili, come le forze di contatto. Ultima tipologia di forze che si possono presentare in condizioni di saturazione capillare, e materiale totalmente saturo, è il trascinalamento: trasmissione di forze che avviene dal liquido alle particelle nel caso in cui siano presenti gradienti di pressione.

1.3 La tensione superficiale e i ponti capillari

Nella precedente descrizione delle condizioni di saturazione di un materiale granulare, si è data la nozione di “ponti capillari”, intesi come microscopici volumi d’acqua che aderiscono alla superficie delle particelle, anche se queste non sono a contatto con loro, ed assumono una forma stabile creando un particolare stato di trazione; quando la tensione superficiale del liquido e l’adesione solido-liquido impedisce al fluido di defluire sotto l’azione di forze esterne, il ponte è formato, e nel materiale aumenta la coesione. La forza che si crea tra le particelle dipende dalla tensione superficiale, andando ad aggiungersi all’effetto di attrito interparticellare; essa, esplicitata nella formula seguente, include l’effetto delle particelle e contiene la quantità di liquido aggiunto (*De Fanti, 2011/2012*):

$$F_c = (\pi \cdot x \cdot \gamma \cdot \cos \varphi) / (1 + 2,1 \cdot k^{1/2} + 10 \cdot k) \quad (1.1)$$

in cui l’angolo φ rappresenta l’angolo di contatto tra il materiale granulare e il liquido, mentre γ è il valore della tensione superficiale del liquido.

Al denominatore si nota la presenza di un fattore k definito come:

$$k = (s^2 \cdot x) / V \quad (1.2)$$

in questo modo si considera il fatto che le particelle tra cui si formano i ponti (considerate in questo caso particelle ideali, quindi delle sfere) non sono a contatto tra loro, ma esiste una certa distanza s (Fig. 1.2); inoltre, tale fattore, permette di parametrizzare la forza dovuta alla capillarità in base al volume V di liquido presente, che va a formare i ponti (*Iveson et al.2002*).Da tale formulazione si considera, che F_c sia tale da aumentare al crescere del volume V , e al diminuire della distanza s , assumendo un valore costante per $s=0$.

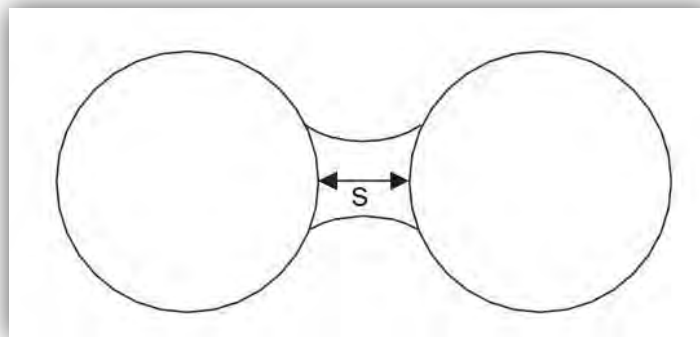


Figura 1.2: Due particelle sferiche tra cui si forma un ponte capillare sono distanziate di una certa distanza s , il cui valore è difficilmente determinabile

Si sottolinea che l'aggiunta di liquido porta alla presenza di una ulteriore forza di natura viscosa, che si oppone al moto (*De Fanti, 2011/2012*):

$$F_v = ((3 \cdot \pi \cdot \mu_L) \cdot (ds/dt)) / (2 \cdot s) \quad (1.3)$$

in cui μ_L rappresenta la viscosità del liquido, (ds/dt) risulta essere la velocità di allontanamento della semidistanza tra le due particelle, mentre il valore r è calcolato come media armonica tra i diametri di due particelle sferiche, tra le quali si forma il ponte capillare (Fig. 1.3). In tale caso la forza capillare presenta una comunque una certa dipendenza da r , tale per cui al diminuire di esso, la capillarità aumenta.

$$r = (x^{-1} + x^{-2}) \quad (1.4)$$

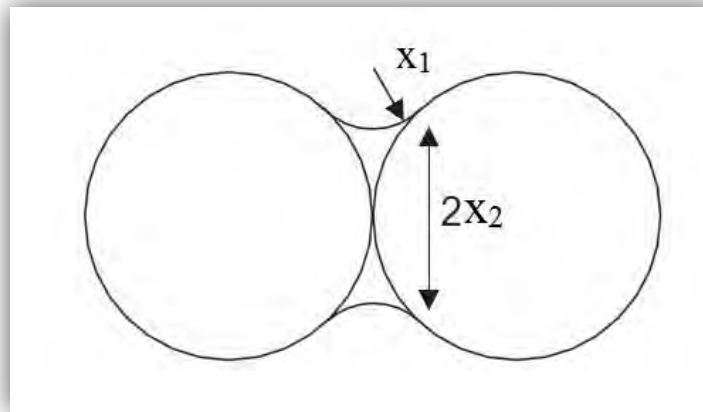


Figura 1.3: Rappresentazione del ponte capillare tra due particelle. I valori x_1 ed x_2 influenzano la forza del ponte capillare.

Nella rappresentazione dei ponti capillari è ampiamente diffusa l'approssimazione per la quale si considerano solamente ponti che si costituiscono tra due singole particelle (caso di “stato pendolare”); nelle situazioni reali, tuttavia, sono frequenti casi in cui l'aggiunta del liquido porta a legami più complessi tra più particelle. Di fatto, quando si crea un ponte, si genera una depressione dovuta alla curvatura di esso, che a sua volta è dovuta all'angolo di contatto tra il liquido e il materiale; la fase fluida che lega le particelle (ipotizziamo sferiche) assume una forma a simmetria cilindrica con asse la congiungente dei centri delle sfere o il centro della sfera con la normale al piano, ma ciò che viene a crearsi solitamente non è un cilindro, e dipende soprattutto dalle proprietà chimico-fisiche delle tre fasi del materiale, oltre che dal volume di quella liquida, dalla forma e dal tipo di superficie cui aderisce, dalla loro distanza reciproca, dalla differenza di pressione e dall'angolo di contatto ϕ (1.1). Questa

“sensibilità alla forma” nella creazione del ponte, è tipica per i liquidi, ed è legata dalla proprietà di tensione superficiale. Il fenomeno può inoltre essere spiegato, ragionando sulla scala delle molecole d’acqua presenti nel fluido: esse sono dotate di una certa polarità, che comporta una forza di attrazione tra loro, dovuta al fatto che la molecola presenta una parte con carica positiva ed una parte con carica negativa, e quindi tutte le molecole del fluido tendono a disporsi in modo da massimizzare le forze di attrazione; in particolare, per le molecole più interne la risultante delle forze reciproche è nulla, in quanto le singole forze sono simmetriche e si fanno equilibrio, mentre per quelle in prossimità dei bordi del fluido è diretta verso l’interno producendo una compressione del fluido stesso. Ne risulta che in condizioni di equilibrio, la superficie viene a trovarsi in uno stato particolare, grazie al quale il liquido si comporta come se fosse avvolto da una sottilissima pellicola elastica tesa.

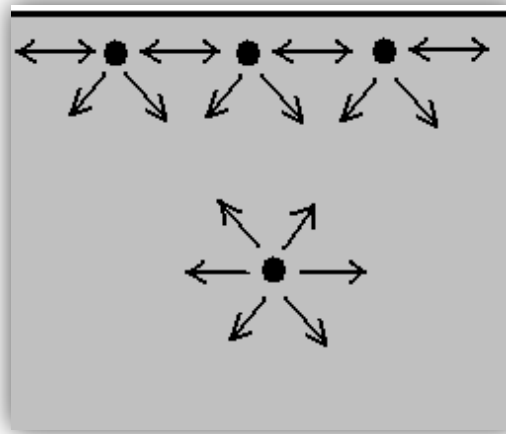


Figura 1.4: Interpretazione microscopica del fenomeno della tensione superficiale

Manifestazioni della tensione superficiale, di esperienza quotidiana, sono la tendenza dei liquidi ad assumere forma sferica (esempio della formazione delle gocce d’acqua); un corpo non bagnato da un liquido, e quindi non soggetto alla sua adesione, può stare a galla anche se la sua densità è maggiore di quella del liquido. Si sottolinea che quando un liquido bagna una superficie solida si formano tre interfacce: solido-liquido, solido-gas e liquido-gas; ognuna delle interfacce esercita la propria tensione, diretta verso il suo interno.

In generale, la tensione può essere definita come densità superficiale di energia di legame, all’interfaccia tra un corpo continuo e un materiale di altra natura, ad esempio un solido, un liquido o un gas; non è quindi assimilabile dimensionalmente ad una tensione (definita invece come densità superficiale di forza).

Dal punto di vista meccanico è nota come una forza per unità lineare (N/m) che tiene uniti i lembi di un ipotetico tagliato praticato sulla superficie libera di un fluido, ovvero (*Tono, 2011/2012*):

$$\gamma = \frac{dF_s}{dl} \quad (1.5)$$

dove dl è la lunghezza di un tratto infinitesimo del taglio e dF_s è la forza infinitesima perpendicolare al taglio giacente sulla superficie; integrando lungo il suo bordo, quindi, si può calcolare la forza che si produce la tensione.

Si può ricavare la stessa definizione tenendo conto che una lamina liquida tende spontaneamente a raggiungere una configurazione di minima superficie, per cui la tensione si definisce come:

$$\gamma = \frac{dL}{dS} \quad (1.6)$$

dove dL è il lavoro compiuto contro le forze di tensione per ottenere un aumento infinitesimo dS della superficie della lamina liquida. La tensione così definita può essere espressa anche come un'energia per unità di superficie, e risulta compiere un lavoro positivo se si ottiene un aumento di un'area di interfaccia (che tende quindi a contrarre).

Si può quindi riscrivere la relazione precedente come:

$$\gamma = \frac{dE}{dS} \quad (1.7)$$

esprimendo dE come l'incremento di energia associato all'incremento dS . Continuando a rimanere in termini di energia, è possibile descrivere l'energia totale E_t di un liquido reale (che presenta un certo grado di viscosità) in condizioni di quiete, come combinazione un'energia di massa E_g ed un'energia di superficie E_s (*Sandalo*):

$$E_t = E_g + E_s = \int_V \rho \cdot U \cdot dV + \int_S \gamma \cdot dS \quad (1.8)$$

dove U è la forza di volume, ρ la densità del fluido, γ la tensione superficiale del fluido, V il suo volume ed S la superficie che lo contiene (separazione liquido-gas). Se la forza di volume coincide con la forza peso, allora:

$$E_t = \rho \cdot V \cdot g \cdot z_G + \gamma \cdot S \quad (1.9)$$

con g come accelerazione di gravità, e z_G la quota del baricentro identificato nel fluido, a seconda di dove è contenuto; il secondo termine può essere trascurabile in caso di grandi quantità di fluido.

L'espressione 1.9 varia nel caso in cui si tratta dell'adesione superficiale, ossia:

$$E_t = \rho \cdot V \cdot g \cdot z_G + \gamma \cdot s + a \cdot S' \quad (1.10)$$

dove S rappresenta sempre la superficie di separazione liquido-gas, S' la superficie di separazione liquido-solido, ed a il coefficiente di adesione liquido-solido (N/m); in questo caso la 1.10, nel calcolo dell'energia totale del fluido, prende in considerazione anche l'interfaccia mista liquido-solido rispetto all'equazione 1.9.

Come già sottolineato, quando due particelle solide condividono una fase liquida, l'equilibrio del sistema non è generalmente soddisfatto, ed emergono forze attrattive o repulsive: se le forze di attrazione reciproca fra le molecole di acqua sono dominanti rispetto alle forze con cui le stesse molecole sono attratte da quelle del solido (o se queste sono addirittura di repulsione), allora i fenomeni all'interfaccia liquido-solido sono analoghi a quelli all'interfaccia liquido-gas, e la configurazione di equilibrio 1.10 risulta soddisfatta con la minimizzazione di S ed S' , la formazione di un menisco dalla forma convessa, ed una adesione a maggiore rispetto alla tensione γ ; se invece le forze di attrazione liquido-solido prevalgono rispetto alle forze di attrazione reciproca delle molecole del liquido, allora il liquido tende ad aderire alle pareti e la superficie libera del fluido forma un menisco concavo, con un coefficiente di adesione a negativo.

Nel particolare caso di un ponte capillare che si forma tra due particelle di forma sferica, la forza che si origina, come già detto, è dovuta alla componente di tensione superficiale agente all'interfaccia liquido-solido, e alla pressione idrostatica di Laplace all'interno del ponte; tale pressione può essere repulsiva o attrattiva.

In letteratura esistono tre approcci alla soluzione di tale problema (*Sandalo*):

- Soluzione della legge di Young-Laplace, che consiste nel risolvere un problema al contorno contenente l'espressione della geometria della superficie dei menischi e le condizioni al contorno, studiando il legame tra la curvatura e la differenza di pressione;
- Soluzione del problema di minimo dell'energia, ovvero dell'equazione 1.10;
- Soluzione dell'equazione di Kelvin.

La soluzione più comune nello studio della forma dei menischi, si concentra nello studio del ponte liquido tra due sfere uguali, poiché non esiste nessuna soluzione in forma chiusa per

questo problema, è comunque possibile studiare molte altre correlazioni derivate dalla letteratura del passato.

E' stato evidenziato e confermato sperimentalmente, per una vasta gamma di volumi capillari, che la forza di attrazione capillare diminuisce con la distanza, fino a un certo divario s_f per cui il ponte si rompe; questa distanza critica è funzione del volume V e dell'angolo di contatto φ (Lian et al.):

$$s_f = (1 + \varphi/2) \cdot V^{1/3} \quad (1.11)$$

D'altra parte, la distanza critica in cui un dato volume di liquido può formare un ponte capillare è (Gabrieli, Artoni, Santomaso, Cola, 2013):

$$s_c = \frac{12 \cdot V}{\pi \cdot \left(1 + \frac{1}{1 - \cos \varphi}\right)} \quad (1.12)$$

È possibile ricavare il valore di forza di attrazione capillare massima, per una distanza $s = 0$ tra le particelle, per cui risulta costante e indipendente dal volume del liquido (De Fanti, 2012):

$$F_c = 2\pi \cdot r \cdot \gamma \cdot \cos \varphi \quad (1.13)$$

Riassumendo quindi, il ponte capillare che si va a formare tra due particelle è vincolato ad un insieme di possibili forme, e la sua stabilità è controllata da una condizione di equilibrio tra la pressione nella fase liquida e la pressione dell'aria, in funzione della geometria della superficie solida e delle proprietà di interfacce fisiche.

Nel nostro lavoro di tesi è stato concentrato nello studio di terreni in granulari, e non solo, in condizioni di stato pendolare, con un grado di saturazione quindi che oscilla tra lo 0 e il 5%, per il quale i ponti che si formano sono condivisi da coppie di particelle. Lo studio affrontato può riferirsi a situazioni generali che possono accadere, come l'evento di una frana, con la sua profondità che ne può derivare, e relativa superficie di estensione.

Capitolo 2

Materiali, strumenti e metodi

In questo capitolo si analizzano i materiali che sono stati utilizzati per le prove, e lo svolgimento nel dettaglio di esse, riprendendo materiali che altre tesi hanno già studiato (*De Fanti 2011/2012, Sandalo*) e valutato con l'utilizzo di ulteriori apparecchiature, per poter raggiungere al meglio gli obiettivi finali.

2.1 Materiali

Per l'esecuzione delle prove sono stati usati due diverse tipologie di materiale, al fine di caratterizzare gli effetti di alcune proprietà di essi.

2.1.1 Palline di vetro

Si è partiti adoperando delle sfere di vetro di diametro 750-1000 μm , quindi non monodispersi, come è stato trattato in altri studi precedenti, di cui saranno ripresi i dati successivamente; questa condizione non comporta un effetto nullo riguardo alla distribuzione di dimensione all'interno del campione, e l'attrito che si va a creare probabilmente non risulta essere uguale per ogni coppia di sfere.

L'utilizzo delle palline ha notevoli vantaggi nella descrizione dei fenomeni, soprattutto nel caso umido: sono dotate di una certa porosità e rigonfiamento, dovuto all'assorbimento del liquido all'interno dei pori, che risulta nullo; questo fatto garantisce che tutto il liquido aggiunto al campione viene utilizzato per la formazione dei ponti capillari.

Di seguito si riportano le proprietà caratteristiche del materiale.

Tabella 1.1: Proprietà delle palline di vetro

Diamentro [μm]	750-1000
Densità [kg/m^3]	2532
Φ [$^\circ$]	24

2.1.2 Carbonato di calcio

Un altro materiale utilizzato è stato il carbonato di calcio proveniente da cava; per ottenere un'analisi completa del comportamento di tale materiale gli esperimenti sono stati concentrati su quattro diverse granulometrie ottenuto mediante l'utilizzo del vibrovaglio (Fig. 2.1).

A differenza delle palline di vetro, il carbonato, presente in grandi quantità in natura, non ha caratteristiche che possono permettere delle semplificazioni, in quanto le particelle non presentano una forma regolare, ma sono tutte diverse tra loro, e la sua porosità tende ad assorbire il liquido aggiunto.



Figura 2.1: *Granulometrie di carbonato utilizzato*

Nella tabella sono riportate le caratteristiche delle quattro frazioni di carbonato:

Tabella 2.2: *Frazioni del carbonato di calcio utilizzate*

Frazioni	Diametro minimo [μm]	Diametro massimo [μm]	Diametro medio [μm]
1	800	1000	900
2	1180	1410	1295
3	1410	2000	1705
4	2000	2830	2145

2.2 Strumenti

Gli strumenti che sono stati impiegati sono stati distinti in due categorie: la prima prende in considerazione il vibrovaglio, utilizzato da altri studenti per poter suddividere le varie frazioni dei campioni di carbonato di calcio a partire dal materiale a disposizione, di cui si riporta la descrizione del suo utilizzo; inoltre sono comprese la cella shear, che permette di caratterizzare i materiali restituendo i valori caratteristici di ognuno e la tomografia, che valuta il grado di omogeneità della distribuzione del liquido nei materiali.

Nella seconda categoria si descrivono invece le apparecchiature sperimentali, e quindi le nuove metodologie verificate e analizzate.

2.2.1 Vibrovaglio

Usato per poter separare le varie frazioni di carbonato da analizzare per le successive prove. Il vibrovaglio utilizzato è il modello *RETSCH® AS200 control g*. Tale setacciatore deve il suo funzionamento ad un sistema elettromagnetico che produce un movimento oscillante tridimensionale in grado di muovere il materiale al suo interno in modo equivalente su tutta la superficie utile.

Ogni vaglio è costituito da un cilindro all'interno del quale è presente una maglia metallica rettangolare che seleziona le particelle in base al loro diametro (Fig.2.2). I vagli che sono stati usati partono da un diametro massimo di circa 2500 μm , fino ad un minimo di 400 μm ; in questo intervallo sono incluse tutte le frazioni d'interesse; il diametro di setaccio è definito in modo tale da poter rappresentare la dimensione massima di una particella che può attraversare la maglia del setaccio (Fig. 2.3).



Figura 2.2: Esempi di vagli

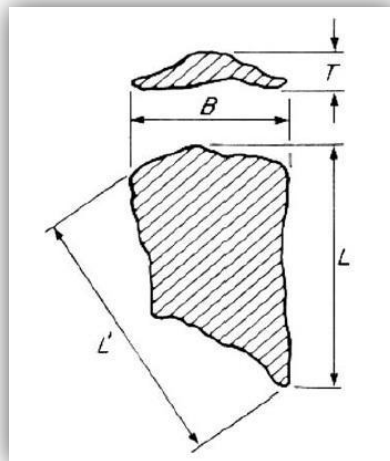


Figura 2.3: Rappresentazione schematica di una particella di carbonato

L'operazione di vagliatura avviene sovrapponendo i vari vagli e aggiungendo il materiale da setacciare in piccole quantità. Dopo avere impilato i setacci, il campione di solido viene adagiato sul piatto superiore, che è rappresentato dal setaccio a maglia più larga; i piatti inferiori sono costituiti da setacci a maglia via via più fine, e il piatto alla base della colonna è costituito da una scodella piana, in cui vengono raccolti tutti i granuli con diametro minore dell'apertura della maglia del setaccio più basso. La colonna di setacci viene generalmente appoggiata su uno scuotitore meccanico, chiamato appunto "vibrovaglio"; quest'ultimo scuote la colonna per un determinato lasso di tempo, in modo da selezionare il materiale nelle varie frazioni trattenute in ciascun piatto.

Per garantire la bontà dei campioni, la vagliatura è stata effettuata in due stadi successivi, di cui nel primo il materiale è stato vagliato per 8 minuti, ottenendo così una granulometria grossolana del materiale, e nel secondo stadio è stata utilizzata come frazione di partenza la frazione presente nel piatto corrispondente a quella desiderata.

Si sottolinea nuovamente, che per le prove condotte successivamente, il materiale utilizzato è stato lo stesso, derivante direttamente da studi precedenti (*De Fanti 2011/2012, Sandalo*), che hanno accuratamente vagliato il carbonato, e studiato il materiale in condizioni diverse da quelle condotte in tale tesi, ma comunque i dati risultanti sono stati legati tra loro.

2.2.2 Cella di shear

Tale strumento ha lo scopo di calcolare grandezze caratteristiche di ogni campione selezionato, come la coesione e l'angolo d'attrito.

Il modello, presente nel laboratorio del dipartimento di ingegneria industriale, è il BROOKFIELD® PFT, il quale permette di ottenere risultati in formato digitale mediante il software Powder Flow Pro V 1.2. (Fig. 2.6)

La cella è di forma anulare, ed è costituita da un coperchio diviso in settori, che viene posizionato sopra al porta campione su cui si esercitano degli sforzi normali prestabiliti (Fig. 2.4).



Figura 2.4: Coperchi della cella shear



Figura 2.5: Porta campione della cella shear

L'esecuzione della prova consiste nella rotazione del porta campione rispetto al coperchio, in modo da produrre sforzi di taglio, fino al raggiungimento della rottura. Ogni singola prova analizza il comportamento del materiale sottoposto a cinque diversi carichi normali, ed applica inoltre uno sforzo di taglio che applica di conseguenza una torsione; tuttavia, dopo ogni sforzo di taglio che provoca cedimento, è necessario annullare i carichi che hanno già agito sul sistema, e si procede quindi con il "pre-shear" che consiste nel portare il sistema nelle condizioni iniziali in modo da annullare l'effetto degli sforzi precedentemente applicati. Tale procedimento è totalmente automatizzato, ma aumenta i tempi necessari per l'analisi. I materiali sono stati studiati per diverse granulometrie e diverse percentuali di aggiunta d'acqua, con una durata della prova fino ad un massimo di 45', diversa a seconda del materiale analizzato e con le sue rispettive condizioni.

I risultati che è possibile ottenere sono diversi, ed il programma permette inoltre di analizzare grafici contenenti le seguenti proprietà:

- Ricostruzione dei cerchi di Mohr, e quindi studio dello stato tensionale, con valori di angolo di attrito interno (ricavabili dalle pendenze delle rette tangenti ai cerchi e rappresentanti la resistenza limite), coesione c , tensione normale σ e tensione al taglio τ (Fig. 2.7);
- Ricostruzione del Flow Function Graph (grafico della funzione di flusso), con i risultati delle tensioni f_c (tensione normale principale calcolata in condizioni di materiale non confinato presente quindi in superficie, corrispondente ad un

cerchio di mohr nascente dall'origine) e delle tensioni normali principali σ_1 ottenute dalla prova;

- Ricostruzione del Friction Angle Graph (grafico dell'angolo di attrito), che mette in relazione l'angolo effettivo di attrito interno (calcolabile dalla pendenza della retta passante dall'origine e tangente nel punto più alto dell'ultimo cerchio di mohr risultante dalla prova) con le tensioni normali principali σ_1 registrate;
- Ricostruzione del Density Curve Graph (curva di densità), che relaziona la densità raggiunta dal materiale ad ogni applicazione di carico, in funzione delle tensioni normali principali che si sono manifestate nel provino σ_1 .



Figura 2.6: Cella shear

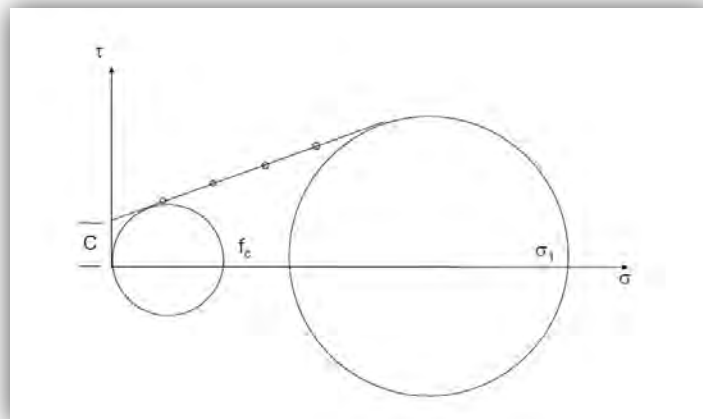


Figura 2.7: Diagramma dei cerchi di Mohr

2.2.3 Tomografo

Si tratta di uno strumento scanner a microtomografia a raggi X (Skyscan 1172) usato per poter acquisire una certa conoscenza riguardo la distribuzione del liquido all'interno dei materiali, e quindi analizzare in maniera più approfondita la creazione e suddivisione dei ponti capillari tra le particelle (Fig. 2.8).



Figura 2.8: SkyScan 1172 Micro CT

La fase di sviluppo di questa prova prevede una preparazione del campione da sottoporre all'analisi, molto simile sia per il carbonato che per le palline di vetro.

Nel caso delle palline di vetro, si è eseguita la scannerizzazione su particelle da 2000 μm , bagnate con una quantità di liquido dell'1%, mescolando manualmente il materiale, per un peso di secco di 200 gr con una soluzione al 9% di KI (ioduro di potassio) in acqua distillata; la scelta è ricaduta sul KI per le sue proprietà x-ray a contrasto, e per una tensione superficiale leggermente superiore a quella dell'acqua pura, dando un effetto sulle forze capillari ritenuto trascurabile. Successivamente una piccola porzione di materiale (circa 20 gr) è stata versata in un porta campioni cilindrico, e introdotto nell'apparato tomografico, eseguendo la scansione.

Per il carbonato invece sono state analizzate due granulometrie: 800/1000 μm e 2000/2830 μm , ma con un aggiunta superiore di liquido, e cioè del 4%; si è come nel caso precedente proceduto alla miscelazione manuale liquido-solido, per un tempo di circa 30 s, in modo da garantire una corretta distribuzione del liquido, e poi è stato inserito anch'esso nello stesso porta campioni, e sottoposto ad analisi.

A fine prova, il tomografo ha restituito, tramite software, delle immagini che sono in grado di fare una ricostruzione tridimensionale del provino, analizzando tre diversi gruppi di porzioni adiacenti di esso, situati rispettivamente nella parte superiore, al centro, e vicino al fondo del

campione, per poter valutare la distribuzione dei ponti liquidi che si sono andati a formare; per ciascuna porzione (dove sono state valutate circa 80 particelle) sono stati analizzati i contatti “particella-particella”, arrivando a due conclusioni diverse a seconda del materiale (Fig. 2.9):

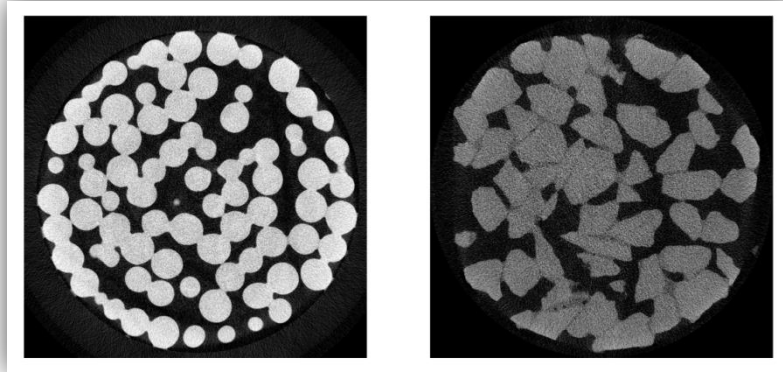


Figura 2.9: Esempi di scansioni per palline di vetro da $2000\ \mu\text{m}$ con 1% di acqua. e di carbonato di calcio $2000\text{-}2830\ \mu\text{m}$ con 4% di acqua.

per le palline di vetro, grazie alla loro superficie liscia e regolare, è possibile osservare chiaramente la formazione dei ponti, constatando che solo il 4% dei contatti non ha sostenuto un ponte liquido (Artoni, Santomaso, Gabrieli, Tono, Cola, 2013); nel caso del carbonato invece, a causa della forma irregolare delle particelle e di asperità sulla loro superficie, non si riesce a valutare se il contatto “particella-particella” è stato in grado di generare un ponte. Quindi, al fine di poter essere in grado anche per questo materiale di poter valutare la formazione di eventuali forze capillari, sono state seguite due scansioni, sullo stesso campione: la prima è stata eseguita sul campione bagnato, secondo le condizioni prima indicate, mentre la seconda ha previsto la scansione sul campione essiccato, osservando così la disposizione del liquido grazie ad una sottrazione delle immagini (Fig. 2.10).



Figura 2.10: Processo per l'identificazione liquido : 1) immagine di esempio a umido; 2) campione secco ; 3) immagine ottenuta per sottrazione contenente il contributo che contiene solo acqua

Si nota che grande attenzione è stata rivolta per evitare qualsiasi movimento relativo delle particelle, prima e dopo l'essiccazione del materiale, per poter al meglio valutare i ponti nell'operazione di analisi di differenza delle immagini; il campione infatti non è stato rimosso dallo strumento scanner, facendo evaporare il liquido presente in modo spontaneo, per un periodo di 48 h.

La scansione dell'intero campione è durata 4 h e 13', con una temperatura nella camera dove è stato posizionato il provino di carbonato di 29° - 30° C; a tal proposito, una ulteriore prova, a carattere sperimentale, è stata condotta in condizioni simili e non, per poter studiare in modo più approfondito la percentuale di acqua evaporata durante la prova, che verrà descritta più avanti, concludendo comunque tale percentuale è risultata di un valore circa del 15% per entrambe le granulometrie.

2.2.4 Apparato sperimentale 1

Per quanto riguarda la strumentazione utilizzata a carattere sperimentale, è stato pensato di svolgere la prima prova grazie ad un canale di forma rettangolare, composto da lastre di vetro trasparenti di lunghezza pari a 35 cm, altezza di 12 cm e poste ad una distanza di 5 cm; una lastra di vetro di 5 x 15 cm è stata usata come parte mobile per poter svolgere la prova, creando così nel canale una piccola porzione in cui si carica il materiale, per un volume di 7 cm di lunghezza, altezza pari ad 8 cm, e profondità pari a 5 cm (Fig. 2.11 e Fig. 2.12).

La scelta del vetro trasparente ha permesso di osservare la dinamica del fenomeno e l'aspetto finale del deposito che è stato ottenuto e studiato ad ogni prova.

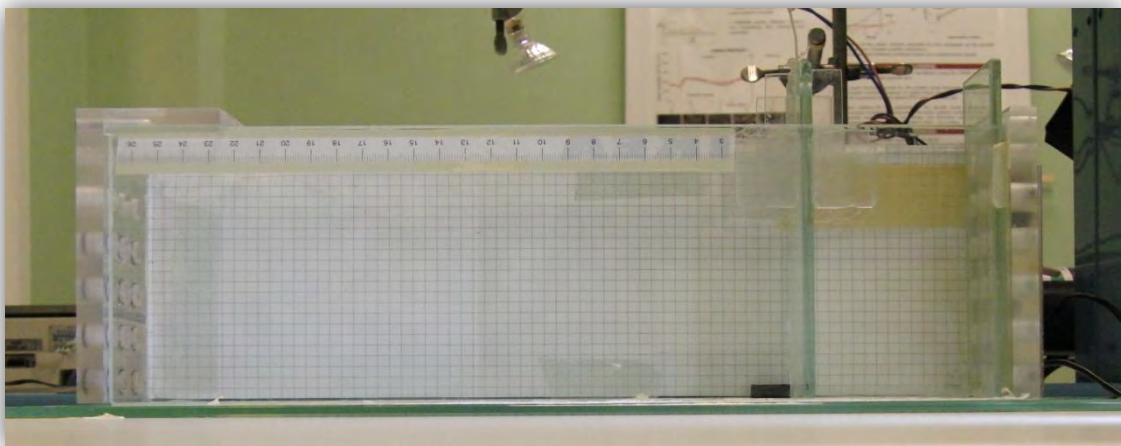


Figura 2.11: Vista frontale della cella sperimentale per l'esperimento di collasso

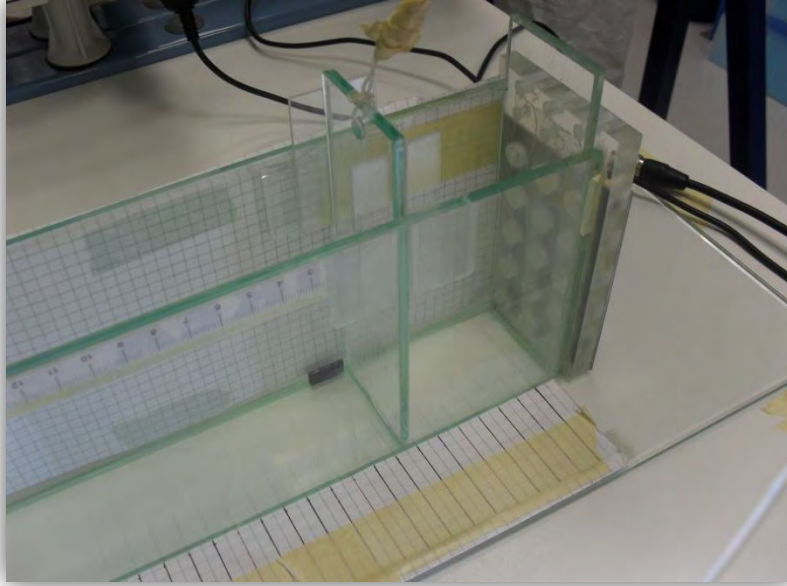


Figura 2.12: *Canale in cui viene inserito il materiale*

L'esperimento è consistito quindi nel sollevamento della paratia, grazie ad un filo passante in un foro praticato in essa e collegato ad un peso (Fig. 2.13), in modo da poter innescare la caduta del campione per effetto della gravità; il sistema di sollevamento creato ha previsto l'utilizzo di carrucola installata su un morsetto a sua volta collegato ad un asse metallico, per cui è stato fatto passare il filo, facendolo terminare in un ulteriore asse (Fig. 2.14): il peso è stato lasciato cadere all'inizio su un cuscino, posto inizialmente sopra ad uno scatolone, in modo tale da sollevare la paratia e applicare con buona approssimazione un'accelerazione costante, in condizioni di filo non completamente teso in modo tale da evitare eventuali tensioni.



Figura 2.13: *Parete mobile e peso usato per il sollevamento*



Figura 2.14: Sistema di morsetti e carrucole dell'apparato sperimentale

Per poter studiare in modo approfondito il profilo ottenuto da ogni singola prova, ed avere quindi una buona conoscenza degli esperimenti effettuati, è stata utilizzata una macchina fotografica digitale Casio EX-F1 montata su di un cavalletto e puntata perpendicolarmente alla cella di prova (Fig. 2.14, Fig.2.15 e Fig. 2.16).



Figura 2.15: Sistemazione cavalletto con macchina fotografica



Figura 2.16: Fotocamera digitale Casio EX-F1



Figura 2.17: Posizionamento della macchina rispetto alla cella sperimentale

Ogni prova è stata sottoposta da una serie di scatti in sequenza, in particolare la macchinetta è stata impostata per 30 fps a secondo, ottenendo in totale 60 foto in 2'', con un tempo di esposizione di 1/400 s ed una risoluzione di 2816 x 2112 pixel. L'analisi della sequenza di immagini ha consentito di monitorare l'evoluzione del comportamento del materiale granulare nel tempo, misurandone alcune caratteristiche-obiettivi della tesi, come il runout e gli angoli di pendenza, in ogni istante e in modo preciso. E' da notare che i fotogrammi acquisiti all'inizio dell'esperimento hanno permesso di apprezzare che il sollevamento della parete mobile non ha portato ad avere effetti sulla dinamica della prova, data la velocità di sollevamento molto rapida; inoltre, nelle prove bagnate alcuni gruppi di particelle sono stati trascinati verso l'alto, oppure sono rimasti incollati alle pareti laterali della cella, nella zona in cui è stato ospitato il volume di materiale all'inizio:

tale fenomeno non è stato possibile evitarlo, ma è sembrato non avere effetti globali nell'esperimento.

Sono stati sviluppati ulteriori scatti nello studio della prova, oltre allo sviluppo dei fotogrammi durante il sollevamento della paratia, cioè nella fase iniziale e finale, rispettivamente quindi l'istante in cui il materiale occupa il volume predefinito all'interno della cella prima del collasso, e l'istante in cui il materiale è totalmente collassato, grazie all'utilizzo di una fotocamera digitali compatta (SAMSUNG ES55).

L'acquisizione delle immagini è stata fatta in modo automatico, utilizzando il software previsto dalla fotocamera: questo ha permesso di avviare la fotocamera direttamente dal pc facilitando la partenza in simultanea dell'esperimento e della sequenza di foto.

2.2.5 Apparato sperimentale 2

Come precedentemente descritto, nello studio delle tomografie risultanti dalla scannerizzazione, è stato necessario nel caso del carbonato, effettuare due scansioni: in condizioni di materiale essiccato e in condizioni di materiale umido, contenente il 4% di liquido in esso. Secondo le successive differenze di immagini è stato possibile quindi, valutare il liquido presente all'interno campione.

Una ulteriore prova, a carattere sperimentale, è stata però considerata al fine di dare informazioni aggiuntive riguardo le condizioni di esecuzione delle tomografie: nello stesso intervallo di tempo in cui è stata eseguita la scansione di un provino (4 h e 13') è stata eseguita una prova di evaporazione, rispettivamente per carbonato 800/1000 μm e 2000/2830 μm con la stessa percentuale di liquido che è stato aggiunto per l'esecuzione della tomografia, per poter valutare al meglio la quantità di acqua persa durante l'intera scannerizzazione. Sono state anche riportate le stesse condizioni di temperatura, per un intervallo oscillante tra i 29° e 30°C.

Il materiale, inserito nel provino e sottoposto a evaporazione tramite aria calda uscente da un apposito bocchettone d'aria posizionato ad adeguata distanza, come sarà spiegato in seguito, è stato analizzato attraverso tre chiusure diverse del porta campione (Fig.2.17):

- Chiusura con una lastrina di plastica dello spessore di 1 cm, appoggiata semplicemente sopra all'apertura (Fig. 2.19);
- Chiusura sigillata tramite plastilina (Fig. 2.20);
- Chiusura sigillata con tappino di plastica, usato anche per la scansione (Fig. 2.21).

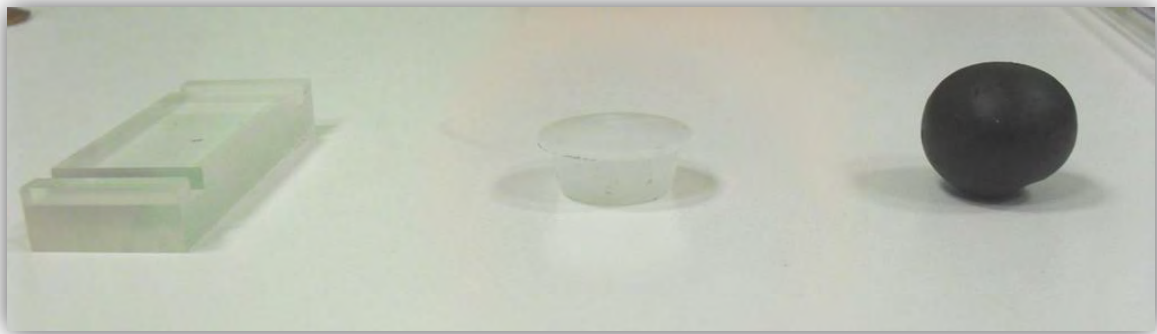


Figura 2.18: Tre tipologie di chiusure usate per la prova di evaporazione

Sono state effettuate misurazioni ad intervalli regolari a 0', 30', 60', 120', 180', 240' e 253', per i primi casi eseguiti; successivamente, per evitare disturbi del materiale, in particolare per

chiusura con il tappino di plastica usato anche nella scansione, le misurazioni sono state seguite ad inizio prova, e a termine prova (0' e 253').

Per ogni tipologia di chiusura sono stati riportate le percentuali risultanti, per entrambe le granulometrie.

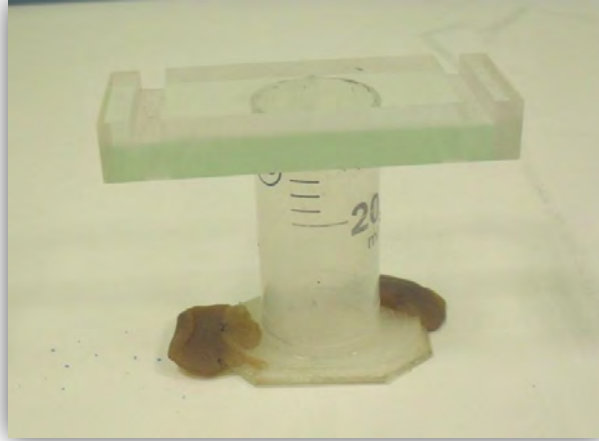


Figura 2.19: *Chiusura del portacampione con lastrina*



Figura 2.20: *Chiusura del porta campione con plastilina*



Figura 2.21: *Chiusura del porta campione*

2.3 Sviluppo delle prove sperimentali

Si riportano di seguito lo sviluppo delle varie prove sperimentali che sono state effettuate in laboratorio, per poter ottenere i dati caratteristici dei vari materiali analizzati, obiettivi della tesi.

2.3.1 Prova sperimentale 1

E' possibile poter riassumere la prova di collasso sperimentale in punti fondamentali:

- Preparazione del campione;
- Mescolamento del campione con le percentuali di liquido previste;
- Caricamento del materiale;
- Scatto del materiale in cella prima della fase del collasso;
- Caduta del peso con sollevamento della parete mobile, con contemporanea sequenza di scatti in 30 fps in 2'';
- Scatto del materiale collassato a termine prove;
- Eventuali scatti aggiuntivi con fotocamera aggiuntiva, con inquadratura da diverse prospettive e vista dall'alto.

Nello sviluppo di tale metodologia sperimentale, innanzitutto ci si è focalizzati sulla preparazione del campione: ogni materiale che è stato analizzato è stato precedentemente pesato su una bilancia in condizioni di secco (posto all'interno di un becker di cui si è sempre registrato la tara); il liquido aggiunto, calcolato in percentuale rispetto al materiale secco pesato, è stato aggiunto con l'ausilio di una siringa da 1 ml, in quanto le quantità di liquido inserito sono sempre risultate dell'ordine di pochi grammi (Fig.2.22 e Fig 2.23).



Figura 2.22: Bilancia di precisione usata per pesare i materiali

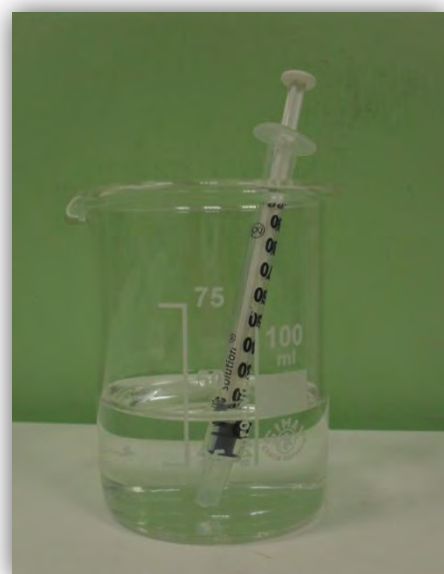


Figura 2.23: Becker e siringa utilizzati per il mescolamento tra granulare e liquido

Versato quindi questo, poco per volta, nel contenitore contenente il materiale, si è proceduto con il mescolamento attraverso l'utilizzo di una piccola spatola metallica, oppure di un cucchiaino, sempre metallico, per evitare l'assorbimento del liquido inserito; è utile osservare che dopo circa un minuto il mescolamento risulta sufficiente, ma nonostante ciò, si è scelto di effettuare l'operazione per alcuni minuti, in modo tale da raggiungere un certo grado di omogeneità.

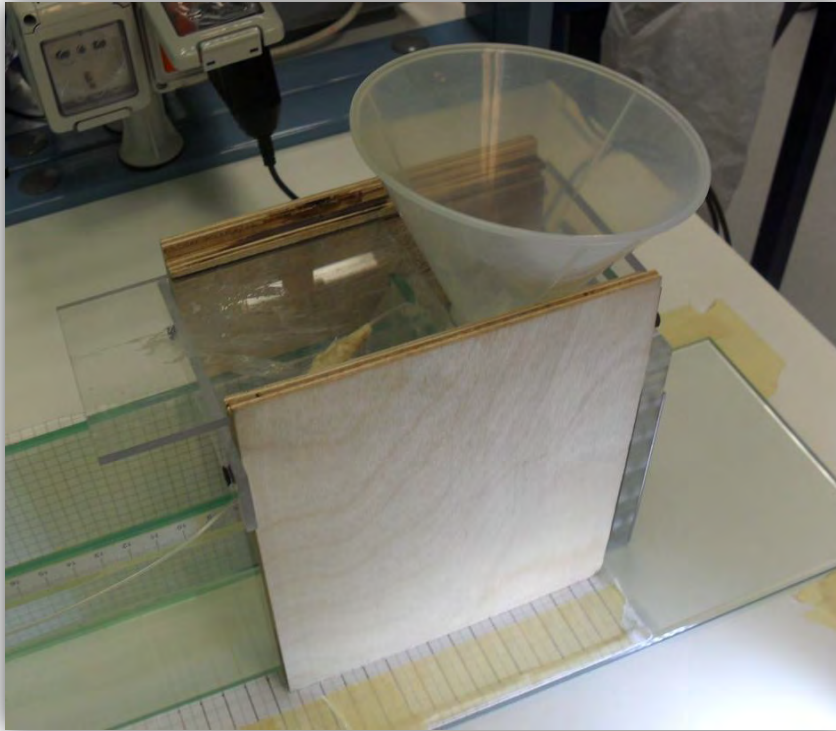


Figura 2.24: Sistema di inserimento del materiale nella cella

Terminata la fase di preparazione del campione si è proceduto al caricamento del materiale nella prevista apparecchiatura; a tal proposito è stato usato un sistema ad imbuto, progettato e realizzato da precedenti studenti, per evitare di perdere materiale in maniera eccessiva durante l'inserimento di esso nella cella di vetro. Il dispositivo prevede una composizione di due pareti di legno unite tra loro grazie ad un pezzo di plexiglass, e con un'ulteriore piccola lastra dello stesso materiale, scorrevole su due opportune guide create nelle pareti, alla quale è permesso di scorrere in modo da bloccare l'imbuto posizionato, permettendo così al materiale di scendere nel canale previsto nell'apparato sperimentale, dopo la miscelazione (Fig.2.24).

A questo il punto il sistema risulta pronto per essere azionato; dopo opportuno posizionamento della fotocamera sul treppiede, e relativa messa fuoco delle immagini, è stata scattata l'immagine iniziale. La fase successiva ha previsto la caduta del peso collegato alla parete mobile, avviando in contemporanea la modalità di scatto in sequenza della fotocamera;

in tale modo ha luogo l'esperimento, che ha riportato circa la durata di un arco tempo che si aggira intorno al secondo.

Per garantire che il sollevamento della parete mobile non influenzi l'esperimento, studenti precedenti hanno previsto, nella costruzione della cella, degli opportuni accorgimenti: per garantire una risalita verticale della parete e una sua posizione iniziale sempre rettilinea e uguale per ogni prova, sono state inserite due guide di plastica, rafforzate con ulteriori spessori di plexiglass, per ottimizzare ulteriormente tale condizione, in modo tale da non avere un oscillamento della parete una volta messa in movimento. Studi già fatti dichiarano che il tempo necessario perché la pareti si sollevi è pari a $1/20$ di secondo, mentre il tempo che è stato valutato perché si compia l'esperimento è di $16/20$ di secondo.



Figura 2.25: *Posizionamento del peso*

Raggiunta la configurazione finale del materiale, è stata scattata una ulteriore fotografia, da cui poi è stato possibile ricavare valori come gli angoli a riposo, o la lunghezza di runout.

A esperimento concluso si è proceduto alla pulizia della cella, per poterla preparare alla prova successiva, riposizionandola poi nella stessa postazione, ed essiccazione del materiale per poter togliere il liquido, in modo da evitare di indurre errori nelle verifiche successive. Per essiccare il materiale è stato utilizzato un forno elettrico, portato alla temperatura di 120° , per un tempo di circa $20'/30'$.

2.3.2 Prova sperimentale 2

Anche la prova di evaporazione sperimentale può essere riassunta in punti fondamentali:

- Preparazione del campione;
- Mescolamento del campione con la percentuali di liquido previste;
- Inserimento di circa 20 gr di materiale nel porta-campione;
- Pesatura dell'insieme "materiale/porta-campione/tappo";
- Posizionamento del provino in corrispondenza del bocchettone d'aria;
- Sistemazione del provino ad opportuna distanza per sottoporlo al giusto intervallo di temperatura (28°-29° C) tramite l'utilizzo di termometro al mercurio;
- Misurazione ad intervalli di tempo definiti;
- Misurazione finale e successiva rimozione del provino.

Come per la prima prova sperimentale, anche in questo caso fondamentale è stata la fase iniziale di preparazione del provino: i passaggi eseguiti sono stati esattamente gli stessi, e quindi non viene riportata nuovamente tale procedura, al fine di evitare eventuali ripetizioni; si precisa solamente, che a differenza della prova di collasso, in questo caso le granulometrie valutate sono state solamente due, ed esattamente le stesse che sono state analizzate tramite scansione, come già indicato, con una rispettiva percentuale di liquido del 4%, al fine di analizzare e valutare la quantità di acqua che, nell'esecuzione della tomografia, va persa, in quanto il materiale è sottoposto ad un certo intervallo di temperatura, che può causare per l'appunto evaporazione nel tempo di esecuzione della prova.

Terminata la preparazione del materiale, e inserito nell'apposito porta campione, questo è stato posizionato ad una certa distanza da un apposito bocchettone di aria, in grado di emettere calore (Fig. 2.26 e Fig. 2.27); in tali condizioni, con l'utilizzo di un termometro a mercurio, prima di mantenere nella posizione definitiva il provino, si è cercato di portare quest'ultimo alla giusta distanza rispetto al dispositivo in modo da sottoporlo ad un intervallo di temperatura compreso tra i 28° e 30°. A posizione trovata, inizialmente si è scelto di valutare il peso dell'insieme solido-liquido ad intervalli di tempo regolari, prima indicati, e tale condizione è stata rispettata per due tipi di chiusura scelte per il porta campione, e cioè tramite l'utilizzo della lastrina di materiale plastico (Fig. 2.19), ed anche per la chiusura sigillata con plastilina (Fig. 2.20); si nota che per ogni intervallo, oltre alla misurazione del peso del materiale che variava, è stato anche registrato l'andamento della temperatura, che, a causa del dispositivo utilizzato, non è risultata sempre costante, ma comunque compresa nell'intervallo previsto, di cui comunque si riporteranno i valori.

Per la chiusura con apposito tappo (Fig.2.21) che è stato usato anche nella scansione, le misurazioni invece sono state fatte solo all'inizio e alla fine, quindi ad inizio e termine prova, per evitare di recare disturbo al materiale; inoltre, per non avere dispersione di getto di aria calda, e concentrare questa in modo diretto verso il campione, esso è stato isolato attraverso l'utilizzo di pareti di cartone, al fine di avvicinarsi al meglio alle condizioni in cui è stato precedentemente inserito nell'apparecchio di scansione.

Le prove in totale eseguite sono state 8, e non 6, per una ripetizione nell'ultimo caso, causa taratura errata della bilancia.



Figura 2.26: *Dispositivo usato per la prova, con emissione di aria calda*

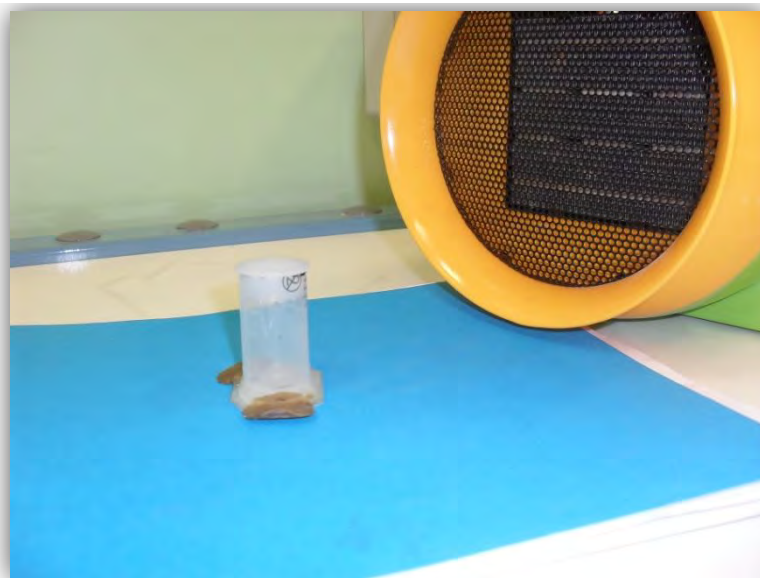


Figura 2.27: *Esempio di posizionamento del porta-campione rispetto al bocchettone d'aria*

2.4 Analisi d'immagine

Per poter elaborare i dati sperimentali della prova di collasso, che poi sono stati analizzati e studiati, è stato necessario acquisirli dalle immagini scattate durante l'esecuzione della prova. A questo scopo è stato utilizzato il programma Image J (Fig. 2.29): tale software ha consentito di tracciare delle linee, tali da ricostruire in modo approssimativo il profilo finale del materiale collassato, calcolando per ogni elaborazione l'opportuno rapporto di scala tra mm e px, e le definite lunghezze L . Il numero totale di linee tracciate per ogni studio sono state sei, di cui si sono calcolati quattro valori di lunghezza, denominati L_1 , L_2 , L_3 ed L_c , oltre a due valori di angoli, rispettivamente $\text{ang}L_1$ ed $\text{ang}L_2$; L_1 è legato alla parte statica della pila di materiale, composta principalmente da particelle che non si muovono, risultando come un processo di erosione del provino iniziale; L_2 include il contributo delle particelle che durante l'esperimento si sono spostate, ed L_3 rappresenta un effetto minore a causa dell'inerzia delle particelle superficiali che sono in grado di eseguire lunghe distanze, e nel caso di materiali con fluidità presente, viene ad essere costituito da grandi particelle separate.

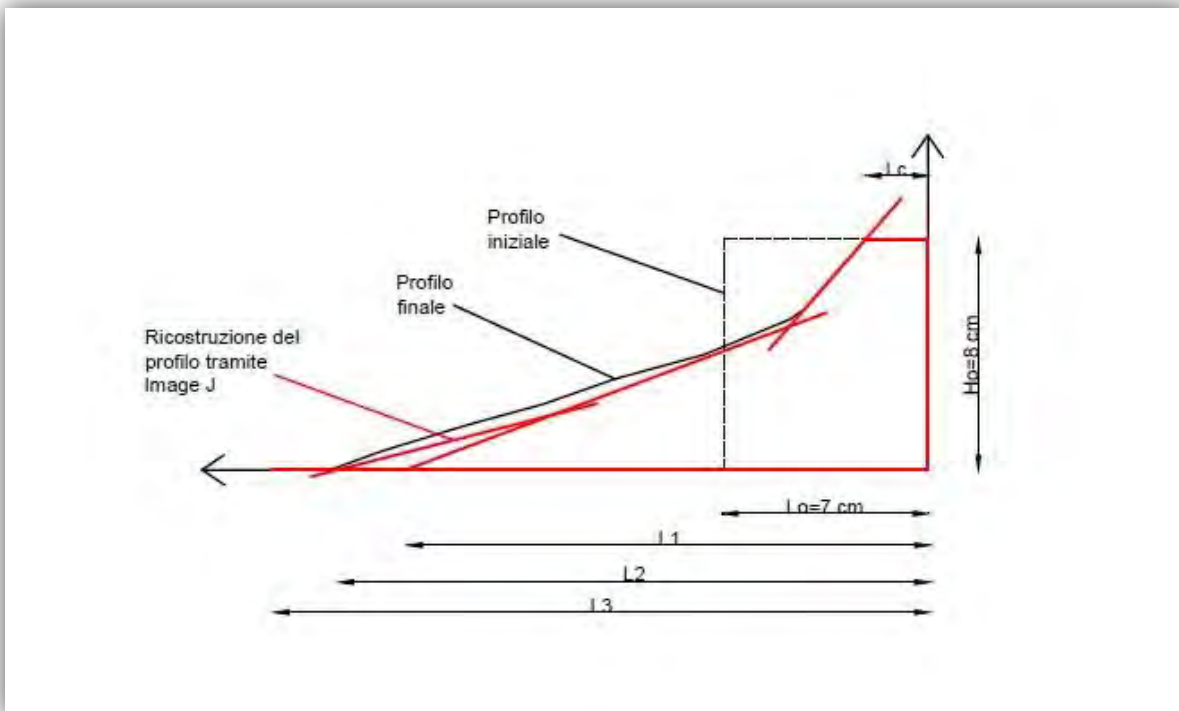


Figura 2.28: Schematizzazione delle lunghezze fondamentali calcolate dal software Image J

Le immagini analizzate hanno riguardato tutti gli scatti finali fatti per ogni materiale, con relative quantità d'acqua, e per tutte le prove che sono state sostenute per ogni singolo caso.

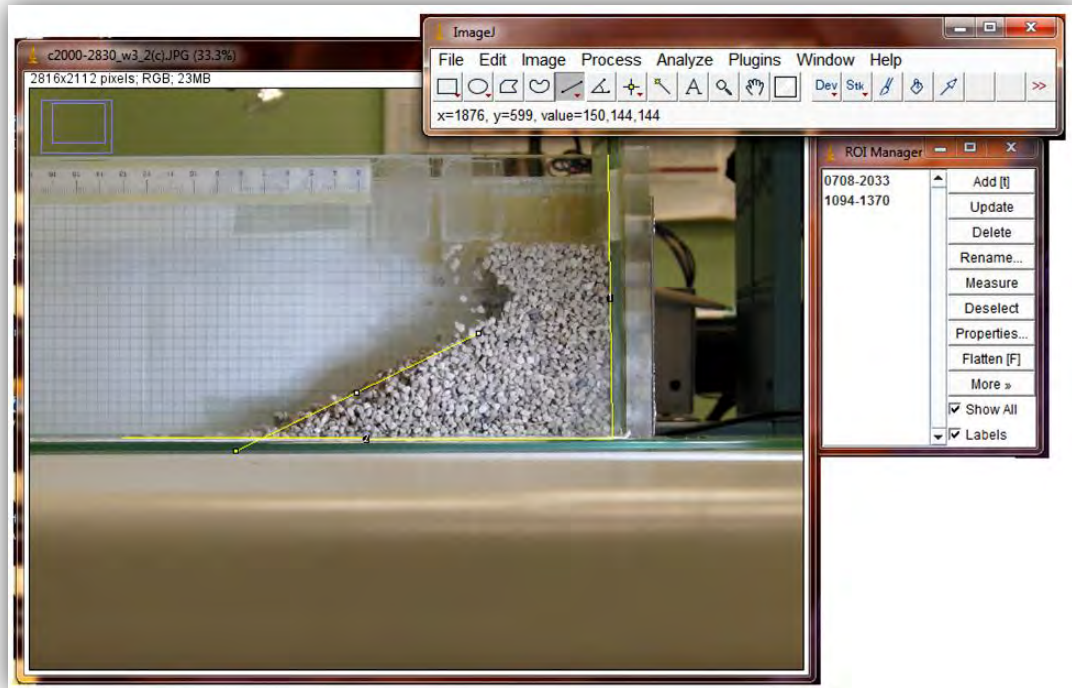


Figura 2.29: Rappresentazione del programma Image J, tramite il tracciamento delle linee

Ottenuti tali dati sono poi stati riportati in un foglio di calcolo excel, ed elaborati, come si vedrà nel capitolo 3.

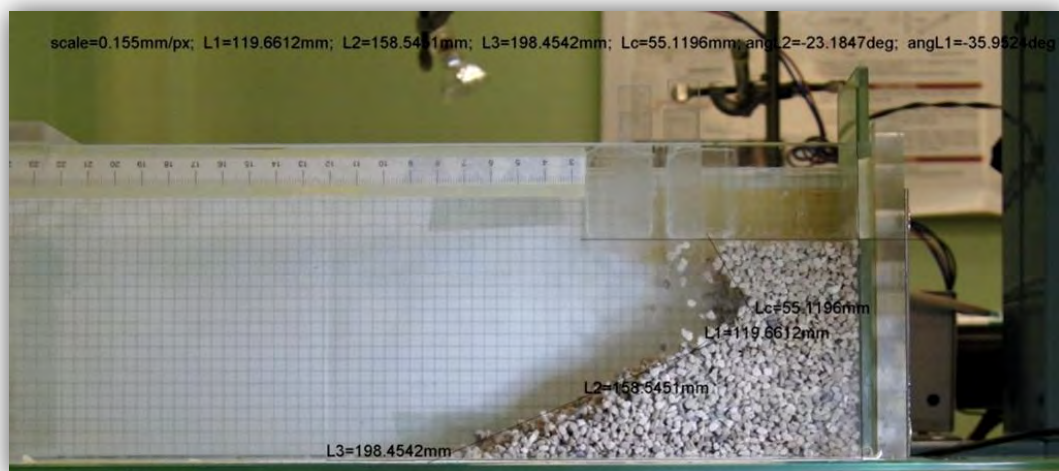


Figura 2.30: Risultati delle lunghezze $L1$, $L2$, $L3$ ed Lc che elabora il software

Capitolo 3

Risultati sperimentali prova di collasso

Si riportano di seguito i risultati e le relative analisi che sono state condotte per la prima prova sperimentale eseguita, con le relative considerazioni, e riprendendo, nel primo caso, dati e valori che sono già stati analizzati da elaborati di tesi precedenti, di cui, nel presente studio, sono stati utilizzati per una maggiore visione generale del problema, legandoli tra essi.

3.1 Dinamica del collasso

La difficoltà principale nella descrizione dei materiali granulari consiste nella impossibilità di definire con precisione una equazione di stato che permette di prevedere in modo esatto il comportamento di essi. Questo ha portato ad effettuare prove di laboratorio di carattere sperimentale per cercare di prevedere il comportamento di tali materiali utilizzando un approccio empirico, che prevede di individuare delle grandezze caratteristiche che influenzano la dinamica del moto e la configurazione finale della massa granulare,

Le grandezze caratteristiche che si vanno a valutare in letteratura sono principalmente:

- lunghezza percorsa dalla valanga normalizzata rispetto alla lunghezza iniziale, definita con il termine runout;
- l'angolo che si forma alla base della colonna;
- l'angolo che si forma alla sommità della colonna.

In tale tesi ci si è concentrati nello studio della prima delle grandezze appena descritte.

Molti articoli presenti in letteratura, si sono focalizzati sul materiale a secco, senza la presenza di alcun liquido, soprattutto trattando casi di utilizzo di palline di vetro monodisperse con caratteristiche particolari che rendono il materiale pressoché ideale, eliminando la maggior parte delle difficoltà che si riscontrano in sostanze granulari, ma possono essere considerati come punto di partenza per le successive considerazioni.

Nei presenti casi trattati. per le due tipologie di materiale scelte, si è analizzato sia la situazione di materiale secco, sia il caso di materiale umido.

Per ogni singola percentuale di liquido aggiunto, la prova ha previsto una ripetizione di tre volte, in modo tale da poter valutare la reperibilità dei risultati, ed evitare il rischio di errori dovuti ad un singolo esperimento eseguito in modo errato.

3.1.1 Dinamica a secco di un materiale ideale

Per poter definire la dinamica della prova di collasso, è necessario studiare la superficie lungo la quale si sviluppa il moto; tale inclinazione risulta essere pari a (Lube *et al.*, 2007) (Fig. 3.1):

$$\alpha = 45 - \varphi/2 \quad (3.1)$$

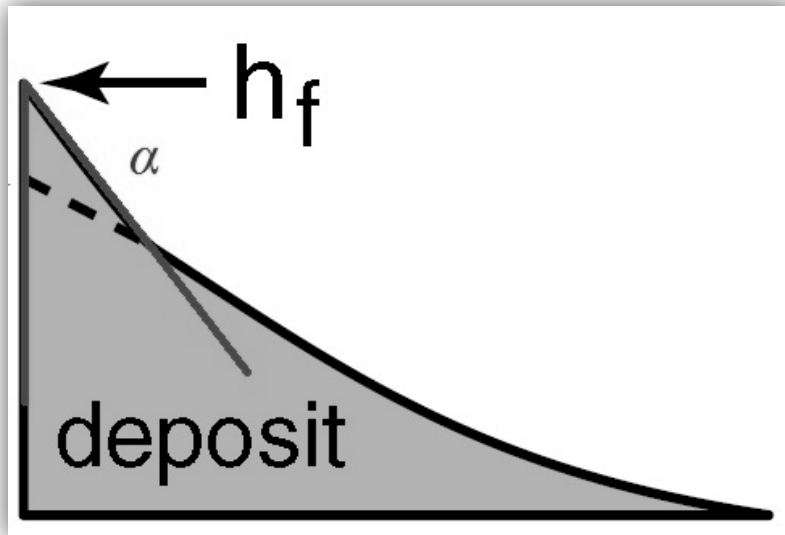


Figura 3.1: Rappresentazione dell'angolo alla sommità del deposito α

Come già definito, alcuni autori in letteratura hanno trattato tale caso di esperimenti di collasso, studiando il materiale in condizioni ideali e di secco, soffermandosi quindi su solamente forze di attrito del materiale, ed eventualmente di coesione, tipiche delle proprietà, senza tenere conto di una eventuale presenza di liquido, e delle caratteristiche che esso può portare a variare nei risultati della prova.

Una volta messo in movimento il materiale, è possibile individuare delle fasi distinte (E.Lajeunesse *et al.*, 2004): il primo stadio è denominato “spreading phase”, e vede interessato nel collasso maggior parte della colonna di cui esso fa parte; al termine, le particelle diminuiscono la loro velocità, a causa dell’attrito interno, portando ad una frenata del materiale. La seconda fase che è possibile studiare è chiamata “final avalanching phase”, ed è possibile rappresentarla come quella condizione in cui si osserva un movimento sulla superficie libera di piccoli gruppi di particelle, mentre nel complesso la massa risulta già essere ferma.

E’ importante sottolineare che nella prima fase è possibile definire un’interfaccia tra una zona di natura dinamica ed una di natura statica, che si propaga lungo la superficie superiore, e che inizialmente risulta essere concava; tuttavia con lo sviluppo del moto, tale interfaccia riduce la

sua concavità fino ad arrivare alla situazione finale in cui l'interfaccia tra lo stato dinamico e lo stato statico risultano essere parallele (Fig. 3.2)

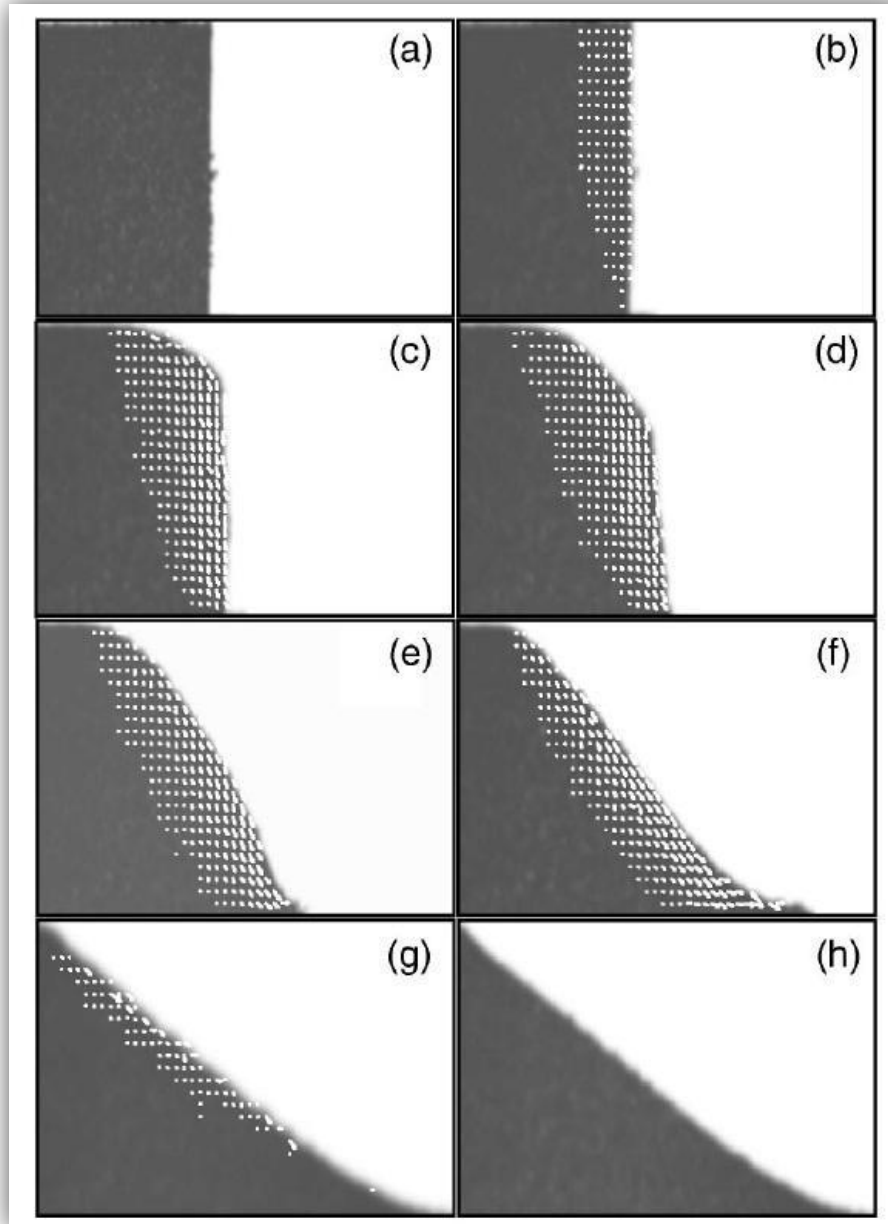


Figura 3.2: Rappresentazione dell'evoluzione del collasso. L'area tratteggiata indica la zona in cui si ha movimento

Col passare del tempo si osserva un aumento della distanza di runout raggiunto e un aumento di dimensione della zona statica. Si può affermare che in questa fase si ha il completo sviluppo del profilo di velocità, che poi progressivamente si riduce fino all'arresto del materiale (Fig. 3.3).

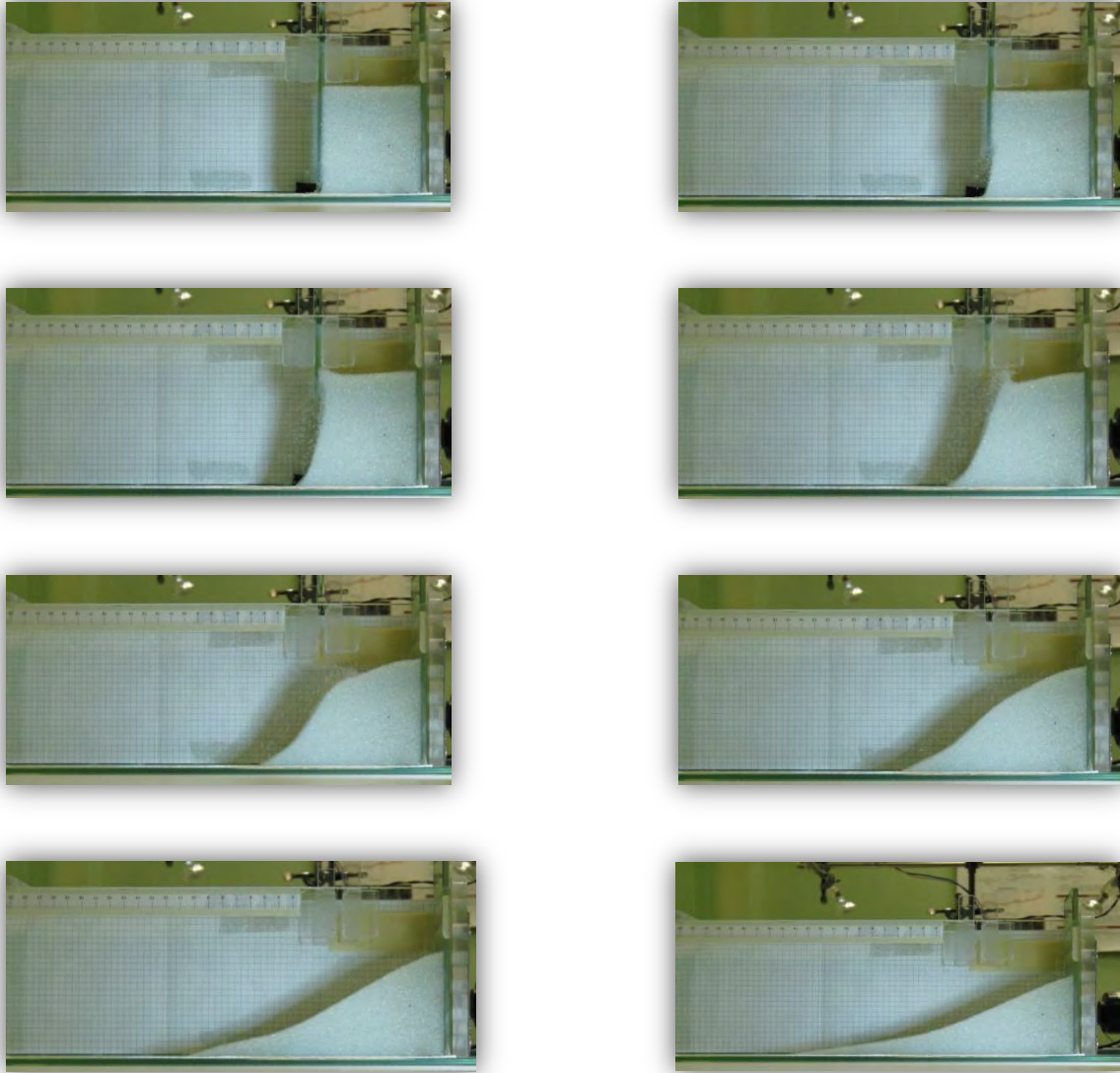


Figura 3.3: *Evoluzione del collasso di palline di vetro a secco, di diametro variabile 750-1000 μm*

Soffermandosi sull'evoluzione del collasso del materiale si nota come il profilo inizialmente coinvolge solo qualche diametro particellare ma con l'avanzare del tempo si sviluppa maggiormente, arrivando a coinvolgere sempre più particelle e restando comunque confinato sulla superficie della zona interfacciale statica/dinamica.

Alla fine di tale fase si esplica l'attrito interno e il materiale frena, riducendo la velocità; da precedenti studi analizzati è stato constatato che la transizione tra regime inerziale e il regime in cui domina l'attrito dipende dalle dimensioni delle particelle.

Terminata tale fase si assiste, come già detto, ad una massa nel complesso ferma, eccetto qualche particella in movimento.

Si nota che è stato trascurato l'effetto di rugosità della superficie inferiore dell'apparecchiatura.

3.1.2 Dinamica a umido di un materiale ideale

Nonostante la letteratura si sia soffermata in particolare negli studi di materiale a secco, è possibile esprimere delle relazioni, elaborate in fase di ricerca, ottenute dall'equilibrio del sistema particelle-menisco-particella, in grado di descrivere una forza normale di attrazione capillare, oltre a quelle menzionate al Capitolo 1 (1.1 e 1.3) ed eventuale forza viscosa che si oppone al moto.

E' possibile definire (Gabrieli et al. 2013):

$$F_{cap}(s, V) = - \frac{2\pi R \gamma \cos \phi}{1 + [s / 2d(s, V)]} \quad (3.2)$$

$$d(s, V) = \frac{s}{2} \left[-1 + \sqrt{1 + \frac{2V}{\pi R s^2}} \right] \quad (3.3)$$

dove R è il raggio della particella, s è la distanza interparticellare, ϕ l'angolo di contatto, V il volume del ponte e γ la tensione superficiale (Fig.3.4).

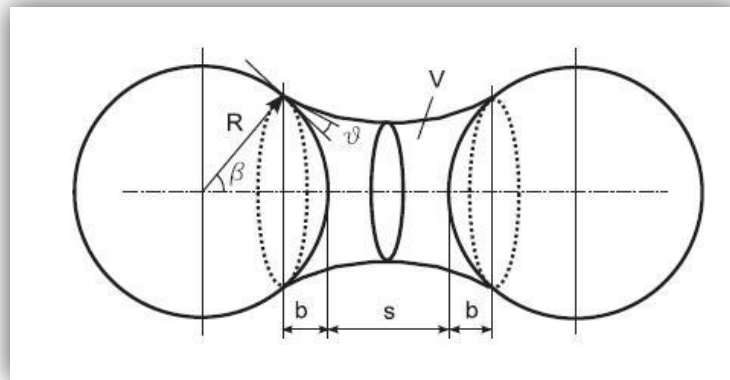


Figura 3.4: Geometria del ponte capillare tra due particelle sferiche

Nel caso di materiale bagnato il movimento complessivo della massa risulta limitato, e di una durata minore del caso secco nella dinamica dell'esperimento, conseguenze che derivano dalle forze coesive e interparticellari che si esplicano e che risultano essere opposte al moto (Tegzes et al., 2002). Ciò è dovuto dal fatto che il materiale, senza la presenza di un liquido, crea un flusso principale che risulta essere approssimabile ad un flusso continuo, in qualche modo paragonabile ad un fluido newtoniano, che per definizione è un fluido per cui la sua viscosità non varia con la velocità per cui viene misurata. Questa differente natura porta ad una difficoltà a descrivere la dinamica, in quanto il moto che si va ad ottenere è descritto da cluster che hanno forma diversa e dimensione; tale condizione è ancora più complicata se si

inizia a trattare materiali con particelle irregolari, dalle forme spigolose (come il carbonato) e con diametri diversi, quindi non uniformemente distribuiti. L'utilizzo della palline di vetro invece, comporta il vantaggio che è possibile considerare con buona approssimazione che tutto il liquido inserito è utilizzato per formare i ponti capillari, avendo una porosità che è nulla.

Anche in questo caso è stata comunque calcolata la lunghezza di runout, per mettere in luce il diverso comportamento dello stesso materiale, studiandone le conseguenze in base all'aggiunta de liquido, al variare della percentuale mescolata del liquido.

E' possibile comunque, in condizioni umide, valutare una descrizione ottimale del fenomeno attraverso il calcolo di un parametro adimensionale definito numero di Bond B_o : è il rapporto tra la forza di gravità e le forze coesive, ricavando così un comportamento del materiale (*De Fanti, 2011/2012*):

$$B_o = F_G / F_C \quad (3.4)$$

$$F_G = (\pi/6) \cdot g \cdot \sin \alpha \cdot \rho \cdot x^3 \quad (3.5)$$

$$F_C = \pi \cdot x \cdot \gamma \cdot \cos \varphi \quad (3.6)$$

Con α corrispondente alla pendenza dell'angolo in sommità (3.1), ρ la densità del materiale, γ è la tensione superficiale del liquido, e φ rappresenta l'angolo di contatto tra il materiale e il liquido.

In questo modo è possibile ottenere una descrizione del comportamento che tiene conto sia della configurazione iniziale dell'esperimento, sia delle caratteristiche del materiale utilizzato. In tale tesi ci si è soffermati all'utilizzo di relazioni empiriche ottenute da dati sperimentali, che possono essere considerati accettabili.

3.2 Grandezze caratteristiche

Come già sottolineato, in tale lavoro di tesi, uno degli obiettivi nello studio del collasso di materiali granulari, è stato il calcolo della lunghezza percorsa dal materiale, in previste condizioni imposte, diverse per ogni singolo caso. Essa è stata calcolata sperimentalmente per ogni prova attraverso l'utilizzo di diverse relazioni elaborate, che hanno previsto la normalizzazione del parametro, definita come rapporto tra il cammino percorso dalla valanga e la lunghezza iniziale del deposito L_o , oppure rispetto alla differenza ($L_o - L_c$), rappresentante la parte di materiale collassata:

$$L^* = (L_f - L_o) / L_o \quad (3.7)$$

$$Lc^* = [Lf - Lo + (Lo - Lc)] / (Lo - Lc) \quad (3.8)$$

$$L^* = (Lf - Lc - Lo) / Lo \quad (3.9)$$

$$Lc^* = [Lf - Lc - (Lo - Lc)] / (Lo - Lc) = (Lf - Lo) / (Lo - Lc) \quad (3.10)$$

dove con L^* si indica il valore di runout finale ottenuto dalla elaborazione dei dati, con L_f si intende il singolo valore risultante dallo studio dell'immagine, quindi i rispettivi L_1 , L_2 ed L_3 (Fig. 2.28), L_0 esprime la lunghezza del provino intatto quando è inserito e compattato nella cella, infine L_c corrisponde al materiale non collassato nella parte superiore del provino, in caso contrario, la lunghezza di estensione prevista nello spigolo superiore.

Nel caso delle formule 3.8 e 3.10, si può parlare di un valore di runout normalizzato e corretto, in quanto nella formula non si tiene conto solo di una normalizzazione su L_0 , ma della differenza $L_0 - L_c$; tale scelta è stata effettuata ragionando sull'erosione che si può avere nella parte superiore, e che può presentare due casi opposti e possibili (Fig. 3.4):

- totale crollo della colonna iniziale senza deposito di materiale ($L_c > 0$; $H < H_0$);
- crollo parziale della colonna iniziale con una mobilità di materiale minore rispetto al caso precedente ($L_c < 0$; $H = H_0$). Tale comportamento si è riscontrato soprattutto per il carbonato, valutando la lunghezza finale L_f , ridotta di tale fattore L_c .

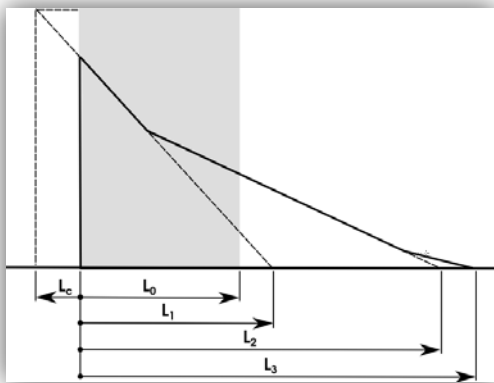


Figura 3.4a: $L_c > 0$

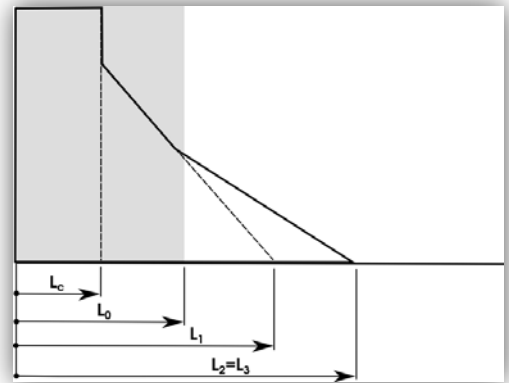


Figura 3.4b: $L_c < 0$

Il ragionamento per ogni espressione elaborata, è stato seguito al fine di ottenere stesse lunghezze di runout per provini con L_0 diversi (Fig. 3.11 e Fig. 3.12); tale condizione non è risultata riscontrabile nella formulazione 3.9, nonostante tenga conto del fattore L_c , inoltre è stato riscontrato un andamento dei dati ottenuti estremamente diverso rispetto all'applicazione delle formule 3.8 e 3.10, che rispecchiano runout uguali per provino iniziale con L_0 diversi. Nei dati che seguono, sono stati riportati quindi i valori calcolati con le formule 3.7 (che non

considera il fattore L_c , ma normalizza solo rispetto ad L_o) e 3.10, in quanto si è verificato una relazione seguente:

$$L_c^* = [L_f - L_o + (L_o - L_c)] / (L_o - L_c) = \frac{L_f - L_c}{L_o - L_c} \quad (3.8)$$

$$\begin{aligned} &= \frac{L_f - L_c}{L_o - L_c} + \left(\frac{L_c}{L_o - L_c} - \frac{L_o}{L_o - L_c} \right) = \frac{L_f - L_c}{L_o - L_c} - \left(\frac{L_o - L_c}{L_o - L_c} \right) = \frac{L_f - L_c}{L_o - L_c} - 1 \\ &= \frac{L_f - L_c}{L_o - L_c} - 1 = [L_f - L_c - (L_o - L_c)] / L_o - L_c = \frac{L_f - L_o}{L_o - L_c} \quad (3.10) \end{aligned}$$

Quindi, la differenza tra esse è di una unità.

Le formulazioni descritte valgono sia per condizioni di secco che umido.

3.3 Risultati delle prove

In tale paragrafo sono stati riportati i risultati ottenuti dall'applicazione delle formule 3.7 e 3.10, e le relative analisi riguardanti la prima prova sperimentale eseguita. Inoltre, sono stati incrementati con dati precedentemente analizzati (*De Fanti 2011/2012; Tono 2011/2012*), per prove eseguite con gli stessi materiali.

3.3.1 Palline di vetro

Per quanto riguarda gli esperimenti effettuati con le palline di vetro, oltre allo studio del caso secco, è stata aggiunta una certa quantità liquido variabile: 0,2%, 0,5%, 1% e 2%. Questo per quanto riguarda palline di diametro nell'intervallo 750-1000 μm . Si riportano inoltre, valori per lo studio dello stesso materiale ma di diametro 2000, 3000 e 5000 μm , con 0%, 0,5%, 1%, 2% e 4% di liquido, che sono stati tutti precedentemente sperimentati ed analizzati, di cui si va a ritrattare, per meglio studiare il tema nel complesso.

I dati riportati nelle tabelle sono tutti risultati dalla media di tre prove eseguite per ogni percentuale, con rispettivo valore di deviazione standard.

Tabella 3.1: diametro 750-1000 μm

Materiale	% w	L_1^*	L_2^*	L_3^*	L_{1c}^*	L_{2c}^*	L_{3c}^*
Palline di vetro	0	1,63 \pm 0,08	2,55 \pm 0,12	2,72 \pm 0,02	0,85 \pm 0,06	1,34 \pm 0,14	1,43 \pm 0,07
Palline di vetro	0,2	0,85 \pm 0,05	1,48 \pm 0,08	1,51 \pm 0,13	1,09 \pm 0,10	1,89 \pm 0,18	1,92 \pm 0,24
Palline di vetro	0,5	0,64 \pm 0,12	1,12 \pm 0,07	1,14 \pm 0,07	1,08 \pm 0,27	1,87 \pm 0,24	1,91 \pm 0,22
Palline di vetro	1	0,61 \pm 0,02	1,00 \pm 0,06	1,03 \pm 0,04	1,34 \pm 0,21	2,20 \pm 0,21	2,26 \pm 0,25
Palline di vetro	2	0,60 \pm 0,05	1,02 \pm 0,10	1,06 \pm 0,13	1,29 \pm 0,33	2,19 \pm 0,51	2,27 \pm 0,48

Tabella 3.2: diametro 2000 μm

Materiale	% w	L_1^*	L_2^*	L_3^*	L_{1C}^*	L_{2C}^*	L_{3C}^*
Palline di vetro	0	$1,42 \pm 0,04$	$2,17 \pm 0,03$	$2,79 \pm 0,12$	$0,72 \pm 0,01$	$1,10 \pm 0,01$	$1,41 \pm 0,08$
Palline di vetro	0,5	$1,09 \pm 0,06$	$1,81 \pm 0,09$	$1,76 \pm 0,06$	$0,92 \pm 0,06$	$1,53 \pm 0,04$	$1,49 \pm 0,03$
Palline di vetro	1	$1,00 \pm 0,02$	$1,58 \pm 0,04$	$1,54 \pm 0,03$	$0,90 \pm 0,04$	$1,42 \pm 0,10$	$1,38 \pm 0,08$
Palline di vetro	2	$1,02 \pm 0,01$	$1,63 \pm 0,10$	$1,55 \pm 0,12$	$0,90 \pm 0,02$	$1,44 \pm 0,04$	$1,37 \pm 0,06$
Palline di vetro	4	$1,00 \pm 0,04$	$1,45 \pm 0,04$	$1,42 \pm 0,03$	$0,94 \pm 0,03$	$1,37 \pm 0,04$	$1,33 \pm 0,04$

Tabella 3.3: diametro 3000 μm

Materiale	% w	L_1^*	L_2^*	L_3^*	L_{1C}^*	L_{2C}^*	L_{3C}^*
Palline di vetro	0	$1,29 \pm 0,08$	$1,94 \pm 0,06$	$2,47 \pm 0,16$	$0,71 \pm 0,01$	$1,06 \pm 0,08$	$1,36 \pm 0,13$
Palline di vetro	0,5	$0,96 \pm 0,06$	$2,01 \pm 0,03$	$2,10 \pm 0,08$	$0,73 \pm 0,04$	$1,52 \pm 0,04$	$1,59 \pm 0,03$
Palline di vetro	1	$1,07 \pm 0,05$	$1,99 \pm 0,04$	$1,93 \pm 0,04$	$0,79 \pm 0,01$	$1,48 \pm 0,07$	$1,43 \pm 0,08$
Palline di vetro	2	$0,92 \pm 0,05$	$1,80 \pm 0,07$	$1,75 \pm 0,03$	$0,76 \pm 0,03$	$1,48 \pm 0,03$	$1,44 \pm 0,03$
Palline di vetro	4	$0,88 \pm 0,04$	$1,76 \pm 0,05$	$1,70 \pm 0,04$	$0,74 \pm 0,01$	$1,48 \pm 0,07$	$1,42 \pm 0,05$

Tabella 3.4: diametro 5000 μm

Materiale	% w	L_1^*	L_2^*	L_3^*	L_{1C}^*	L_{2C}^*	L_{3C}^*
Palline di vetro	0	$1,22 \pm 0,02$	$2,18 \pm 0,02$	$2,80 \pm 0,09$	$0,62 \pm 0,01$	$1,11 \pm 0,01$	$1,43 \pm 0,04$
Palline di vetro	0,5	$1,01 \pm 0,04$	$2,15 \pm 0,06$	$2,56 \pm 0,08$	$0,59 \pm 0,02$	$1,25 \pm 0,04$	$1,49 \pm 0,03$
Palline di vetro	1	$0,94 \pm 0,03$	$2,08 \pm 0,03$	$2,50 \pm 0,05$	$0,65 \pm 0,01$	$1,44 \pm 0,04$	$1,73 \pm 0,04$
Palline di vetro	2	$0,88 \pm 0,03$	$2,08 \pm 0,08$	$2,48 \pm 0,08$	$0,60 \pm 0,02$	$1,43 \pm 0,01$	$1,71 \pm 0,11$
Palline di vetro	4	$0,82 \pm 0,08$	$2,05 \pm 0,09$	$2,57 \pm 0,02$	$0,63 \pm 0,04$	$1,58 \pm 0,07$	$1,98 \pm 0,06$

Tali valori sono stati riportati in grafici, analizzati in base alla percentuale in peso di acqua. Le curve ottenute rappresentano l'andamento di runout delle diverse tipologie di palline di vetro, e quindi la variazione della lunghezza considerata (L_1^* , L_2^* , L_3^* , L_{1C}^* , L_{2C}^* ed L_{3C}^*) in base alla quantità di liquido aggiunta, che risulta avere un andamento diverso a seconda del diametro delle microsferi di vetro che si analizza.

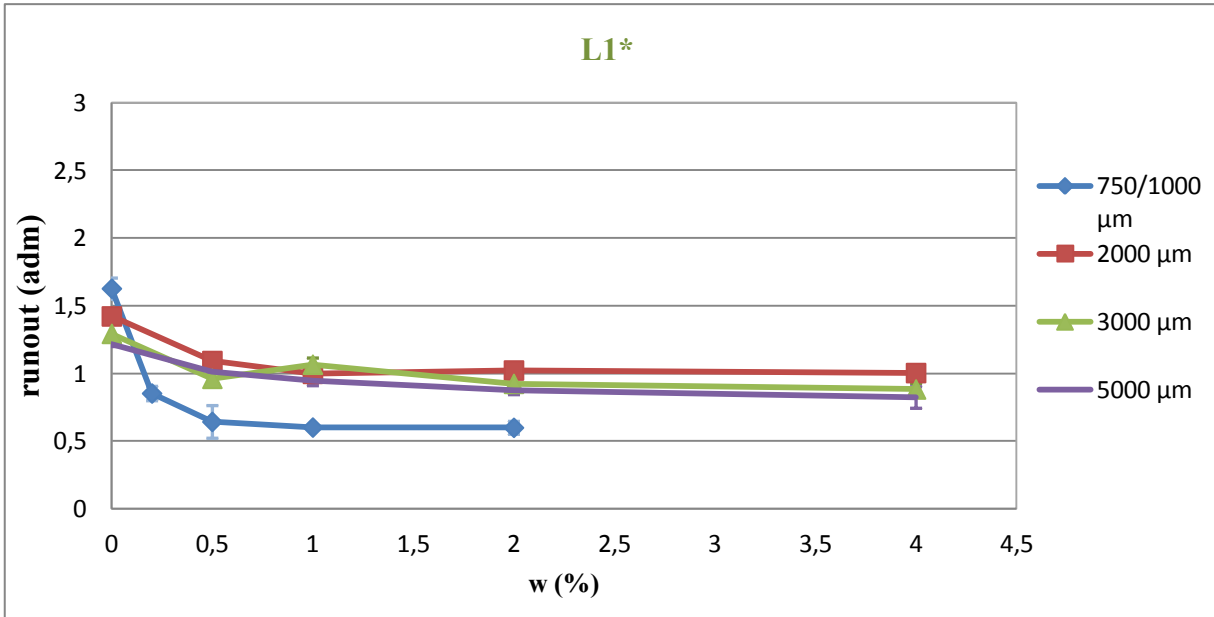


Figura 3.5: Andamento del runout L1* normalizzato rispetto alla percentuale di acqua aggiunta

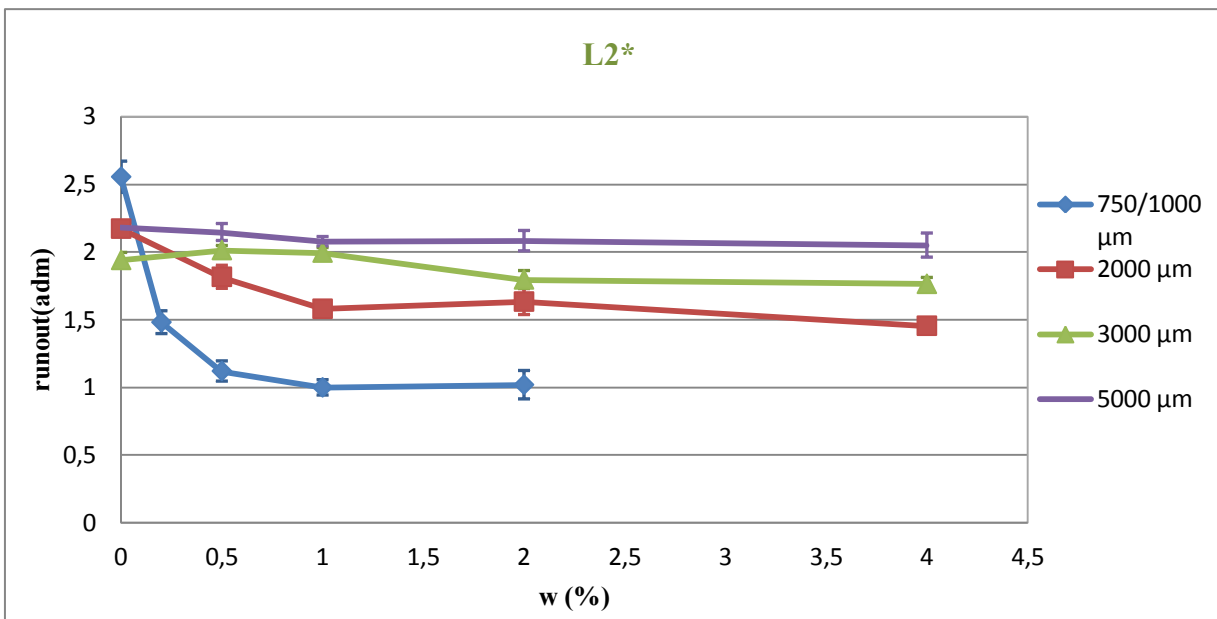


Figura 3.6: Andamento del runout L2* normalizzato, rispetto alla percentuale di acqua raggiunta

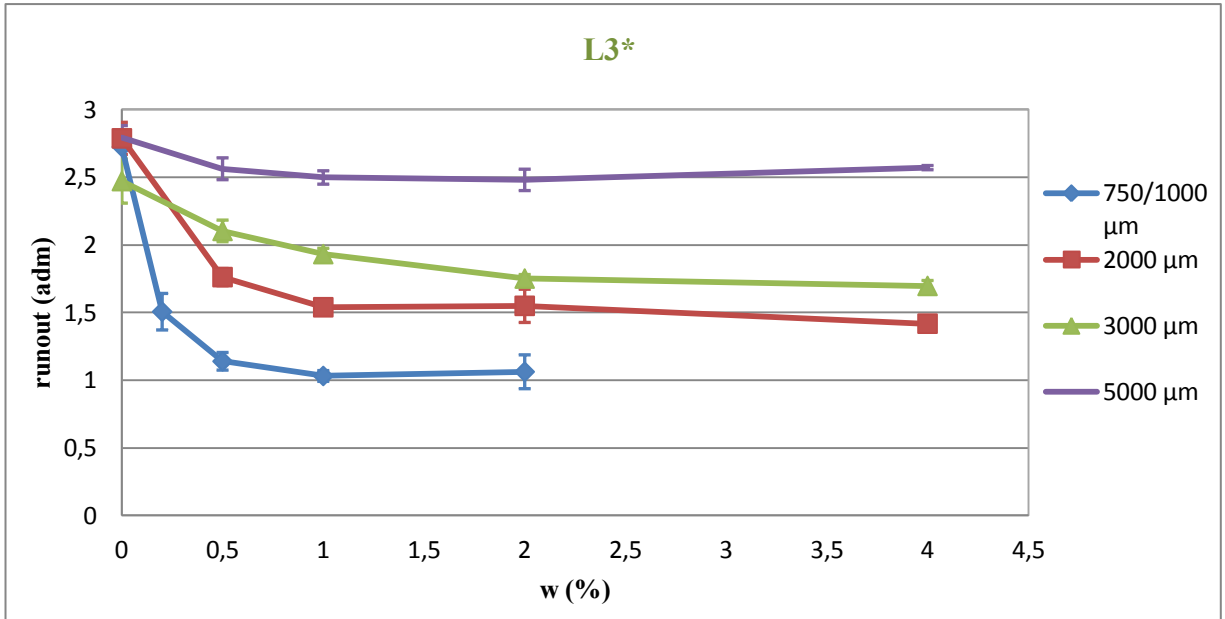


Figura 3.7: Andamento del runout $L3^*$ normalizzato, rispetto alla percentuale di acqua aggiunta

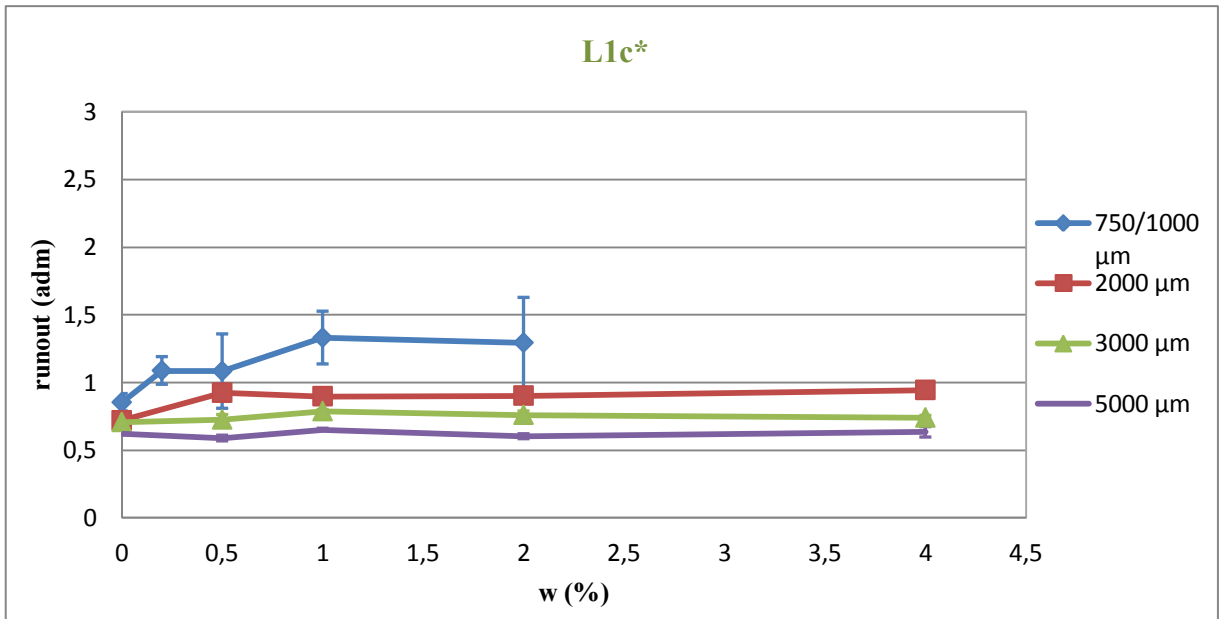


Figura 3.8: Andamento del runout $L1c^*$ normalizzato, rispetto alla percentuale di acqua aggiunta

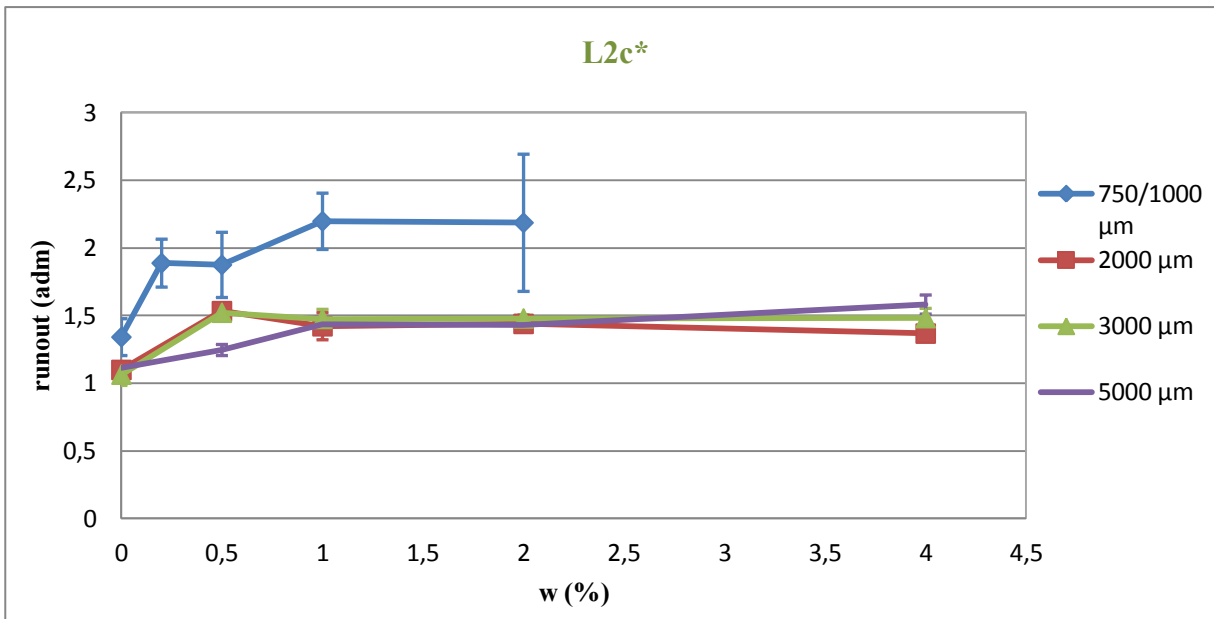


Figura 3.10: Andamento del runout L2c* normalizzato, rispetto alla percentuale di acqua aggiunta

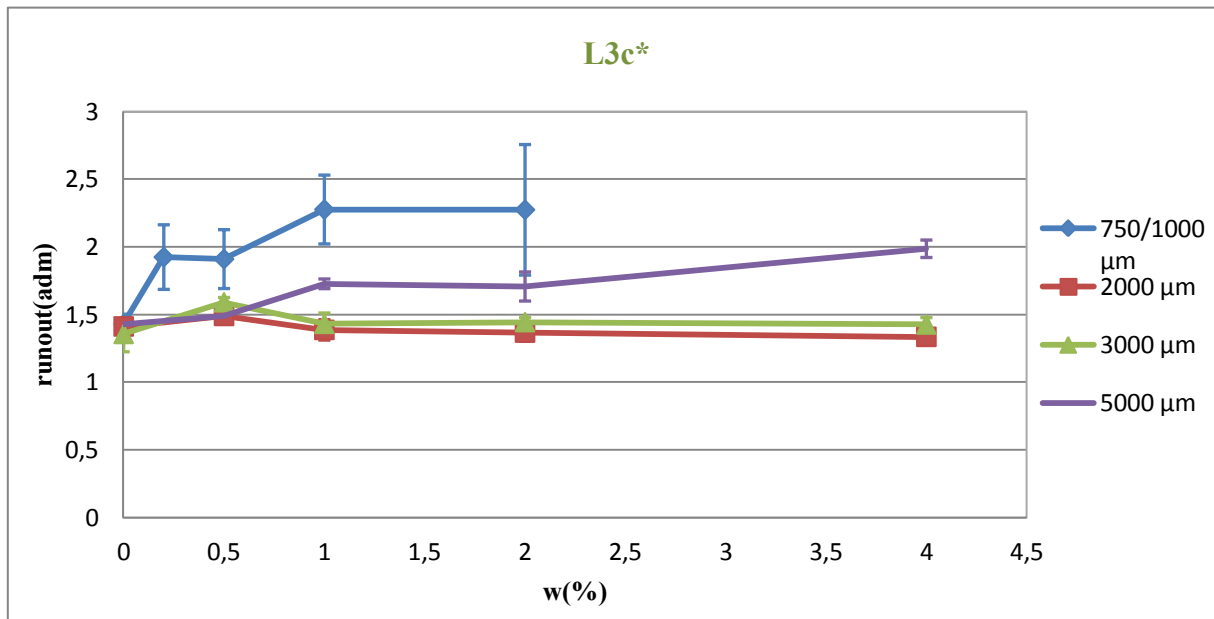


Figura 3.9: Andamento del runout L2c* normalizzato, rispetto alla percentuale di acqua aggiunta

Andando ad osservare i diagrammi che sono stati ottenuti dall'analisi dei dati, è possibile constatare che il valore di runout tende ad assumere una costanza a partire da una quantità di liquido dello 2%, che però è diverso a seconda della granulometria che si va a calcolare; tale condizione è verificata per un valore di collasso ottenuto tramite normalizzazione su L_0 ; se invece ci si focalizza sui valori di L_{1c^*} , L_{2c^*} ed L_{3c^*} si nota che l'andamento non è

decescente ma bensì crescente, e in particolare tende ad assumere carattere asintotico per le granulometrie più grandi, verso un valore di runout di 1,5 per $L2c^*$ ed $L3c^*$.

La differenza quindi nel calcolo della distanza percorsa dal materiale all'aumentare della percentuale di acqua, secondo le formule 3.7 e 3.10, è chiaramente notevole, e si può affermare che nel secondo caso, quindi con lo studio di un valore Lc^* (quindi $L1c^*$, $L2c^*$ ed $L3c^*$) ,che possiamo definire “corretto”, il dato ha un andamento crescente, che risulta maggiormente accentuato per il diametro più piccolo: tale conseguenza può essere giustificata dal fatto che la formulazione inserisce l'effettivo Lc , o materiale che non viene mobilitato nella prova, e quindi va a studiare nello specifico quanto materiale effettivo si muove e scorre durante l'esperimento.

In particolare, l'aumento di Lc^* può essere giustificato tramite diverse teorie:

- lo scorrimento aumenta a causa di un effetto di lubrificazione che l'acqua va a compiere in condizioni di moto attivato, con eventuale rottura dei ponti capillari, legato quindi alla parte dinamica del fenomeno;
- dipendenza dalla quantità erosa nello spigolo del provino, che all'aumentare dell'acqua risulta essere minore, con un aumento di materiale che rimane fermo, e quindi maggiore Lc . Più la quantità di materiale erosa è piccola, meno saranno le particelle che si mobilitano, e più sarà la loro energia potenziale che sono in grado di esplicare a moto avvenuto, causando quindi un maggiore scorrimento.

Questa seconda ipotesi può essere meglio spiegata attraverso lo studio della formula empirica 3.10:

$$Lc^* = \frac{Lf - Lo}{Lo - Lc} \quad (3.10)$$

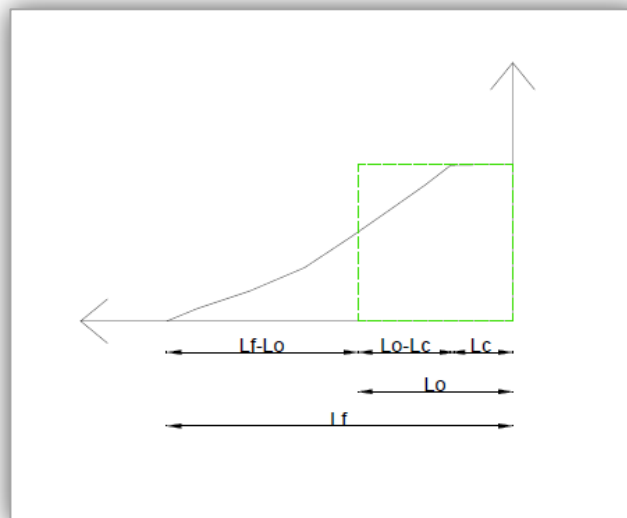


Figura 3.11: Schematizzazione del collasso con relative lunghezze fondamentali

È stato testato la diversità delle due rispettive differenze espresse dalla formula, che risultano essere $(L_f - L_o)$ ed $(L_o - L_c)$, e nel caso di materiale secco e di materiale umido possono essere messi alla luce due risultati nettamente diversi (Fig. 3.12a e Fig.3.12b).

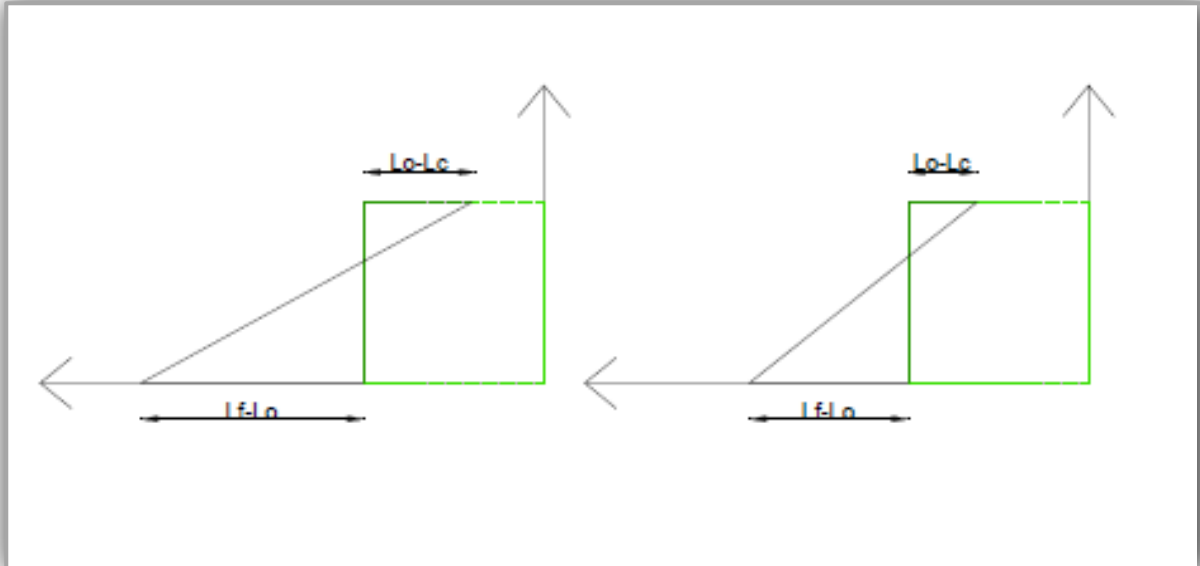


Figura 3.12: a) Schematizzazione di collasso di materiale secco; b) schematizzazione di collasso di materiale con aggiunta di liquido nel 2,5% in peso del materiale

Andando a studiare le figure, si nota come la variazione di L_c , e delle rispettive differenze che portano a calcolare il dato L_c^* , siano diverse: in particolare, per materiale bagnato, il materiale è risultato essere più compatto, e di difficile collasso, man mano che l'aggiunta di liquido aumenta, causando così un crescente valore di L_c , e quindi di materiale fermo, che di conseguenza provoca un minore $(L_o - L_c)$, quindi minore quantità di materiale eroso, in grado di scorrere però più facilmente come prima sottolineato; la diminuzione avviene anche per $(L_f - L_o)$, e quindi, se entrambi i fattori diminuiscono, studiati all'interno della formula empirica 3.10, essa aumenta, giustificando il risultato così positivo e crescente all'aumento di liquido, che ricordiamo trattarsi di un valore indicativo adimensionalizzato.

Diversi possono comunque essere i casi in cui si esplicano nell'esperimento L_f ed L_c , che possono ulteriormente influenzare il fenomeno di collasso nel calcolo di L_c^* :

- lunghezze finali L_f diverse, per materiale compatto rimanente di stesso L_c ;
- lunghezze L_c , di materiale compatto, diverse, e valori L_f finali uguali.

Tale condizione può essere meglio compresa attraverso le Fig. 3.13a e Fig.3.13b:

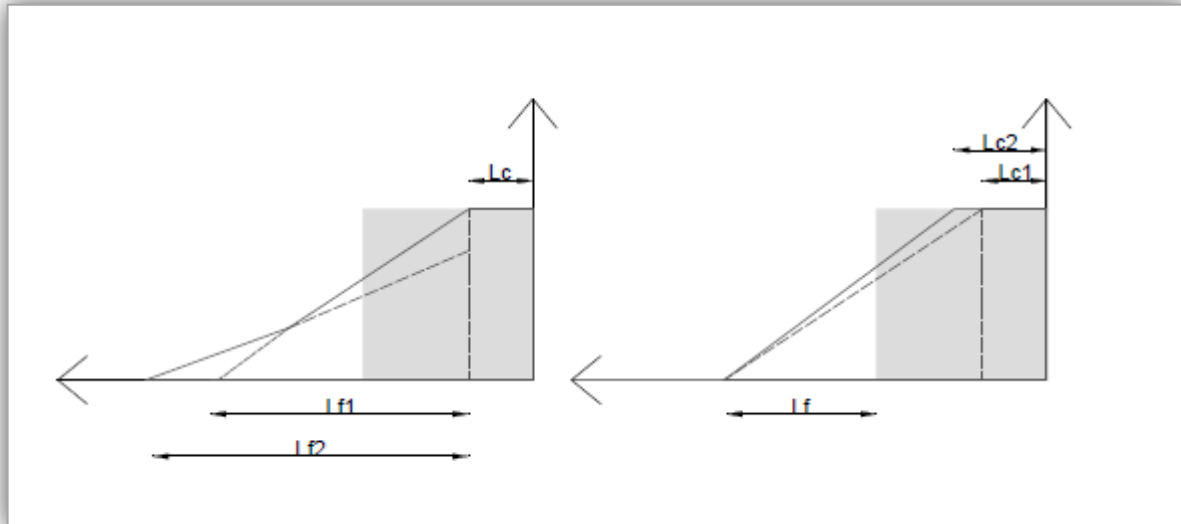


Figura 3.13: a) duplice collasso di materiale per valori L_c uguali ma $L_{f1} \neq L_{f2}$; b) duplice collasso di materiale per valori di L_f uguali ma $L_{c1} \neq L_{c2}$

Si esplicano due esempi che possono presentarsi, ed influenzare il risultato di lunghezza di runout corretta (3.10). Nel primo caso si dimostra come è possibile che si presentino lunghezze di collasso finali, con stesso valore di materiale non rimosso L_c , nello spigolo superiore del provino: tale condizione può essere legata allo scorrimento del materiale, che risulta essere maggiore nel secondo caso (L_{f2}) nonostante la quantità erosa durante la prova sia la stessa, e può essere giustificata tale condizione dalla percentuale variabile di acqua oppure, dalla variazione delle forza capillari durante la fase dinamica della prova, che possono diventare costanti e non essere più in grado di controllare il fenomeno. Dai dati calcolati è dimostrato un esempio di tale caso: per alcuni valori ottenuti e calcolati per lo stesso materiale (750-1000 μm) con variazione di percentuale di acqua, all'aumento di questa, il fattore L_c risulta essere simile, ma con un valore crescente di L_f , andando quindi ad influenzare il fattore L_{c^*} . (Tabella 3.5).

Tabella 3.5: diametro 750-1000 μm

Materiale	% w	L_1	L_2	L_3	L_c	L_{1c}^*	L_{2c}^*	L_{3c}^*
Palline di vetro	1	112,37	144,40	145,40	32,17	1,12	1,96	1,99
Palline di vetro	2	112,49	146,35	149,45	32,95	1,14	2,06	2,14

Il secondo caso invece (Fig. 3.13b) dimostra una stessa lunghezza finale di collasso ($L_{f1}=L_{f2}=L_f$), ma con una quantità di materiale eroso diversa, che risulta essere maggiore nel caso di L_{c2} ; come ipotizzato prima, più la quantità che si erode risulta essere maggiore,

minore è la lunghezza percorsa dal materiale. Si nota però che tale condizione si è verificata non per la variazione di percentuale di acqua nello stesso materiale (come prima indicato in tale ipotesi), ma per la stessa quantità di liquido aggiunta, nell'esecuzione delle tre prove condotte singolarmente, di cui si sono poi ricavati valori medi e relative deviazioni standard.

Tabella 3.6: diametro 750-1000 μm , 1% di acqua, dati della seconda e terza prova

Materiale	% w	L_1	L_2	L_3	L_c	L_{1c}^*	L_{2c}^*	L_{3c}^*
Palline di vetro (seconda prova)	1	111,21	137,88	140,061	39,82	1,36	2,25	2,34
Palline di vetro (terza prova)	1	112,64	137,21	140,54	41,67	1,14	2,06	2,14

Tabella 3.7: diametro 750-1000 μm , 2% di acqua, dati della seconda e terza prova

Materiale	% w	L_1	L_2	L_3	L_c	L_{1c}^*	L_{2c}^*	L_{3c}^*
Palline di vetro (seconda prova)	2	112,49	146,35	149,45	32,95	1,14	2,06	2,14
Palline di vetro (terza prova)	2	112,96	146,49	149,36	27,48	1,05	1,75	1,86

Come si nota dai dati, per L_c diverse, nonostante L_f molto simili, i valori L_c^* valutati per ogni singola prova sono a loro volta diversi, motivi per cui se ne calcolano le medie, e si ripete la stessa prova più volte nelle stesse condizioni, per potersi avvicinare il più possibile a valori esatti. Tale condizione, si ipotizza quindi sia un ulteriore fattore che influenza L_c^* finale (inteso come valore medio), e lo porta ad assumere valori via via crescenti, all'aumento di liquido, valutato tramite relazione 3.10.

Finora sono state esposte analisi e considerazioni riguardo dati ottenuti per le formulazioni 3.7 e 3.10, per i motivi già descritti; si riportano comunque i diagrammi rappresentativi del calcolo di L_c^* normalizzato solo rispetto ad L_0 , cioè secondo la formulazione 3.9: questo consente di fare un confronto, ricordando che in questo caso se si dovessero ipotizzare due provini di larghezza iniziale L_0 diversa, il runout calcolato finale sarebbe diverso. Per meglio capire tale condizione si osserva il seguente sviluppo:

$$Lc_A^* = (Lf_A - Lc_A - Lo) / Lo_A$$

$$Lc_B^* = (Lf_B - Lc_B - Lo) / Lo_B$$

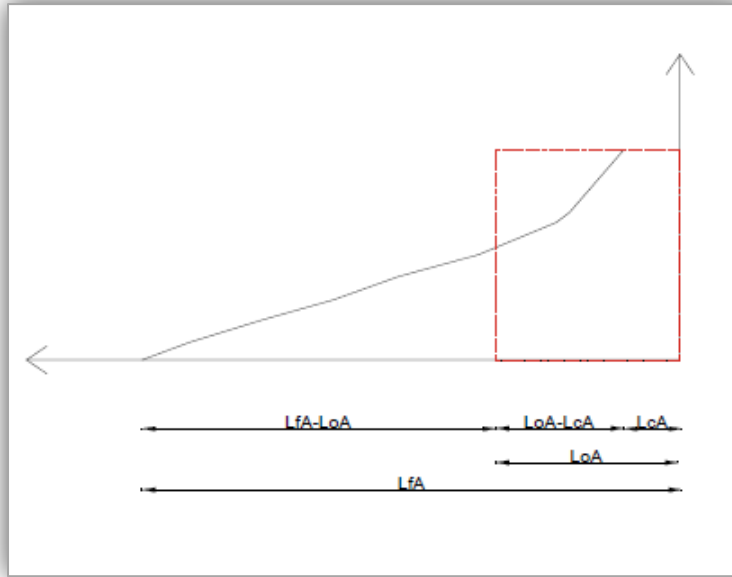


Figura 3.14: Schematizzazione di collasso con provino di lunghezza iniziale Lo_A

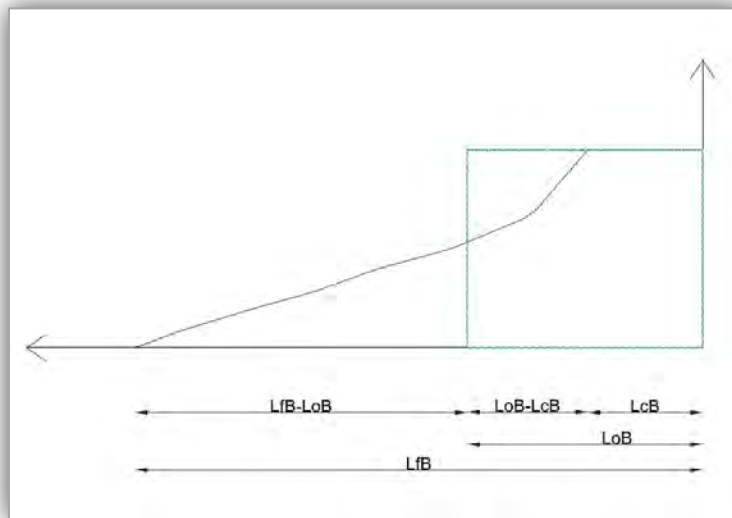


Figura 3.15: Schematizzazione di collasso con provino di lunghezza iniziale Lo_B

È possibile constatare che $Lc_A^* \neq Lc_B^*$ in quanto, nonostante i campioni di base abbiano una larghezza diversa ci si aspetta comunque che si verifichi $L_A - Lo_A = Lc_B - Lo_B$ ed inoltre $L_A - Lc_A = Lc_B - Lc_B$; osservando però i disegni e confrontandoli con la formulazione si può notare che $Lc_A \neq Lc_B$, quindi implica che $Lc_A^* \neq Lc_B^*$.

Si è deciso di riportare i calcoli di L_{1c}^* , L_{2c}^* ed L_{3c}^* per poter notare la differenza rispetto ai precedenti casi calcolati in modo diverso.

Tabella 3.8: *diametro 750-1000 μm*

Materiale	% w	L_{1c}^*	L_{2c}^*	L_{3c}^*
Palline di vetro	0	$2,54 \pm 0,14$	$3,47 \pm 0,07$	$3,64 \pm 0,14$
Palline di vetro	0,2	$0,64 \pm 0,06$	$1,27 \pm 0,08$	$1,29 \pm 0,12$
Palline di vetro	0,5	$0,24 \pm 0,09$	$0,72 \pm 0,05$	$0,74 \pm 0,05$
Palline di vetro	1	$0,06 \pm 0,07$	$0,46 \pm 0,13$	$0,49 \pm 0,11$
Palline di vetro	2	$0,09 \pm 0,19$	$0,51 \pm 0,24$	$0,55 \pm 0,27$

Tabella 3.9: *diametro 2000 μm*

Materiale	% w	L_{1c}^*	L_{2c}^*	L_{3c}^*
Palline di vetro	0	$2,40 \pm 0,06$	$3,15 \pm 0,05$	$3,76 \pm 0,10$
Palline di vetro	0,5	$1,28 \pm 0,06$	$2,00 \pm 0,11$	$1,95 \pm 0,09$
Palline di vetro	1	$1,11 \pm 0,07$	$1,69 \pm 0,06$	$1,65 \pm 0,07$
Palline di vetro	2	$1,16 \pm 0,04$	$1,77 \pm 0,13$	$1,68 \pm 0,16$
Palline di vetro	4	$1,07 \pm 0,05$	$1,52 \pm 0,04$	$1,48 \pm 0,01$

Tabella 3.10: *diametro 3000 μm*

Materiale	% w	L_{1c}^*	L_{2c}^*	L_{3c}^*
Palline di vetro	0	$2,12 \pm 0,17$	$32,77 \pm 0,05$	$3,30 \pm 0,15$
Palline di vetro	0,5	$1,28 \pm 0,08$	$2,34 \pm 0,04$	$2,43 \pm 0,10$
Palline di vetro	1	$1,42 \pm 0,010$	$2,35 \pm 0,04$	$2,29 \pm 0,01$
Palline di vetro	2	$1,14 \pm 0,10$	$2,01 \pm 0,11$	$1,97 \pm 0,08$
Palline di vetro	4	$1,07 \pm 0,08$	$1,95 \pm 0,05$	$1,89 \pm 0,06$

Tabella 3.11 *diametro 5000 μm*

Materiale	% w	L_{1c}^*	L_{2c}^*	L_{3c}^*
Palline di vetro	0	$2,18 \pm 0,02$	$3,14 \pm 0,02$	$3,76 \pm 0,09$
Palline di vetro	0,5	$1,74 \pm 0,06$	$2,87 \pm 0,07$	$3,29 \pm 0,11$
Palline di vetro	1	$1,39 \pm 0,07$	$2,53 \pm 0,06$	$2,95 \pm 0,08$
Palline di vetro	2	$1,33 \pm 0,09$	$2,54 \pm 0,14$	$2,94 \pm 0,08$
Palline di vetro	4	$1,12 \pm 0,13$	$2,65 \pm 0,12$	$2,87 \pm 0,06$

Tutti i valori sono stati riportati in grafici, analizzati in base alla percentuale in peso di acqua.

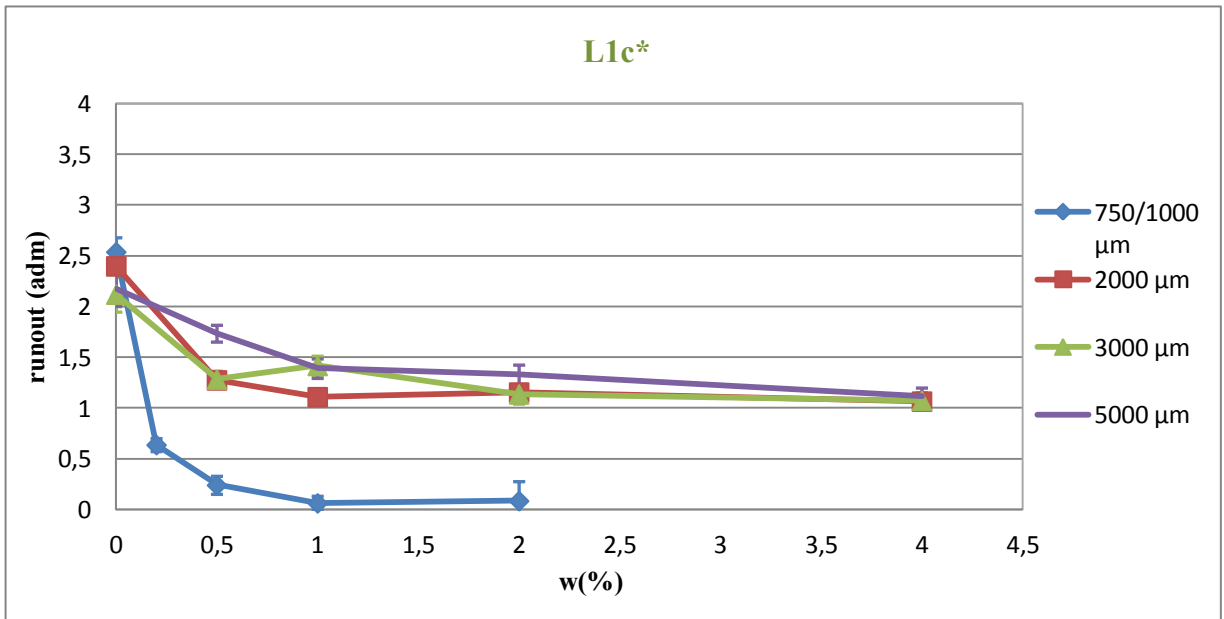


Figura 3.16: Andamento del runout L1c* normalizzato (formula 3.8), rispetto alla percentuale di acqua aggiunta

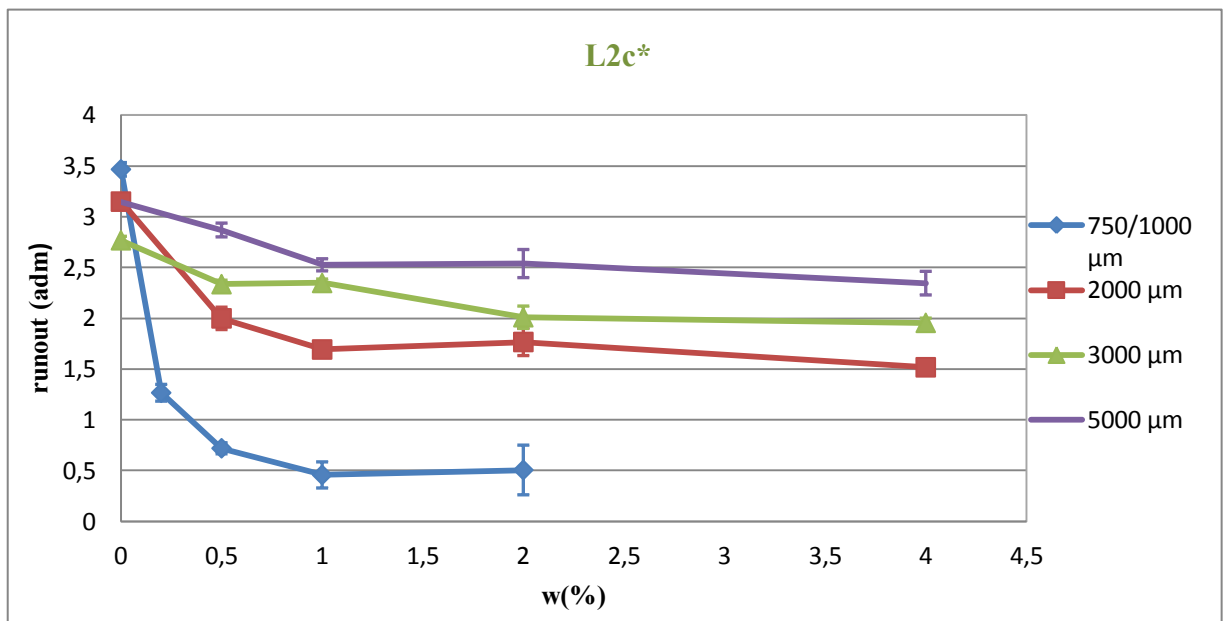


Figura 3.17: Andamento del runout L2c* normalizzato (formula 3.8), rispetto alla percentuale di acqua aggiunta

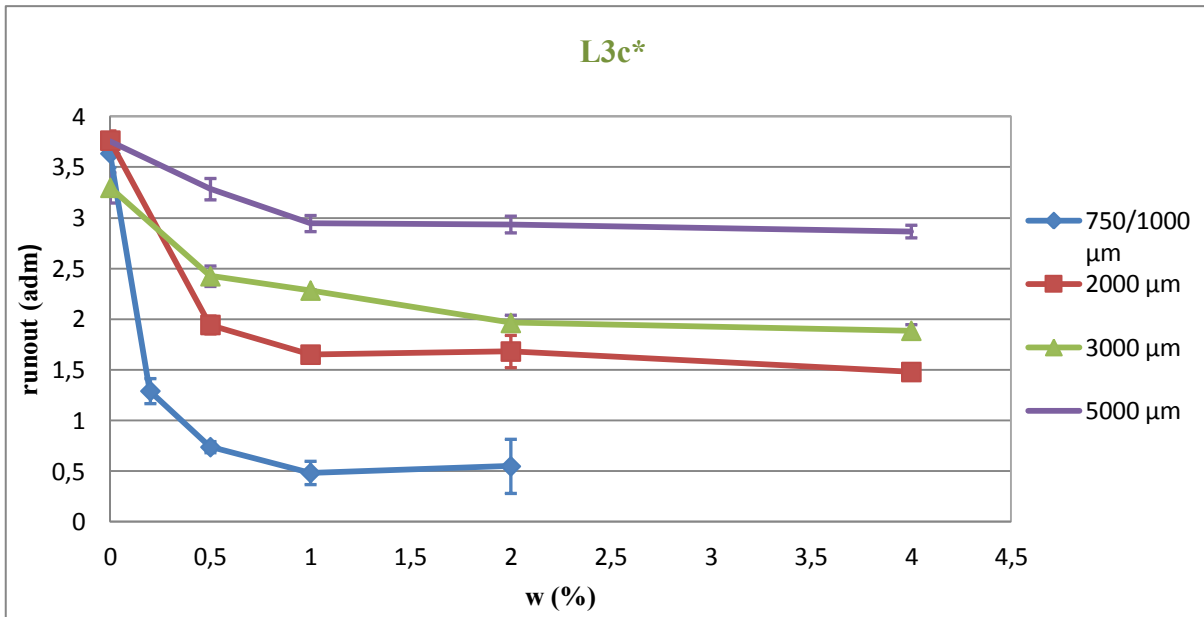


Figura 3.18: Andamento del runout $L3c^*$ normalizzato (formula 3.8), rispetto alla percentuale di acqua aggiunta

Come si nota, l'andamento ottenuto di $L1c^*$, $L2c^*$ ed $L3c^*$ risulta essere totalmente opposto rispetto ai casi precedenti, in quanto normalizzato solo rispetto al valore L_0 , infatti gli andamenti delle Fig. 3.16, 3.17 e 3.18, mostrano molta somiglianza ai diagrammi di Fig. 3.5, 3.6 e 3.7. Tali valori sono stati riportati solo per meglio comprendere la differenza tra le formulazioni, ma non sono stati presi in considerazioni al fine della tesi, ma comunque confermano la non corretta formulazione 3.7.

3.3.2 Carbonato di calcio

Nello studio del carbonato di calcio, sono state studiate le quattro diverse frazioni descritte, con l'aggiunta di acqua nelle percentuali 2,5%, 3% e 4%; anche in questo caso, i dati sono stati sommati a risultati precedenti (*De Fanti, Santomaso 2011/2012*) in cui è stato studiato lo stesso materiale in condizioni secche, e con lo 0,5%, 1% e 2% di aggiunta di acqua.

Tabella 3.12: *Frazione 1 carbonato, 800-1000 μm*

Materiale	%w	L_1^*	L_2^*	L_3^*	L_{1C}^*	L_{2C}^*	L_{3C}^*
Frazione 1	0	$1,04 \pm 0,01$	$1,70 \pm 0,02$	$1,86 \pm 0,07$	$0,93 \pm 0,01$	$1,52 \pm 0,02$	$1,66 \pm 0,05$
Frazione 1	0,5	$0,99 \pm 0,01$	$1,52 \pm 0,04$	$1,67 \pm 0,07$	$0,93 \pm 0,03$	$1,44 \pm 0,04$	$1,57 \pm 0,03$
Frazione 1	1	$0,98 \pm 0,02$	$1,55 \pm 0,05$	$1,66 \pm 0,06$	$0,94 \pm 0,01$	$1,49 \pm 0,05$	$1,60 \pm 0,06$
Frazione 1	2	$0,94 \pm 0,04$	$1,55 \pm 0,24$	$1,55 \pm 0,05$	$0,99 \pm 0,09$	$1,64 \pm 0,24$	$1,64 \pm 0,24$
Frazione 1	2,5	/	/	/	/	/	/
Frazione 1	3	/	/	/	/	/	/
Frazione 1	4	/	/	/	/	/	/

Tabella 3.13: *Frazione 2 carbonato, 1180-1410 μm*

Materiale	%w	L_1^*	L_2^*	L_3^*	L_{1C}^*	L_{2C}^*	L_{3C}^*
Frazione 2	0	$1,09 \pm 0,02$	$1,67 \pm 0,06$	$1,85 \pm 0,07$	$0,95 \pm 0,04$	$1,45 \pm 0,06$	$1,60 \pm 0,10$
Frazione 2	0,5	$1,02 \pm 0,05$	$1,57 \pm 0,00$	$1,70 \pm 0,06$	$0,92 \pm 0,03$	$1,42 \pm 0,03$	$1,54 \pm 0,06$
Frazione 2	1	$0,87 \pm 0,08$	$1,47 \pm 0,09$	$1,60 \pm 0,07$	$0,85 \pm 0,06$	$1,44 \pm 0,12$	$1,57 \pm 0,07$
Frazione 2	2	$0,80 \pm 0,08$	$1,34 \pm 0,09$	$1,45 \pm 0,08$	$0,99 \pm 0,14$	$1,70 \pm 0,50$	$1,84 \pm 0,54$
Frazione 2	2,5	$0,95 \pm 0,02$	$0,97 \pm 0,03$	$1,23 \pm 0,10$	$2,61 \pm 0,12$	$2,65 \pm 0,03$	$3,37 \pm 0,32$
Frazione 2	3	$0,95 \pm 0,01$	$0,97 \pm 0,03$	$1,10 \pm 0,01$	$2,31 \pm 0,13$	$2,36 \pm 0,02$	$2,69 \pm 0,14$
Frazione 2	4	/	/	/	/	/	/

Tabella 3.14: *Frazione 3 carbonato, 1410-2000 μm*

Materiale	%w	L_1^*	L_2^*	L_3^*	L_{1C}^*	L_{2C}^*	L_{3C}^*
Frazione 3	0	$1,09 \pm 0,02$	$1,65 \pm 0,02$	$1,81 \pm 0,04$	$0,95 \pm 0,01$	$1,45 \pm 0,01$	$1,59 \pm 0,04$
Frazione 3	0,5	$1,04 \pm 0,01$	$1,60 \pm 0,04$	$1,72 \pm 0,12$	$0,95 \pm 0,02$	$1,46 \pm 0,03$	$1,58 \pm 0,12$
Frazione 3	1	$0,90 \pm 0,04$	$1,51 \pm 0,06$	$1,61 \pm 0,09$	$0,87 \pm 0,04$	$1,45 \pm 0,04$	$1,55 \pm 0,06$
Frazione 3	2	$0,64 \pm 0,12$	$1,24 \pm 0,08$	$1,34 \pm 0,05$	$1,00 \pm 0,19$	$1,93 \pm 0,13$	$2,08 \pm 0,08$
Frazione 3	2,5	$1,03 \pm 0,02$	$1,03 \pm 0,03$	$1,22 \pm 0,06$	$2,62 \pm 0,33$	$2,62 \pm 0,31$	$3,10 \pm 0,54$
Frazione 3	3	$0,84 \pm 0,08$	$1,04 \pm 0,06$	$1,16 \pm 0,05$	$2,13 \pm 0,22$	$2,66 \pm 0,13$	$2,97 \pm 0,30$
Frazione 3	4	$0,91 \pm 0,23$	$1,07 \pm 0,01$	$1,16 \pm 0,00$	$2,49 \pm 0,62$	$2,95 \pm 0,28$	$3,21 \pm 0,28$

Tabella 3.15: *Frazione 4 carbonato, 2000-2830 μm*

Materiale	%w	L_1^*	L_2^*	L_3^*	L_{1c}^*	L_{2c}^*	L_{3c}^*
Frazione 4	0	$1,07 \pm 0,03$	$1,66 \pm 0,05$	$1,79 \pm 0,07$	$0,95 \pm 0,03$	$1,47 \pm 0,04$	$1,58 \pm 0,06$
Frazione 4	0,5	$1,02 \pm 0,02$	$1,67 \pm 0,08$	$1,72 \pm 0,07$	$0,93 \pm 0,02$	$1,52 \pm 0,09$	$1,57 \pm 0,09$
Frazione 4	1	$0,99 \pm 0,05$	$1,46 \pm 0,10$	$1,54 \pm 0,10$	$0,93 \pm 0,01$	$1,38 \pm 0,06$	$1,45 \pm 0,09$
Frazione 4	2	$0,93 \pm 0,06$	$1,32 \pm 0,07$	$1,32 \pm 0,04$	$1,73 \pm 0,49$	$2,46 \pm 0,72$	$2,45 \pm 0,64$
Frazione 4	2,5	$0,99 \pm 0,05$	$1,00 \pm 0,04$	$1,24 \pm 0,05$	$2,30 \pm 0,06$	$2,43 \pm 0,14$	$2,81 \pm 0,26$
Frazione 4	3	$0,92 \pm 0,18$	$1,03 \pm 0,03$	$1,18 \pm 0,06$	$2,48 \pm 0,76$	$2,72 \pm 0,33$	$3,11 \pm 0,30$
Frazione 4	4	$1,01 \pm 0,05$	$1,03 \pm 0,10$	$1,15 \pm 0,13$	$2,85 \pm 0,69$	$2,91 \pm 0,66$	$3,24 \pm 0,60$

In questo caso sono riportate tutte le lunghezze di runout, eccetto i valori di L_1^* ed L_{1c}^* , in quanto è emerso, durante lo studio delle immagini, che tale dato non è stato di facile calcolo, per la proprietà del materiale di rimanere pressoché intatto nella parte iniziale del provino durante la fase di collasso per l'esplicarsi delle forze capillari, causando quindi una compattazione del materiale; si sottolinea infatti, che nel caso della prima frazione del carbonato, ma anche per la seconda, il materiale durante le prove non è collassato per il 2,5% di acqua (caso di 800-1000 μm) e quindi non sono state condotte prove successive con l'aggiunta di liquido (Fig.3.19). Per il materiale di 1180-1410 μm , tale comportamento è risultato in particolare con il 3% di acqua, i dati sono stati calcolati come media di due valori, non di tre come per gli altri casi, in quanto il materiale nell'esecuzione della terza, e successiva quarta prova, è rimasto intatto (Fig. 3.20), conferma del raggiungimento di una condizione limite.

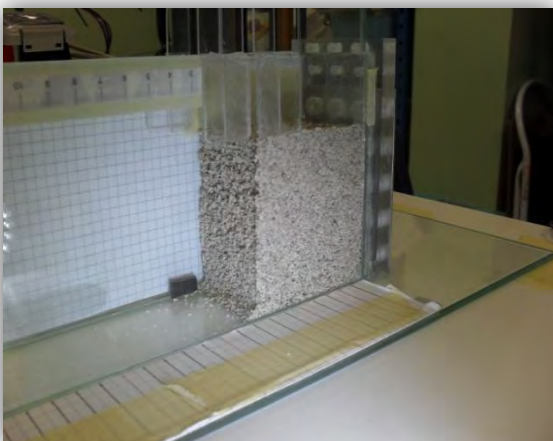


Figura 3.19: *Provino di carbonato 800-100 μm intatto a seguito della rimozione della parete mobile.*

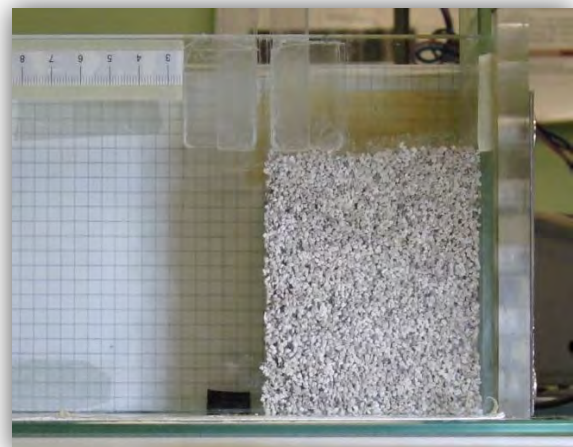


Figura 3.20: *Provino di carbonato 1180-1410 μm intatto a seguito della rimozione della parete mobile.*

Si riportano i grafici studiati solo con le formulazioni 3.7 e 3.10, per i casi di calcolo di L^* , ed Lc^* .

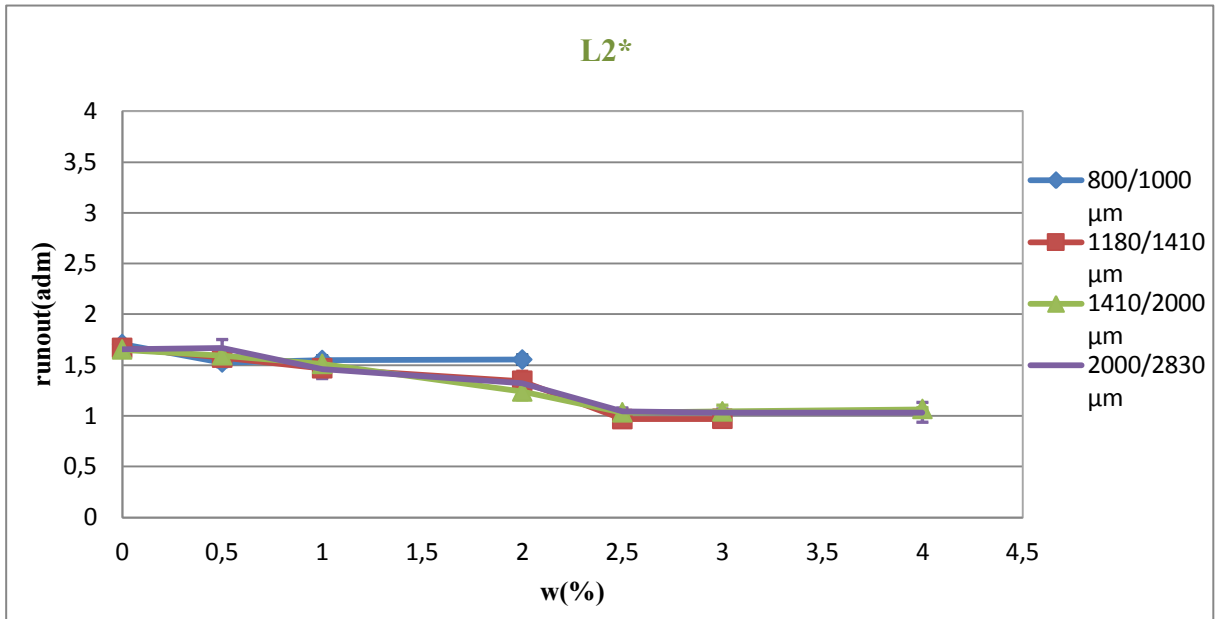


Figura 3.21: Andamento del runout $L2^*$ normalizzato, rispetto alla percentuale di acqua aggiunta

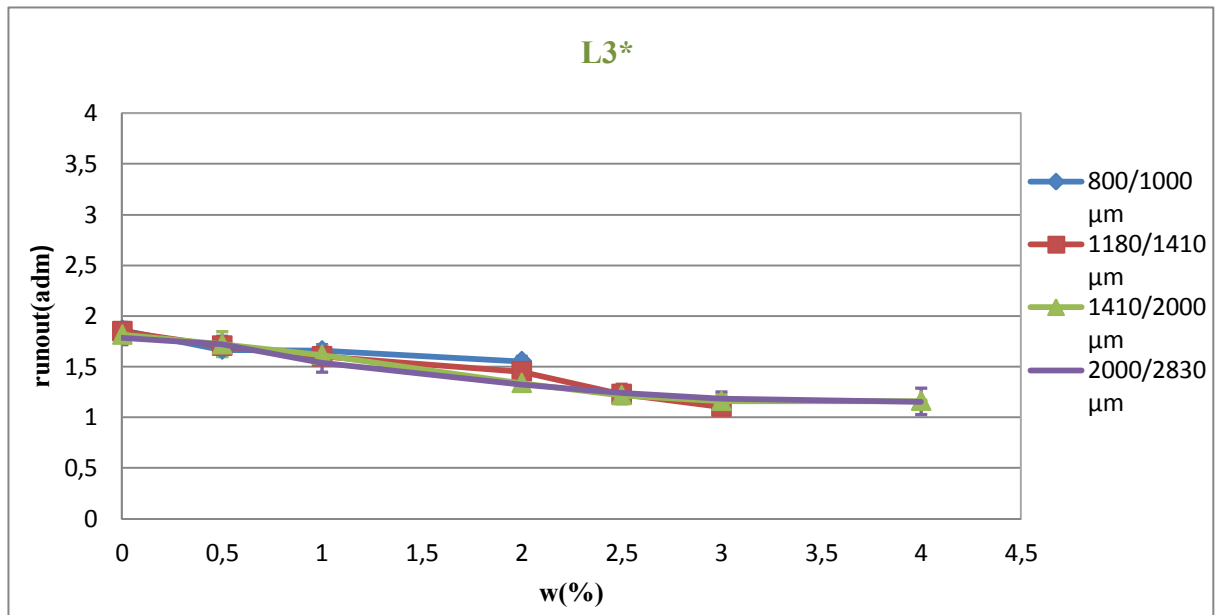


Figura 3.22: Andamento del runout $L3^*$ normalizzato, rispetto alla percentuale di acqua aggiunta

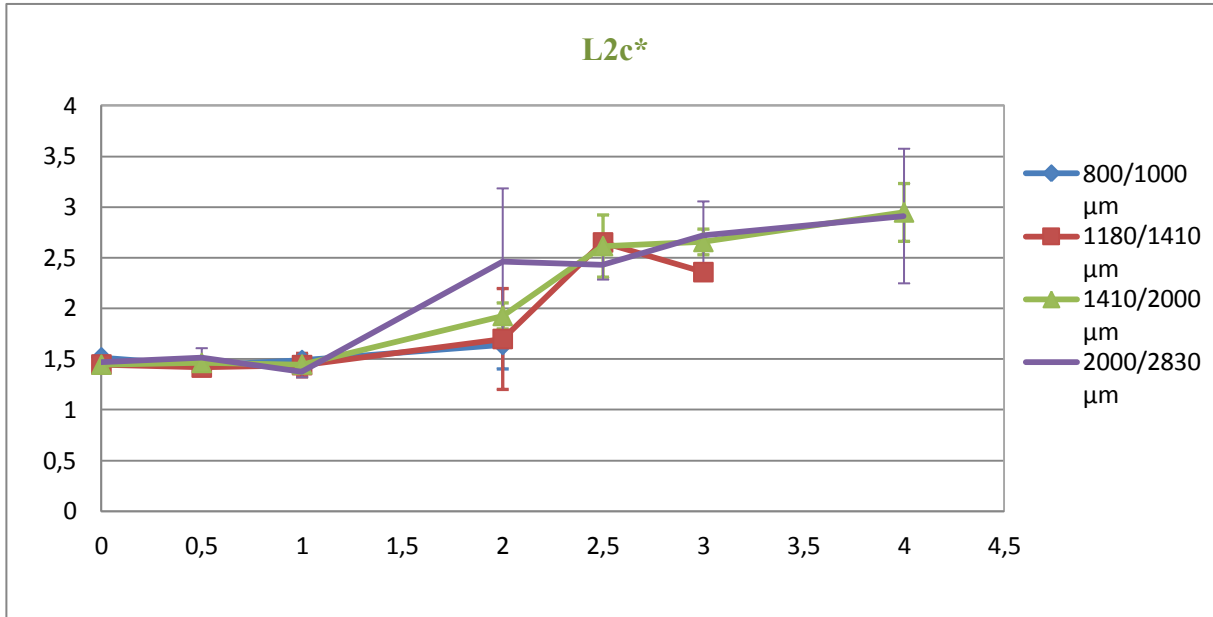


Figura 3.23: Andamento del runout L2c* normalizzato, rispetto alla percentuale di acqua aggiunta

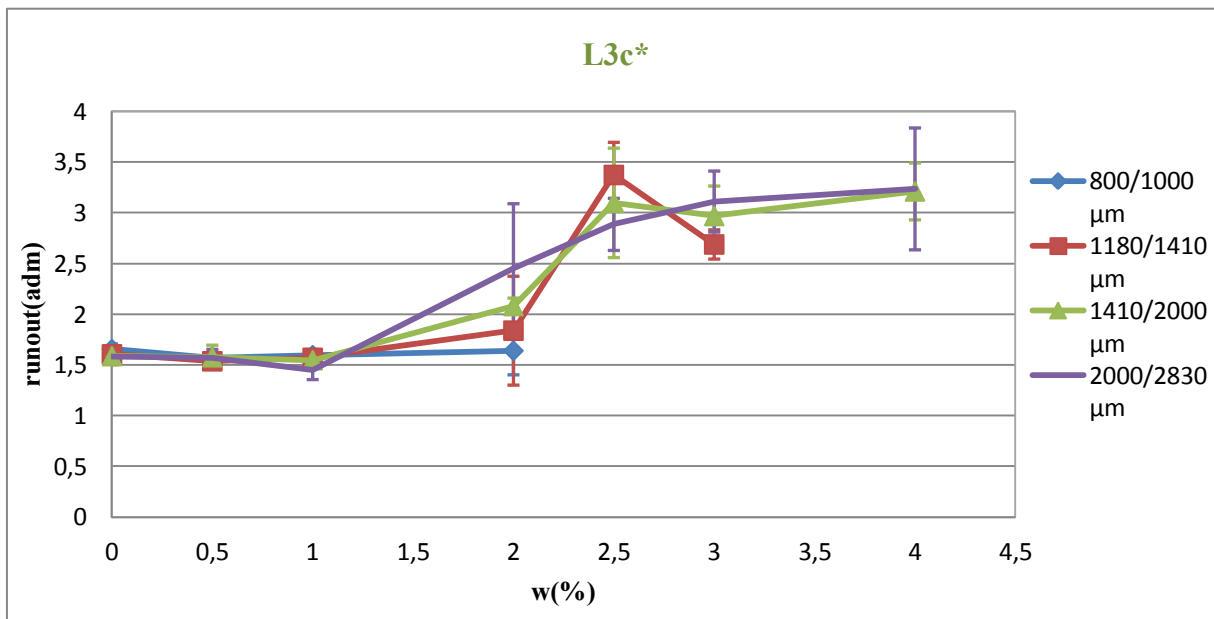


Figura 3.24: Andamento del runout L3c* normalizzato, rispetto alla percentuale di acqua aggiunta

Analizzando l'andamento dei dati per il carbonato di calcio, a differenza delle palline di vetro, appare più evidente una indipendenza del comportamento dalla granulometria, in quanto i diagrammi tendono a diventare costanti per un valore di runout adimensionalizzato pari ad 1

ed una percentuale di acqua aggiunta del 2% (come si era verificato per le microsfere di vetro delle dimensioni più piccole di 750-1000 μm), e a coincidere tra di loro fin dall'inizio della prova; questa considerazione risulta evidente per quanto riguarda il calcolo di $L2^*$ ed $L3^*$, quindi per un calcolo del valore adimensionalizzato rispetto ad L_0 .

Difficoltà maggiori sono state riscontrate invece per i risultati dei valori corretti: anche qui l'andamento è risultato crescente all'aumento della percentuale di acqua (stesse ipotesi che sono state valutate nel caso della palline di vetro, valgono anche per il carbonato), ma con una deviazione standard leggermente accentuata, come si può notare osservando le barre di errore presenti, che indicano l'intervallo in cui il punto analizzato può variare.

Si è ipotizzato quindi un andamento qualitativo di tali condizioni, indicato in Fig.3.25.

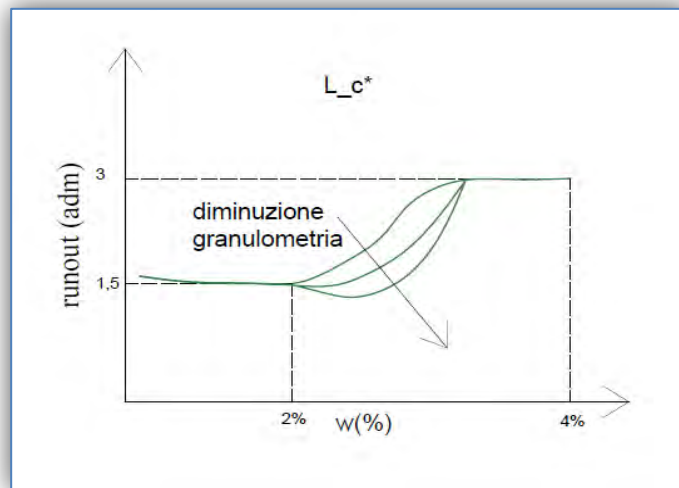


Figura 3.25: Ipotetico andamento di L_{c^*} per il carbonato, all'aumento della percentuale di acqua

La differenza maggiore è apparsa anche ad occhio nudo, in quanto il materiale depositato e attaccato alle pareti della cella, è risultato di una entità non trascurabile, che ha influenzato i risultati e soprattutto gli andamenti dei grafici, con picchi in alcuni punti, e andamenti di deviazione standard notevoli.

Nelle figure che seguono sono state riportate le foto scattate a prova terminata di due frazioni di carbonato, con una quantità di liquido pari al 2,5% in cui si nota molto bene il deposito di materiale del provino, rimasto intatto nella parte iniziale della cella in cui è stato collocato, e quindi del valore di L_c considerato in questo caso negativo (fig.3.4b) ricavabile tramite lo studio dell'immagine; inoltre si confronta l'andamento del profilo per le microsfere di vetro delle dimensioni più piccole, il cui comportamento simile ha iniziato a comparire con lo 0,2% di acqua. Per le particelle più grandi invece tale condizione non è stata riscontrata.



Figura 3.26: CC 1180/1410 μm con 2,5% di acqua



Figura 3.27: CC 2000/2830 μm con 2,5% di acqua



Figura 3.28: palline di vetro 750/1000 μm con 0,2% di acqua



Figura 3.29: palline di vetro 750/1000 μm con 1% di acqua

Le possibili ipotesi che portano alla differenza tra i due diagrammi ricavati secondo le due formule empiriche scelte, indicate a inizio Cap. 3, sono esattamente le stesse che sono state descritte ed esposte per quanto riguarda il collasso delle palline di vetro, quindi si tratta di fattori legati alla possibile lubrificazione del materiale, e alla quantità erosa e dispersa durante il moto di esso.

È bene notare che nel caso del carbonato di calcio, nel calcolo di Lc^* , oltre ad un comportamento asintotico di tutte le frazioni considerate, verso un intervallo di valori tra 3 e 3,5, l'andamento assume valori man mano crescenti all'aumento di acqua ed esso risulta notevole, invece le palline di vetro hanno dimostrato fin da subito un comportamento più asintotico e meno crescente (Fig. 3.8, 3.9 e 3.10), eccetto il caso di 750-1000 μm .

La giustificazione è stata ricercata nello studio mirato dell'equazione 3.10, diagrammando i suoi fattori all'aumento di liquido (Fig. 3.30 e Fig. 3.31).

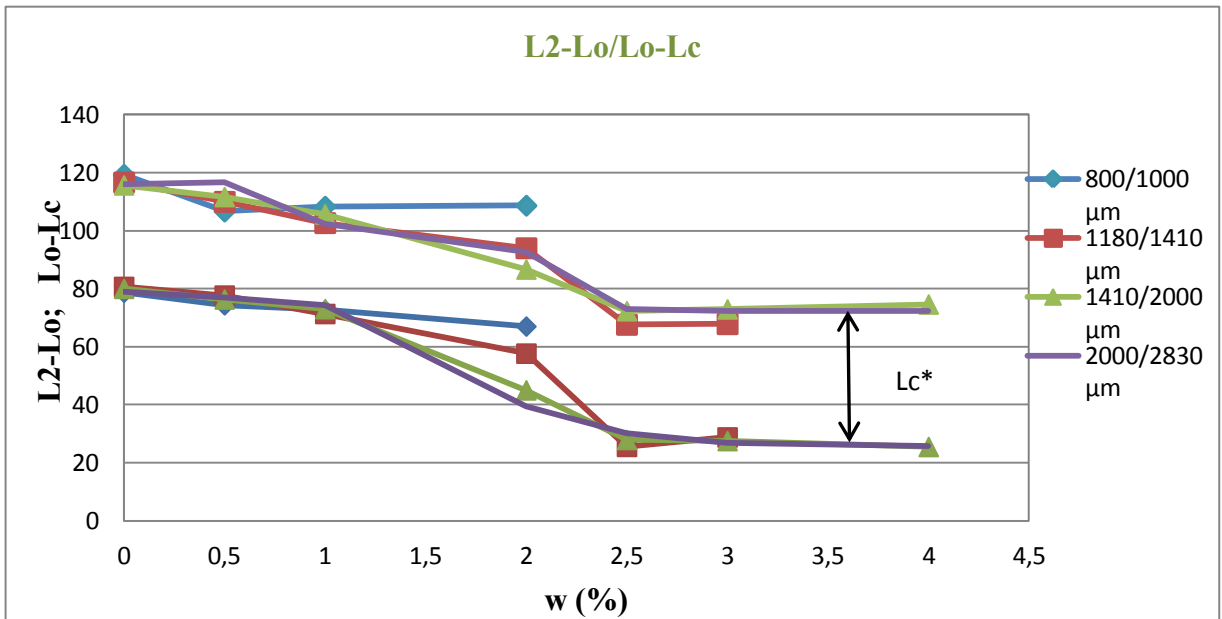


Figura 3.30: Andamento dei fattori per il calcolo di $L2c^*$ secondo la formula empirica 3.10

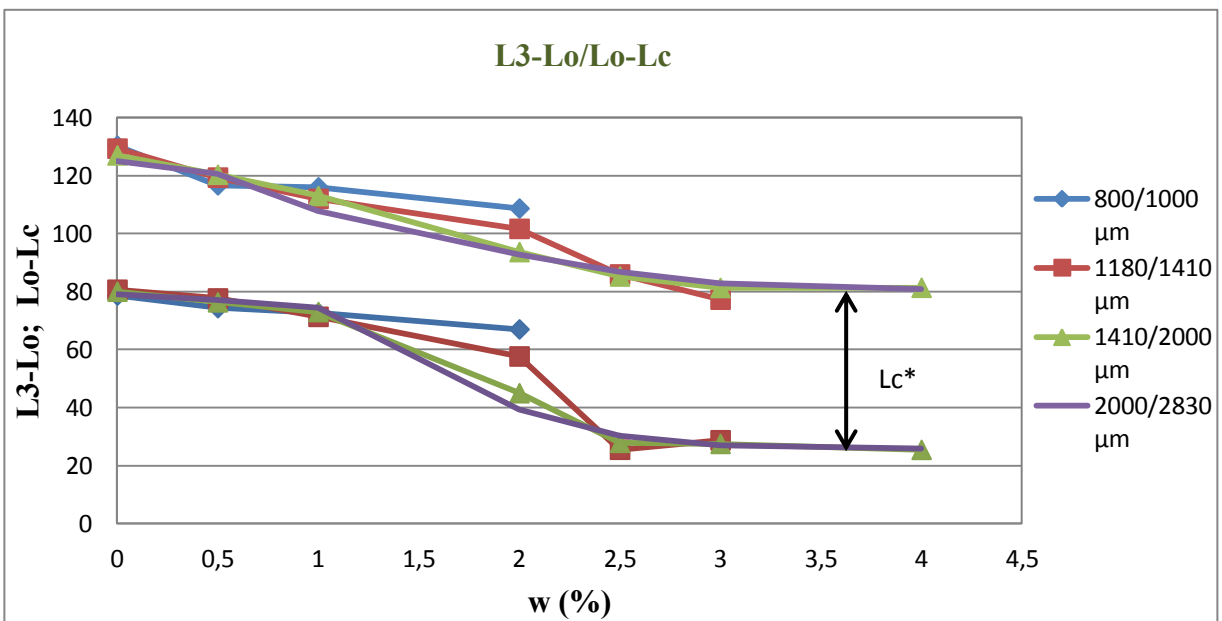


Figura 3.31: Andamento dei fattori per il calcolo di $L3c^*$ secondo la formula empirica 3.10

Si riportano i valori delle figure anche nelle tabelle seguenti:

Tabella 3.16: *Frazione 1 carbonato, 800-1000 μm*

Materiale	% w	L₂-Lo	L₃-Lo	Lo-Lc
Frazione 1	0	119,33 \pm 1,15	130,33 \pm 5,03	78,67 \pm 1,15
Frazione 1	0,5	106,67 \pm 2,89	116,67 \pm 4,62	74,33 \pm 3,51
Frazione 1	1	108,33 \pm 2,89	116,00 \pm 4,00	72,67 \pm 0,58
Frazione 1	2	180,67 \pm 3,21	108,67 \pm 3,21	67,00 \pm 7,94

Tabella 3.17: *Frazione 2 carbonato, 1180-1410 μm*

Materiale	% w	L₂-Lo	L₃-Lo	Lo-Lc
Frazione 2	0	116,67 \pm 4,16	129,33 \pm 5,13	80,67 \pm 2,08
Frazione 2	0,5	110,00 \pm 0,00	119,33 \pm 4,04	77,67 \pm 1,53
Frazione 2	1	102,67 \pm 6,43	112,00 \pm 5,20	71,33 \pm 2,31
Frazione 2	2	94,00 \pm 6,56	101,67 \pm 5,69	57,67 \pm 12,34
Frazione 2	2,5	67,61 \pm 2,16	89,95 \pm 6,69	25,52 \pm 1,06
Frazione 2	3	67,82 \pm 2,15	77,26 \pm 0,93	28,77 \pm 1,20

Tabella 3.18: *Frazione 3 carbonato, 1410-2000 μm*

Materiale	% w	L₂-Lo	L₃-Lo	Lo-Lc
Frazione 3	0	115,67 \pm 1,15	127,00 \pm 2,65	80,00 \pm 1,00
Frazione 3	0,5	111,67 \pm 2,89	120,33 \pm 8,62	76,33 \pm 1,15
Frazione 3	1	105,67 \pm 4,04	113,00 \pm 6,08	73,00 \pm 1,00
Frazione 3	2	86,87 \pm 5,77	93,67 \pm 3,51	45,00 \pm 0,00
Frazione 3	2,5	72,29 \pm 2,33	85,25 \pm 4,10	27,90 \pm 3,31
Frazione 3	3	72,92 \pm 4,26	81,29 \pm 3,80	27,52 \pm 2,35
Frazione 3	4	74,61 \pm 0,92	81,36 \pm 0,31	25,47 \pm 2,33

Tabella 3.19: *Frazione 4 carbonato, 2000-2830 μm*

Materiale	% w	L₂-Lo	L₃-Lo	Lo-Lc
Frazione 4	0	116,00 ± 3,61	125,00 ± 5,00	79,00 ± 1,00
Frazione 4	0,5	116,67 ± 5,77	120,67 ± 5,13	77,00 ± 1,00
Frazione 4	1	102,33 ± 6,81	107,67 ± 6,66	74,33 ± 3,79
Frazione 4	2	92,67 ± 4,62	92,67 ± 2,52	39,33 ± 9,02
Frazione 4	2,5	73,08 ± 2,19	86,79 ± 3,63	30,18 ± 2,13
Frazione 4	3	72,39 ± 2,16	82,92 ± 4,39	26,90 ± 3,88
Frazione 4	4	72,25 ± 6,83	80,85 ± 9,12	25,78 ± 7,07

Come già sottolineato nel sottocapitolo 3.3.1, attraverso l'osservazione della figura 3.12, il rapporto $(L_f - L_o)/(L_o - L_c)$ varia all'aumento della percentuale di acqua aggiunta, e risulta essere maggiore per percentuali pari al 3% e 4%, a causa della diminuzione dei loro divisori e dividendi: più questi saranno piccoli, maggiore sarà il risultato di L_c^* , rappresentato dalla distanza tra i diagrammi (Fig. 3.30 e 3.31). Tale comportamento è sempre legato alla quantità di materiale che si erode e cade: più il materiale eroso risulta piccolo, maggiore è l'energia che esprime nel suo moto, e quindi in fase di scorrimento, e maggiore risulta essere il materiale che rimane compatto nello spigolo superiore del provino, causa della percentuale elevata di acqua che provoca maggiore coesione, e minore attrito, esplicando le forze di coesione a cui sono sottoposte le particelle.

Anche per il carbonato, si è scelto di riportare le analisi effettuate con la formulazione 3.9, ricordando le stesse considerazioni espresse per le palline di vetro.

Tabella 3.20: *Frazione 1 carbonato, 800-1000 μm*

Materiale	% w	L_{1C}*	L_{2C}*	L_{3C}*
Frazione 1	0	1,17 ± 0,03	1,83 ± 0,03	1,99 ± 0,09
Frazione 1	0,5	1,05 ± 0,06	1,59 ± 0,09	1,73 ± 0,11
Frazione 1	1	1,02 ± 0,02	1,59 ± 0,04	1,70 ± 0,06
Frazione 1	2	0,90 ± 0,15	1,51 ± 0,10	1,51 ± 0,10

Tabella 3.21: *Frazione 2 carbonato, 1180-1410 μm*

Materiale	% w	L_{1C}^*	L_{2C}^*	L_{3C}^*
Frazione 2	0	$1,24 \pm 0,01$	$1,82 \pm 0,07$	$2,00 \pm 0,05$
Frazione 2	0,5	$1,13 \pm 0,07$	$1,68 \pm 0,02$	$1,81 \pm 0,07$
Frazione 2	1	$0,89 \pm 0,10$	$1,49 \pm 0,09$	$1,62 \pm 0,10$
Frazione 2	2	$0,62 \pm 0,25$	$1,17 \pm 0,14$	$1,28 \pm 0,12$
Frazione 2	2,5	$0,32 \pm 0,02$	$0,33 \pm 0,05$	$0,59 \pm 0,09$
Frazione 2	3	$0,36 \pm 0,00$	$0,38 \pm 0,00$	$0,51 \pm 0,00$

Tabella 3.22: *Frazione 3 carbonato, 1410-2000 μm*

Materiale	% w	L_{1C}^*	L_{2C}^*	L_{3C}^*
Frazione 3	0	$1,23 \pm 0,04$	$1,80 \pm 0,03$	$1,96 \pm 0,04$
Frazione 3	0,5	$1,13 \pm 0,01$	$1,69 \pm 0,05$	$1,81 \pm 0,12$
Frazione 3	1	$0,95 \pm 0,04$	$1,55 \pm 0,07$	$1,66 \pm 0,10$
Frazione 3	2	$0,29 \pm 0,12$	$0,88 \pm 0,08$	$0,98 \pm 0,05$
Frazione 3	2,5	$0,43 \pm 0,05$	$0,43 \pm 0,06$	$0,62 \pm 0,01$
Frazione 3	3	$0,23 \pm 0,10$	$0,43 \pm 0,09$	$0,55 \pm 0,06$
Frazione 3	4	$0,26 \pm 0,22$	$0,42 \pm 0,05$	$0,52 \pm 0,05$

Tabella 3.23: *Frazione 4 carbonato, 2000-2830 μm*

Materiale	% w	L_{1C}^*	L_{2C}^*	L_{3C}^*
Frazione 4	0	$1,20 \pm 0,02$	$1,79 \pm 0,06$	$1,91 \pm 0,08$
Frazione 4	0,5	$1,12 \pm 0,03$	$1,77 \pm 0,07$	$1,82 \pm 0,06$
Frazione 4	1	$1,05 \pm 0,11$	$1,52 \pm 0,14$	$1,60 \pm 0,12$
Frazione 4	2	$0,49 \pm 0,09$	$0,89 \pm 0,08$	$0,89 \pm 0,12$
Frazione 4	2,5	$0,42 \pm 0,08$	$0,48 \pm 0,06$	$0,67 \pm 0,06$
Frazione 4	3	$0,28 \pm 0,11$	$0,39 \pm 0,10$	$0,54 \pm 0,11$
Frazione 4	4	$0,37 \pm 0,14$	$0,40 \pm 0,18$	$0,52 \pm 0,23$

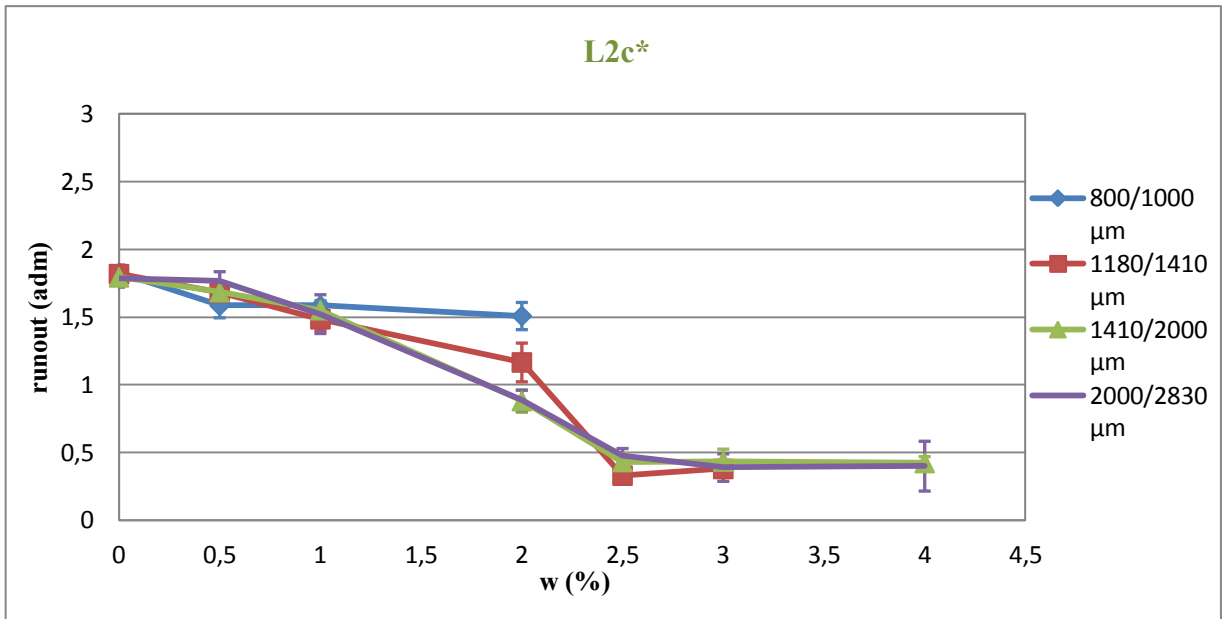


Figura 3.32: Andamento del runout $L2c^*$ normalizzato (formula 3.8), rispetto alla percentuale di acqua aggiunta

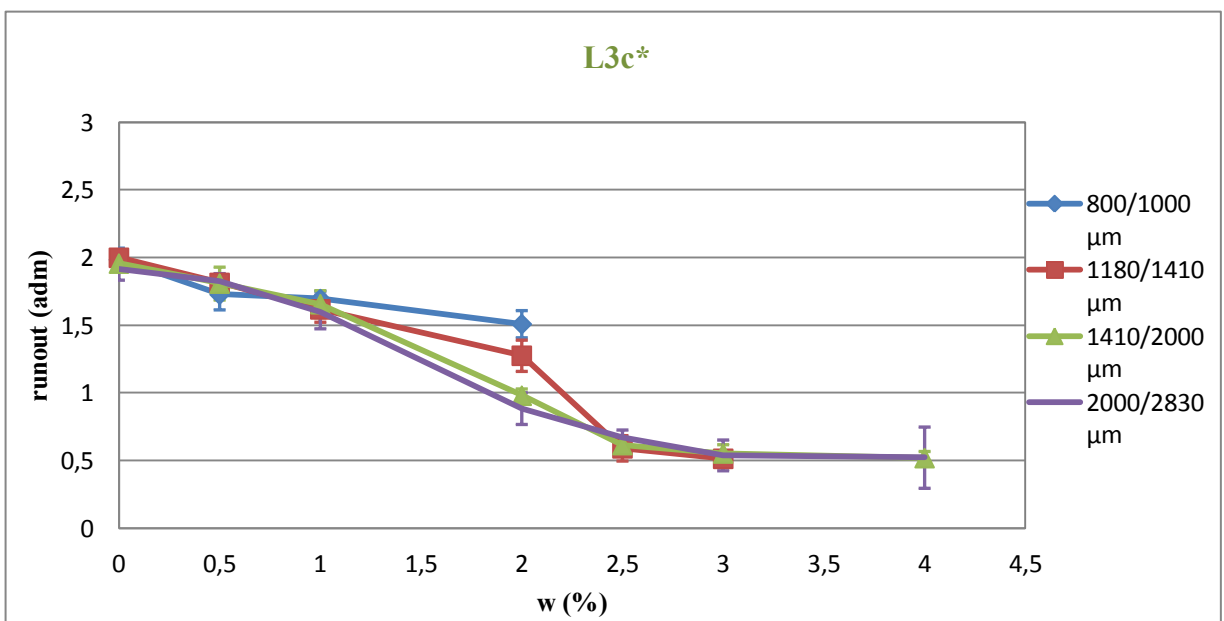


Figura 3.33: Andamento del runout $L3c^*$ normalizzato (formula 3.8), rispetto alla percentuale di acqua aggiunta

L'andamento risultante risulta essere opposto alla formulazione 3.10, e simile alla 3.7, nonostante si tenga conto di L_c : coincide con lo stesso comportamento ottenuto per le palline di vetro, e quindi possono essere confermate le stesse considerazioni.

3.3.3 Confronto tra i due materiali

Al fine di comprendere al meglio la differenza di comportamento dei due materiali, si è deciso di mettere a confronto risultati per granulometrie simili, all'aumento della percentuale di acqua aggiunta, e ricavarne poi le conseguenti osservazioni.

Le lunghezze messe a confronto sono: L2*, L2c*, L3* ed L3c* ; è stato scartato L1* ed L1c*, in quanto i risultati del carbonato non sono stati considerati attendibili (Fig. 3.34-3.40).

Non sono stati riportati i valori in tabelle, al fine di evitare ripetizioni di dati.

Le granulometrie che si è deciso di mettere a confronto sono:

- 750-1000 μm (palline di vetro) con 800-1000 μm (frazione 1 del carbonato di calcio);
- 2000 μm (palline di vetro) con 2000-2830 μm (frazione 4 del carbonato di calcio).

I calcoli di tali dati rappresentano l'applicazione delle formule 3.7 e 3.10, e non sono riportati esempi riguardo alla relazione 3.9.

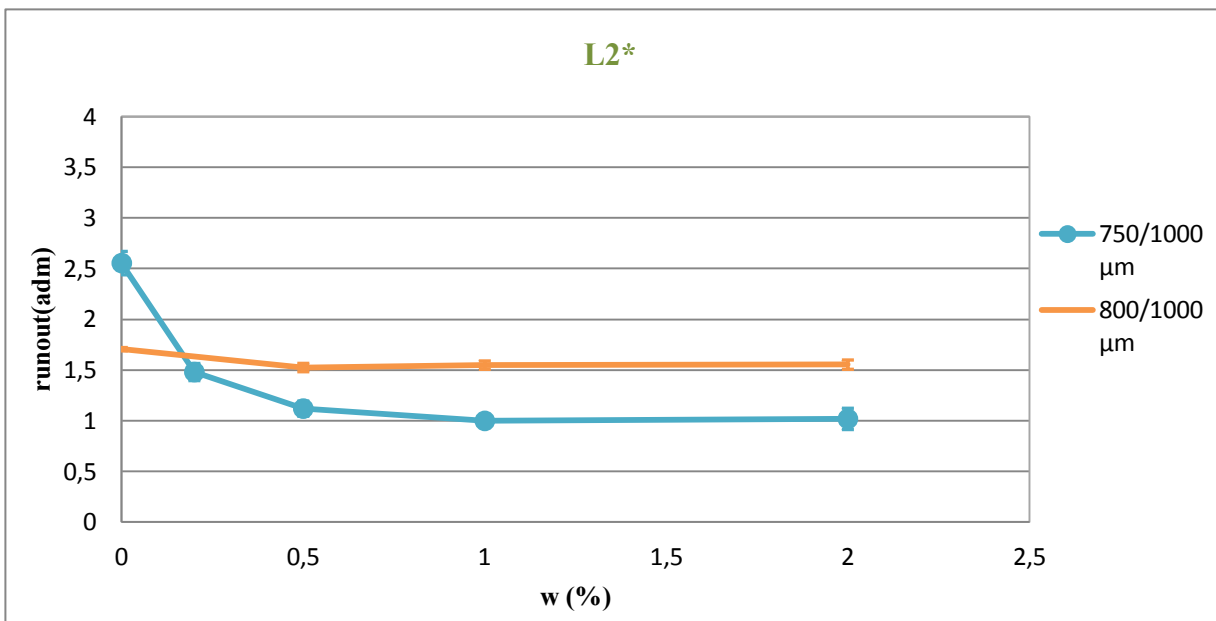


Figura 3.34: Confronto palline 750-1000 μm con carbonato 800-1000 μm nel calcolo di L2*

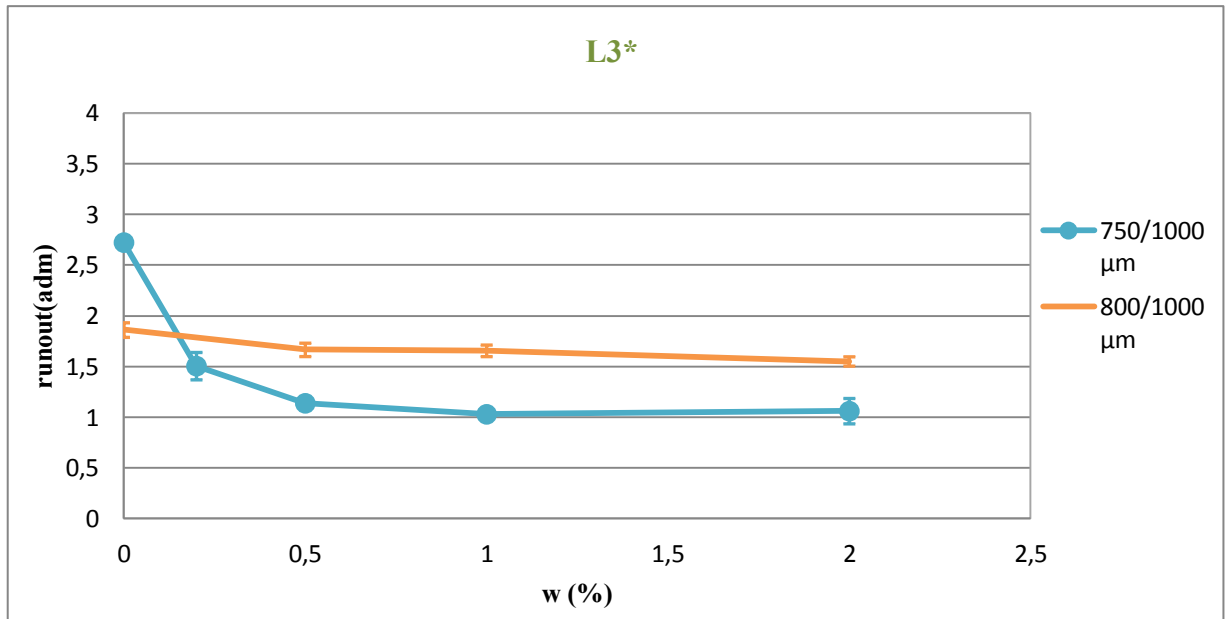


Figura 3.35: Confronto palline 750-1000 μm con carbonato 800-1000 μm nel calcolo di L3*

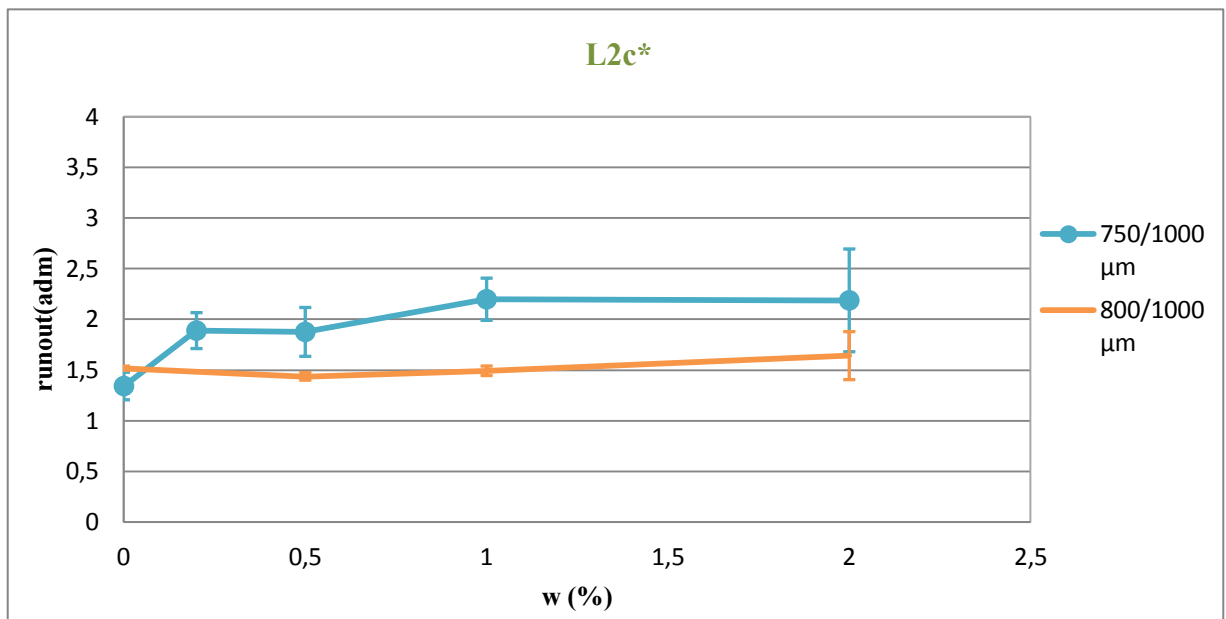


Figura 3.36: Confronto palline 750-1000 μm con carbonato 800-1000 μm nel calcolo di L2c*

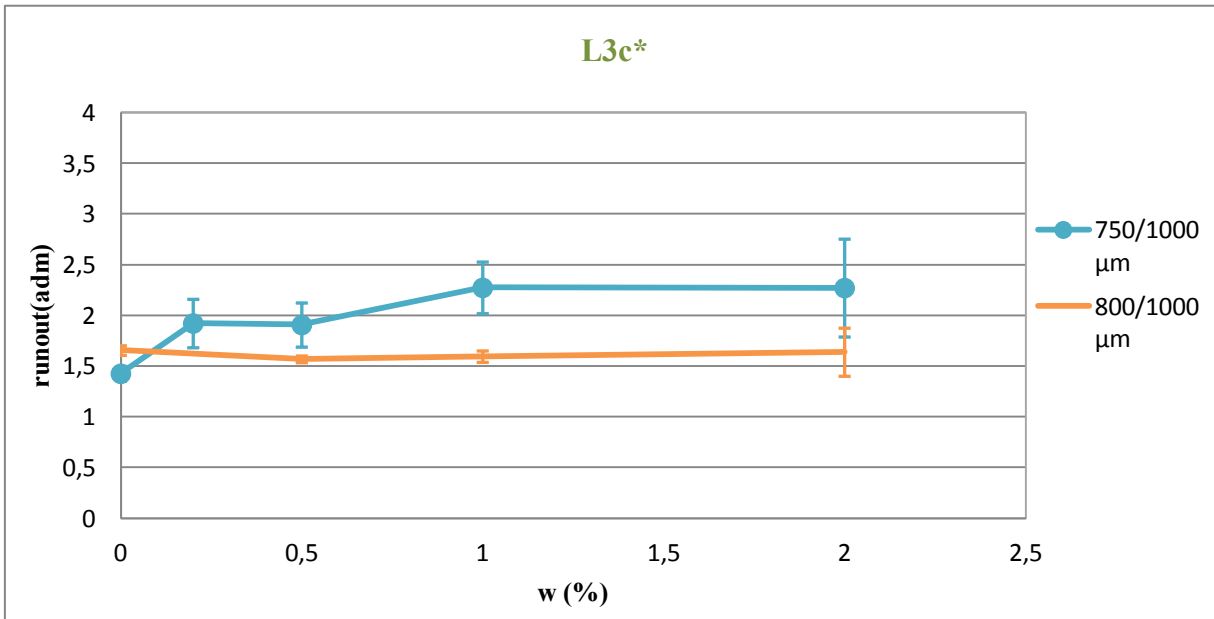


Figura 3.37: Confronto palline 750-1000 μm con carbonato 800-1000 μm nel calcolo di L3c*

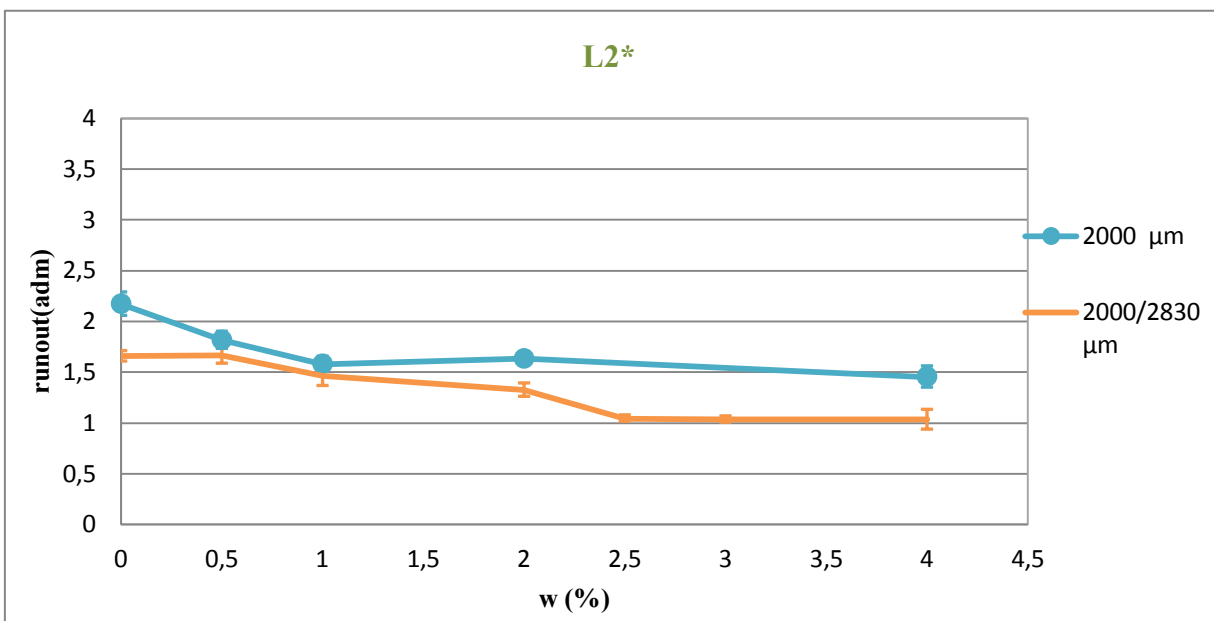


Figura 3.38: Confronto palline 2000 μm con carbonato 2000-2830 μm nel calcolo di L2*

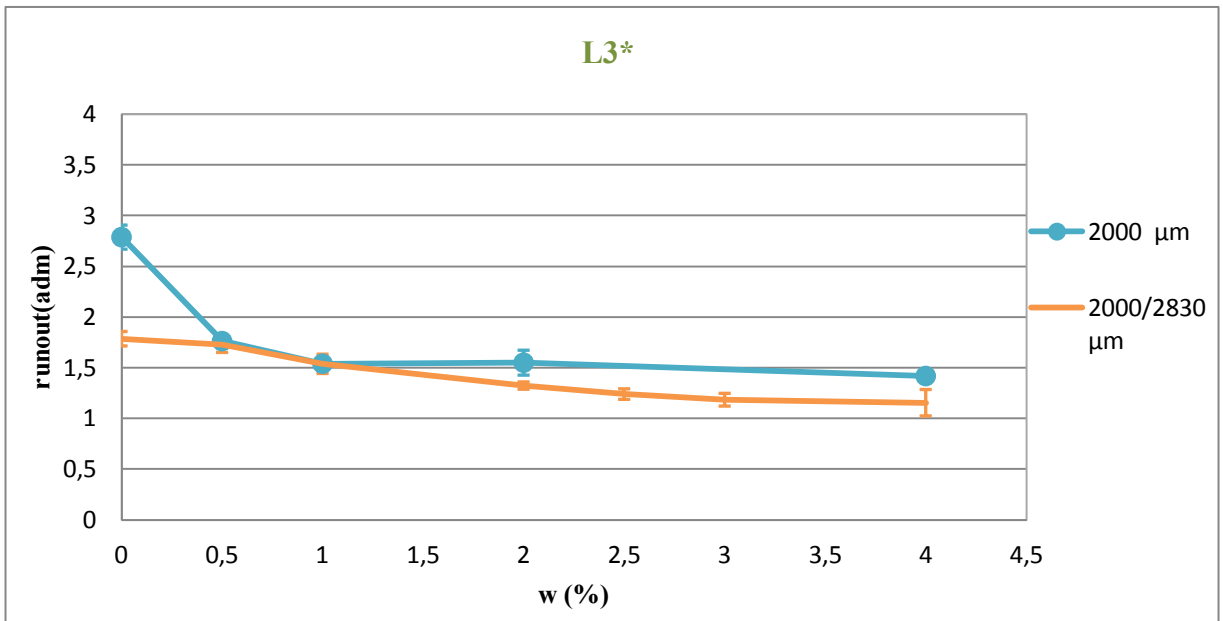


Figura 3.39: Confronto palline 2000 μm con carbonato 2000-2830 μm nel calcolo di L3*

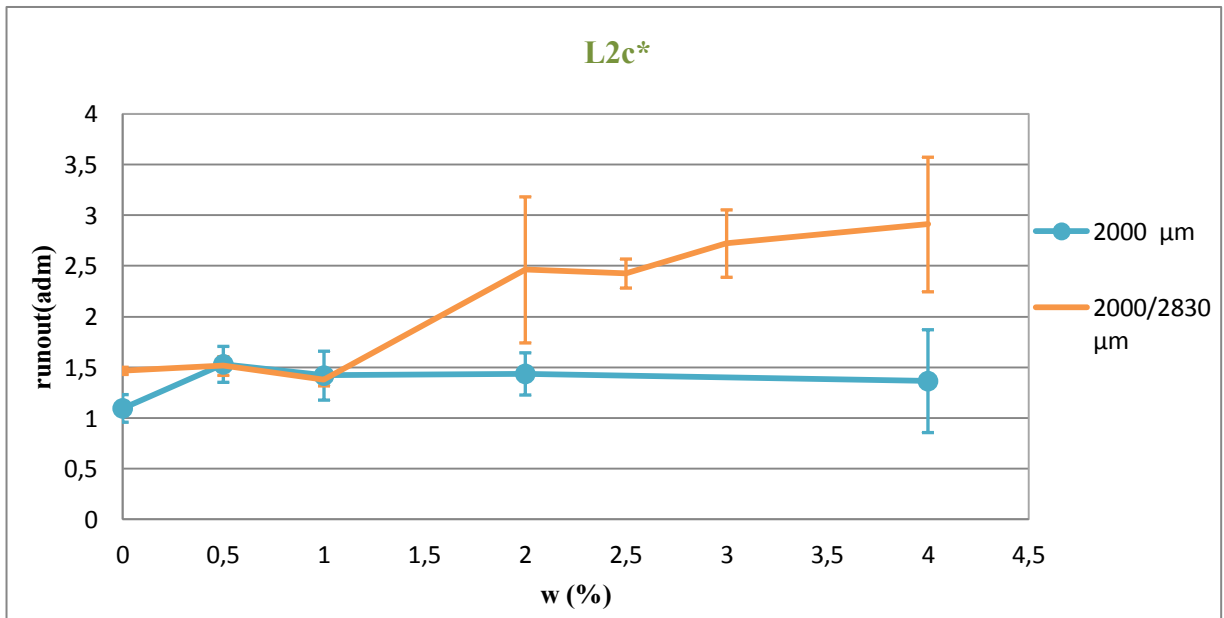


Figura 3.40: Confronto palline 2000 μm con carbonato 2000-2830 μm nel calcolo di L2c*

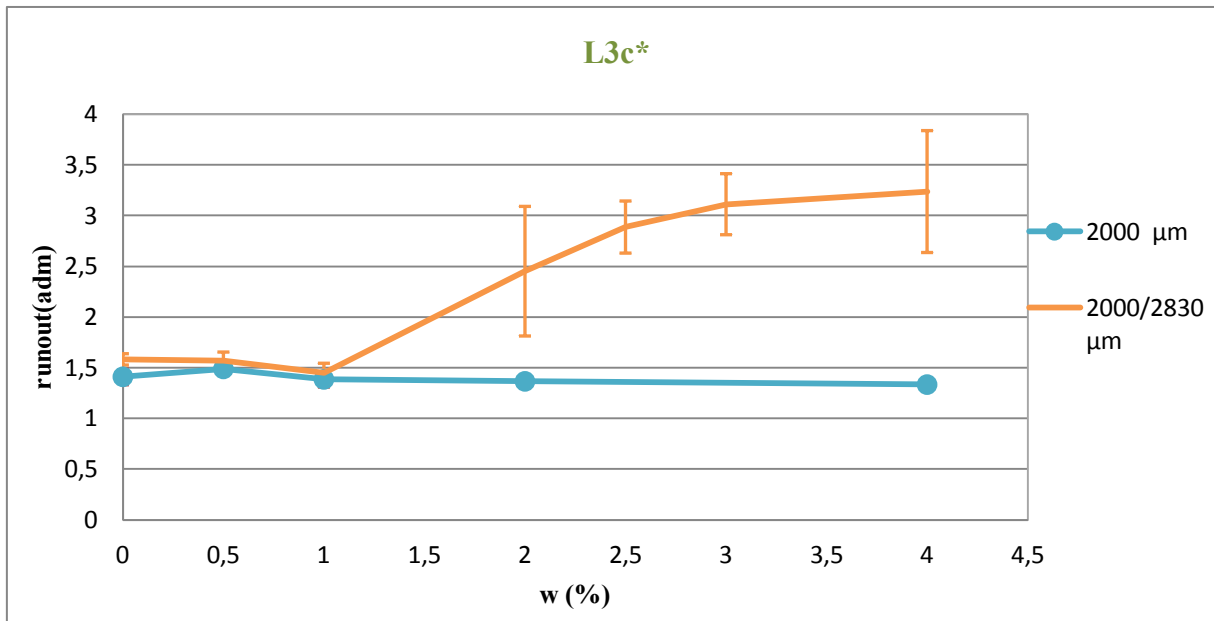


Figura 3.41: : Confronto palline 2000 μm con carbonato 2000-2830 μm nel calcolo di $L3c^*$

Analizzando le immagini si nota sin da subito che le palline tendono ad assumere un comportamento asintotico all'aumentare della quantità di liquido aggiunto, mentre il carbonato mostra un andamento (in diminuzione o in aumento a seconda che si calcoli L^* oppure Lc^*) variabile a percentuale in crescita: tale osservazione è stata fatta per particelle più piccole, quindi per palline di vetro da 750-1000 μm a confronto con carbonato di 800-1000 μm . Le condizioni si invertono per granulometrie di dimensioni maggiori: il materiale formato da microsfele di vetro tende ad un comportamento quasi costante, mentre il carbonato mostra un valore di runout che diminuisce/aumenta man mano che si analizza maggiore quantità di liquido sia per il calcolo di L^* che Lc^* .

Tali dati mettono in luce il comportamento dei due materiali analizzati, ricordando i fattori che possono portare a tale diversità:

- la diversa forma delle particelle, esattamente sferica con superficie liscia per le particelle di vetro, di forma spigolosa, irregolare e con superficie ruvida per il carbonato;
- la formazione dei ponti capillari in stato pendolare, con il totale utilizzo dell'acqua inserita, e suddivisi tra due particelle per le palline di vetro, con un parziale utilizzo del volume inserito suddiviso tra la formazione dei ponti e la copertura della superficie, per il carbonato di calcio;
- le condizioni sperimentali in cui si esegue la prova.

Un'osservazione in particolare, può essere centrata nello studio delle forze nel caso di materiale ideale, quindi per le palline di vetro: osservando le due dimensioni messe a confronto, si ricorda che tali forze che nascono con il mescolamento di liquido con solido, dipendono dal volume di liquido inserito, dalla distanza in cui le particelle si dispongono a ponte creato, dal raggio delle particelle stesse; tutto questo può esser riassunto nella formulazione 3.2 e 3.3 (*Gabrieli et al. 2013*), derivate da studi precedenti di letteratura. La condizione di trazione che il ponte liquido crea, aumenta a maggiori quantità di volume di liquido, alla diminuzione della distanza s tra le particelle, e a raggio sempre più piccolo di esse; tutte queste condizioni descritte possono essere condotte ai grafici delle Fig. 3.34-3.41.

Analizzando le palline di vetro si può dire che:

- per le palline più piccole (750-1000 μm) si nota un runout minore rispetto alla granulometria pari a 2000 μm , influenza della dimensione della particelle, in quanto la forza capillare diventa più intensa al diminuire del raggio, e quindi di conseguenza il runout diventa più piccolo. Infatti, nel primo caso il valore adimensionale risulta pari circa ad 1, con un andamento del grafico che tende progressivamente a calare, nel secondo caso pari ad 1.5, con un andamento pressoché costante, e tale ragionamento può essere centrato nello studio di $L2^*$ ed $L3^*$, che mostrano una maggiore applicazione della diminuzione dei dati per le dimensioni più piccole, influenzati comunque dall'aumento di liquido;
- per $L2c^*$ ed $L3c^*$ le palline da 750-1000 μm mostrano un aumento verso un valore pari a 2,3 più accentuato, rispetto alle dimensioni di 2000 μm , in cui si nota meno una crescita verso un valore pari a 1.5 circa. Si può giustificare tale condizione in quanto maggiore è la quantità di liquido più le forze crescono, il materiale si compatta, mostrando maggior coesione, e minore è il materiale che può essere eroso durante il collasso, per la teoria già vista (Fig.3.12). Le palline più piccole assumono un runout più alto in quanto la loro dimensione crea una forza maggiore che compatta di più il materiale, creando un fattore (Lo-Lc) più piccolo, dotato di maggiore energia, e quindi più capacità di scorrimento, rispetto al caso della particelle di 2000 μm .

Riassumendo schematicamente si può dire che:

- L^* : diminuisce all'aumento della % di acqua, ma

$$L^*_{750/1000}(w_{4\%}) < L^*_{2000}(w_{4\%})$$

- Lc^* : cresce all'aumento della % di acqua per Lc che aumenta ed (Lo-Lc) che

diminuisce, ma $Lc^*_{750/100}(w_{4\%}) > Lc^*_{2000}(w_{4\%})$ perché

$$Lc_{750/1000}(w_{-4\%}) > Lc_{2000}(w_{-4\%})$$

$$(Lo - Lc)_{750/1000}(w_{-4\%}) < (Lo - Lc)_{2000}(w_{-4\%})$$

Nel carbonato succede esattamente l'opposto:

- nel calcolo di L^* il carbonato in generale diminuisce il suo valore adimensionalizzato di runout all'aumento di volume di acqua, ma per particelle di dimensioni più piccole (800-1000 μm) L^* è maggiore rispetto a quello di dimensioni più grandi, nonostante le forze che si esplicano nel primo caso siano superiori a causa del raggio più piccolo, come da ipotesi per le palline di vetro;
- per Lc^* il carbonato aumenta alla crescita del volume di acqua, come ci si aspetta dalle ipotesi precedentemente dimostrate e sostenute, ma ad alte percentuali assume valori più bassi per dimensioni di 800-1000 μm rispetto a 2000-2830 μm , rispettivamente 1.5 nel primo caso e 3 circa nel secondo, aspettandosi in realtà la condizione opposta, sempre influenzata dalle dimensioni delle particelle.

Riassumendo anche questo caso schematicamente:

- L^* : diminuisce all'aumento della % di acqua, ma

$$L^*_{800/1000}(w_{-4\%}) > L^*_{2000/2830}(w_{-4\%})$$

- Lc^* : cresce all'aumento della % di acqua per Lc che aumenta ed $(Lo-Lc)$ che diminuisce, ma

$$Lc^*_{800/1000}(w_{-4\%}) < Lc^*_{2000/2830}(w_{-4\%})$$

$$Lc_{800/1000}(w_{-4\%}) > Lc_{2000/2830}(w_{-4\%})$$

$$(Lo - Lc)_{800/1000}(w_{-4\%}) < (Lo - Lc)_{2000/2830}(w_{-4\%})$$

Giustificazione di tale comportamento può essere dedotta da quanto già affermato, ossia la non perfetta forma del carbonato, e la quantità di acqua che non viene totalmente ad essere condivisa tra le particelle come ponte capillare, ma va a ricoprire una parte della superficie, quindi è come se a prova di collasso eseguita, il carbonato avesse meno percentuale di acqua rispetto al vetro; inoltre si ricorda la variabilità a cui possono essere soggetti tali dati analizzati tramite il software Image j (par. 2.4). Può essere giustificato così il comportamento opposto dei due materiali alla variazione delle granulometrie e della percentuale di liquido.

Se infine si osservano i grafici di Fig. 3.34, 3.35, 3.40 e 3.41 (ritenuti i più rappresentativi) possono essere fatte delle osservazioni nel confronto diretto dei materiali:

- per le dimensioni più piccole, nel calcolo di L^* , il carbonato tende ad assumere un valore adimensionalizzato superiore rispetto alle palline di vetro, prova che le forze

che si sono create , a parità di acqua e dimensioni simili, sono di una intensità minore rispetto all'altro a causa del raggio differente delle particelle;

- per le dimensioni più grandi, nel calcolo di Lc^* , il carbonato tende a raggiungere valori sempre più crescenti, nettamente maggiori delle palline, testimonianza del fatto che tale materiale sviluppa un Lc maggiore, e crea una coesione tale da portare in difficoltà il materiale stesso a collassare.

Capitolo 4

Risultati sperimentali prova di taglio

Si riportano di seguito i risultati e le relative analisi che sono state condotte per la prova di taglio, eseguita tramite cella shear (Cap.2) per il calcolo di due importanti dati per entrambi i materiali analizzati in tale tesi: angolo di attrito e coesione. Tali caratteristiche influenzano l'eventuale collasso del materiale, e quindi il comportamento di esso nella prova sperimentale precedente. Anche in questo caso i dati sono stati uniti a dati precedentemente analizzati (*Sandalo, 2014/2015*) per poter avere una visione più completa del problema analizzato.

4.1 Resistenza al taglio

Come già anticipato, le forze che ora si vanno a trattare riguardano la coesione e l'attrito, che con buona approssimazione è possibile trattare attraverso lo studio della legge di Mohr-Coulomb (*Meruane et al., 2010*):

$$\tau = \mu \cdot \sigma + C \quad (4.1)$$

In cui C rappresenta la coesione, la quale dipende dal materiale e dalla grandezza delle particelle, σ rappresenta lo sforzo a cui il materiale è sottoposto, mentre μ rappresenta il coefficiente di attrito interno del materiale, definito come $\mu = \tan(\varphi)$ in cui φ rappresenta l'angolo di attrito interno del materiale.

Dalla teoria della geotecnica, i materiali che presentano maggiore resistenza sono classificati come terreni granulari o incoerenti, tipico esempio sono le sabbie o le ghiaie le cui particelle sono visibili ad occhio nudo, mentre si distinguono come terreni incoerenti o grana fine le argille e i limi, la cui frazione che li compongono risulta microscopica. Ovviamente diverse sono le dimensioni granulometriche che li caratterizzano, e la forma delle particelle che le compongono.

In generale quando si parla di resistenza al taglio si intende il massimo valore dello sforzo di taglio che un materiale può sopportare senza rompersi, e può essere rappresentato graficamente attraverso una relazione di legame tra la tensione τ e la deformazione γ (Fig.4.1).

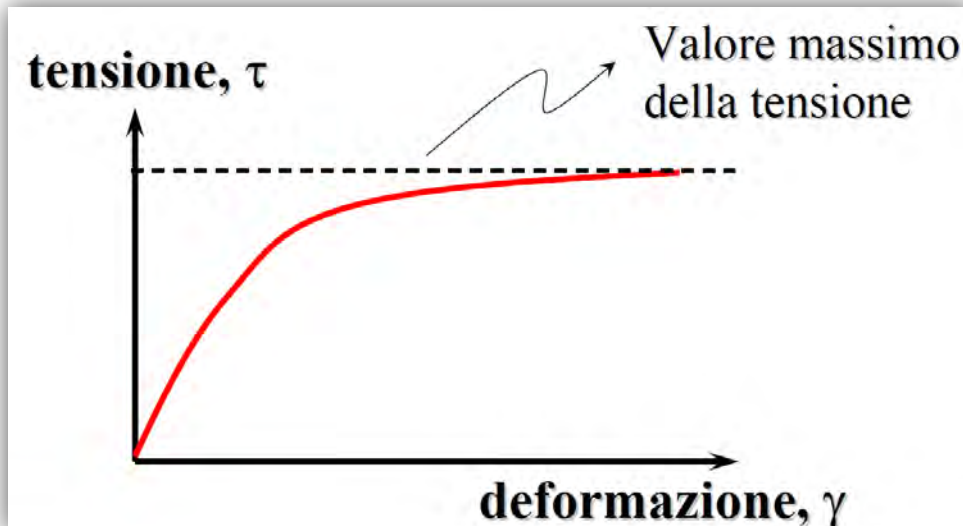


Figura 4.1: Andamento tensione/deformazione di un terreno all'applicazione di carichi

Si può affermare che comunemente i terreni si rompono per taglio e ciò avviene quando lo sforzo agente raggiunge la resistenza massima del terreno, e quindi quella tensione tale che è in grado di sopportare: avviene uno scorrimento dei grani tra di loro, non una singola rottura di essi, creando in particolare delle superfici di scorrimento. Si intuisce quindi che la resistenza dipenda da fattori quali:

- la disposizione dei grani;
- l'attrito che il materiale esprime;
- eventuale coesione che può nascere con presenza di liquidi;
- forze di adesione date da eventuali legami creati da cementazioni o particolari additivi inseriti.

Dalla letteratura, un criterio che permette di studiare la rottura che si crea nel terreno è quello definito dall'equazione 4.1 che può essere scomposta quindi in due contributi che sono stati menzionati: contributo dato dalla coesione del materiale e l'altro dall'attrito interno.

Questi sono rappresentabili schematicamente attraverso una dimostrazione delle tensioni interne che si creano nel terreno considerato, attraverso i cerchi di Mohr, ossia, quell'insieme di punti rappresentanti quelle tensioni che si sviluppano a seconda dello sforzo a cui il terreno viene sottoposto (Fig. 4.2).

Al crescere del carico le tensioni aumentano, e i cerchi diventano man mano più grandi e la condizione di rottura viene raggiunta nel momento in cui il cerchio rappresentativo dello stato tensionale considerato è tangente alla retta limite, di pendenza pari all'attrito, e intercetta pari alla coesione.

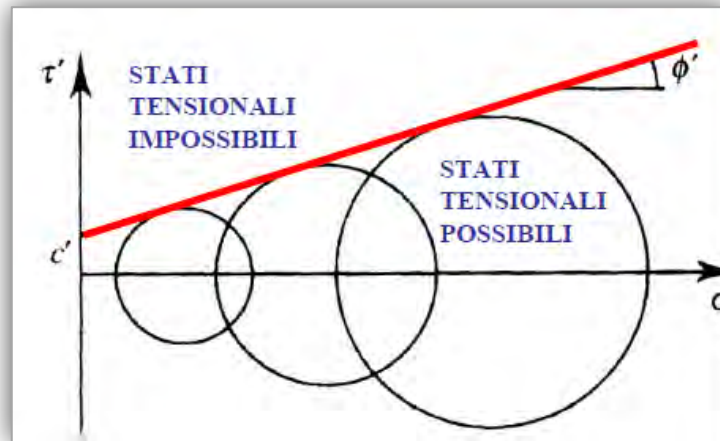


Figura 4.2: Rappresentazione stati tensionali di un terreno

Quella retta quindi rappresenta la resistenza limite del materiale.

I parametri C e φ vengono definiti parametri di resistenza al taglio: più essi sono elevati, maggiore è la resistenza del terreno. Sono influenzati dalla presenza di eventuale acqua, in quanto il terreno presenta due tipi di tensioni:

$$\sigma = \sigma' + u \quad (4.2)$$

In cui σ rappresenta la tensione totale, contributo di tensione efficace, tipica dello scheletro solido (σ') e della tensione neutrale, data dalla presenza di acqua (u). Quindi l'equazione, in presenza di acqua 4.1 diventa:

$$\tau = \tan(\varphi') \cdot \sigma' + C' \quad (4.3)$$

Il comportamento tipico di sabbie e argille risulta essere opposto e diverso, come già detto, in quanto la sabbia presenta buone capacità di drenaggio, e quindi sviluppa una elevata tensione efficace, quindi una buona resistenza, senza dare un contributo di coesione; le argille invece hanno un elevato contributo di coesione, e per questo risultano essere meno resistenti in quanto tendono a trattenere eventuali liquidi inseriti (Fig. 4.3).

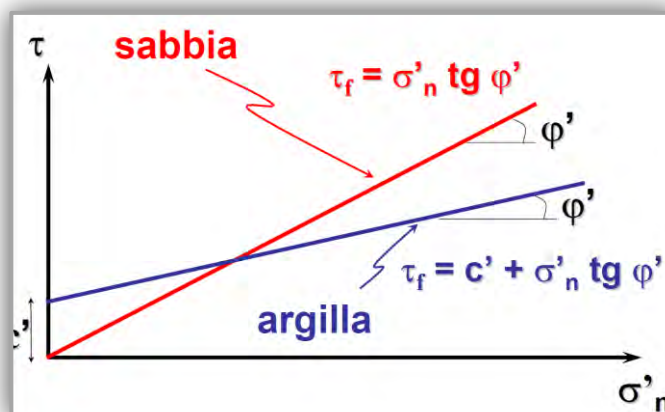


Figura 4.3: Variazione della resistenza al taglio

Dopo questa breve introduzione generale si riportano i valori ottenuti dalle prove eseguite ricordando che i materiali sono stati valutati nelle stesse percentuali di acqua usate nelle prove di collasso, per poter capire nelle stesse condizioni qual è la resistenza che il materiale ha mostrato, ulteriore condizione di influenza nella modalità di collasso.

4.2 Risultati delle prove

Come già descritto i dati sono stati uniti ad analisi precedenti, e si sottolinea che ogni prova è stata condotta singolarmente, non con più ripetizioni come nel caso del collasso. Eventuali ripetizioni sono state fatte per alcuni casi (in particolare carbonato 800-1000 μm con 2% e 2,5% di acqua; 1180-1410 con 2%, 2,5% e 3% di acqua; 1410-2000 con 2,5%, 3% e 4% di acqua) in quanto la cella ha generato errori di calcolo e dati molto variabili, soprattutto visualizzando i cerchi di Mohr che il software ha generato. In seguito a tali condizioni il materiale è stato sottoposto ad una compattazione e preparazione del provino diversa, in modo da generare maggiore densità in esso (si ricorda che una buona valutazione dell'attrito dipende anche dallo stato di addensamento oltre che dalla forma, dalla distribuzione granulometrica o dalla mineralogia del materiale) e non preparare un provino totalmente piano, ma leggermente convesso, in modo tale da meglio riempire la piastra di chiusura superiore della cella, posta a compressione alla variazione dei carichi, evitando che questa si incastri nel materiale, in quanto tipicamente usata per polveri fini.

Si nota infine che, sia per il calcolo dell'attrito che della coesione, sono stati due i metodi sviluppati: attraverso la media dei primi tre risultati, cioè quelli derivanti dall'applicazione di carichi pari ad 0,33 kPa, 0,62 kPa e 1,22 kPa, scartando gli ultimi due corrispondenti a carichi di 2,43 e 4,86 kPa; attraverso interpolazione lineare per valori di tensione intermedi (0,62 kPa e 1,22 kPa) , per un valore di tensione σ pari a 0,8 kPa, in quanto si è cercato di studiare le stesse ipotetiche condizioni di tensione del provino (in particolare di carbonato) sottoposto alla prova di collasso, per una dimensione a metà dell'altezza del provino stesso.

$$\sigma = \gamma \cdot z = 20 \frac{kN}{m^3} \cdot 0,04m = 0,8 \frac{kN}{m^2} = 0,8kPa \quad (4.4)$$

Tale condizione è stata anche applicata per le palline di vetro.

Si riportano comunque successivamente esempi di errore, in cui i materiali che hanno mostrato problematiche sono stati sottoposti a due condizioni di carico, sempre per evitare il blocco della cella, pari a 0,28 KPa e 2,45 Kpa, che però verranno spiegati in seguito.

4.2.1 Palline di vetro

Per quanto riguarda la prova eseguita per le palline di vetro, oltre allo studio del caso secco, è stata aggiunta una certa quantità liquido variabile: 0,2%, 0,5%, 1% e 2%. Questo per quanto riguarda palline di diametro nell'intervallo 750-1000 μm . Si riportano inoltre, valori per lo studio dello stesso materiale ma di diametro 1500 μm , con 0%, 0,1%, 0,5%, 1% e 2% di liquido, che sono stati tutti precedentemente sperimentati ed analizzati, di cui si va a ritrattare, per meglio studiare il tema nel complesso e capire la differenza di risultati per le due granulometrie, ricavandone le successive osservazioni; per questa prova non sono state analizzate dimensioni maggiori come per il collasso (2000 μm , 3000 μm , e 5000 μm).

I dati riportati nelle tabelle sono tutti risultati di interpolazione ad un valore di tensione pari a 0,8.

Tabella 4.1: diametro 750-1000 μm , valori da interpolazione

Materiale	% w	φ [°]	C' [kPa]
Palline di vetro	0	23,94	0,017
Palline di vetro	0,2	20,80	0,078
Palline di vetro	0,5	21,24	0,092
Palline di vetro	1	20,56	0,103
Palline di vetro	2	19,21	0,127

Tabella 4.2: diametro 1500 μm , valori da interpolazione

Materiale	% w	φ [°]	C' [kPa]
Palline di vetro	0	25,13	0,010
Palline di vetro	0,1	23,95	0,028
Palline di vetro	0,2	22,87	0,040
Palline di vetro	0,5	23,10	0,044
Palline di vetro	1	21,96	0,063

Tali valori sono stati riportati in grafici, analizzati in base alla percentuale in peso di acqua. Le curve ottenute rappresentano l'andamento dell'angolo di attrito φ' e della coesione C' al variare della percentuale di acqua con cui il materiale è stato mescolato.

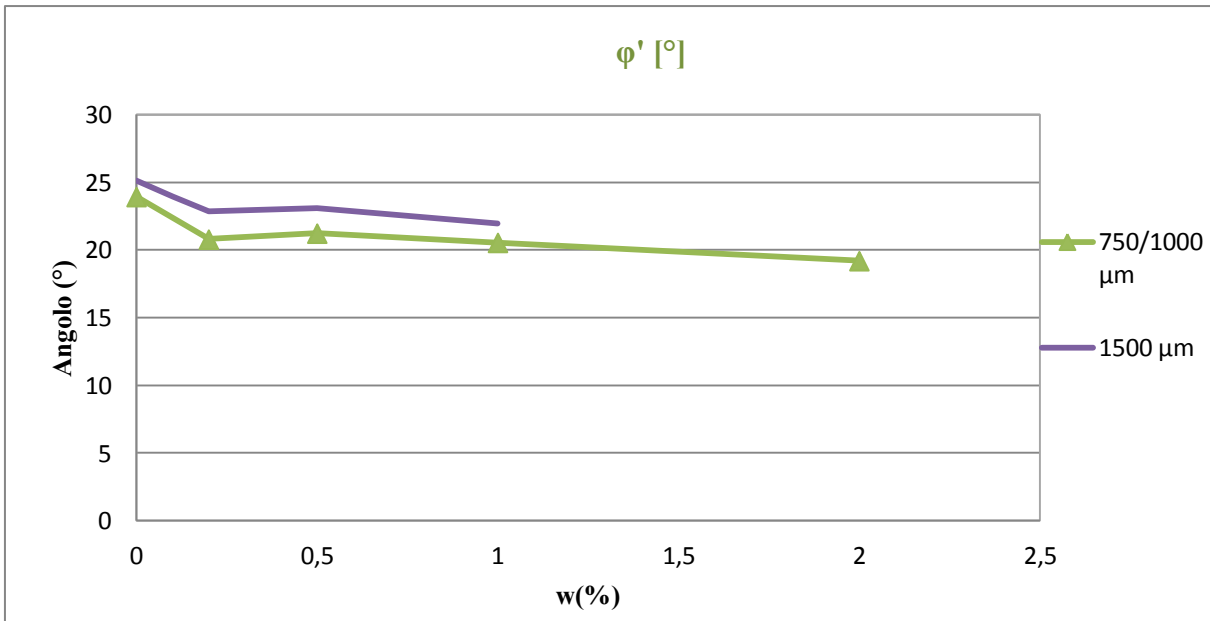


Figura 4.4: Andamento dell'angolo di attrito rispetto alla percentuale di acqua aggiunta (interpolazione)

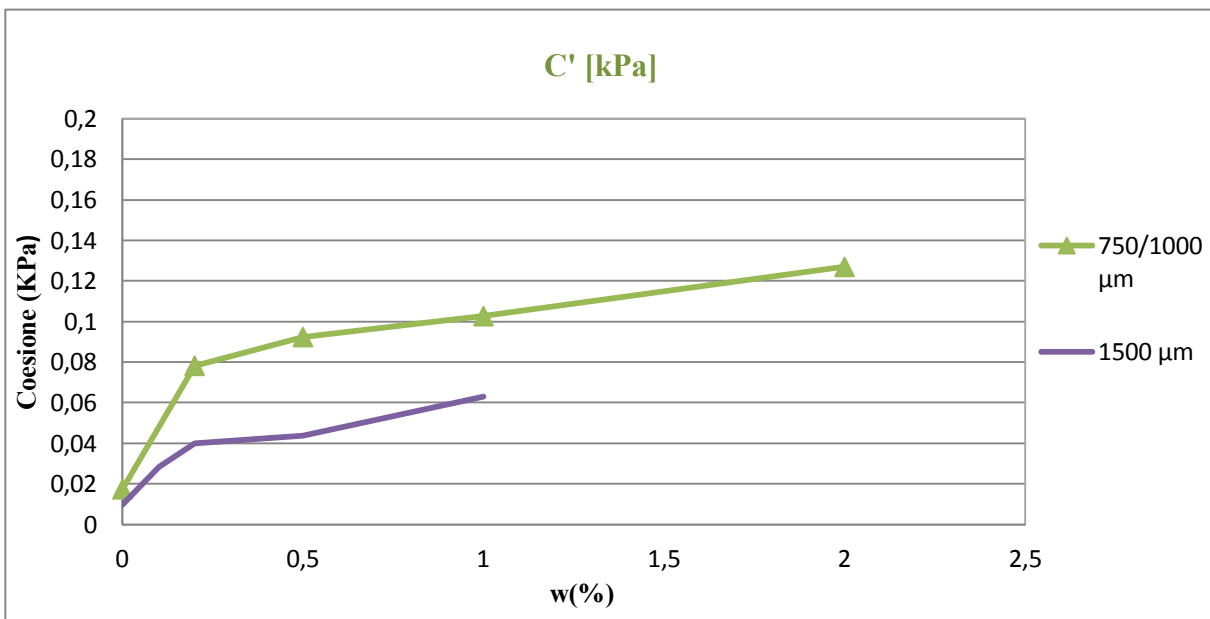


Figura 4.5: Andamento della coesione rispetto alla percentuale di acqua aggiunta (interpolazione)

Come si nota visibilmente dalle figure, per entrambe le granulometrie, all'aumento della percentuale di acqua l'attrito diminuisce e la coesione aumenta; a quanto pare, in condizioni di secco le palline da 1500 μm presentano un attrito più elevato, influenza forse data dalle dimensioni, e mantiene tale condizioni fino all'1% di acqua, percentuale per la quale il materiale è stato studiato. Nella coesione i due grafici si invertono, ottenendo valori più alti per le palline da 750-1000 μm , con un aumento fino al 4% di liquido inserito: tale giustificazione è sempre legata alla dimensione, in quanto più il raggio è piccolo, maggiore è la forza capillare che si sviluppa, e maggiore quindi è la coesione che nel materiale si crea.

Si riportano come esempio i valori che sono stati ottenuti nel caso in cui i calcoli sono stati basati sulla media dei primi tre valori (sia per attrito che per coesione) che il software ha registrato, notando che per tale tipologia di elemento non sono stati ottenuti visibili errori, anzi, i grafici elaborati risultano chiari e puliti, ricordando che si tratta di particelle esattamente sferiche che non presentano irregolarità e scabrosità.

Tabella 4.3: diametro 750-1000 μm , valori medi

Materiale	% w	φ [°]	C' [kPa]
Palline di vetro	0	24,20 \pm 0,53	0,016 \pm 0,003
Palline di vetro	0,2	20,67 \pm 0,23	0,072 \pm 0,023
Palline di vetro	0,5	20,43 \pm 1,33	0,088 \pm 0,023
Palline di vetro	1	19,97 \pm 1,10	0,097 \pm 0,025
Palline di vetro	2	19,60 \pm 1,05	0,114 \pm 0,026

Tabella 4.4: diametro 1500 μm , valori medi

Materiale	% w	φ [°]	C' [kPa]
Palline di vetro	0	25,03 \pm 0,21	0,011 \pm 0,003
Palline di vetro	0,1	23,90 \pm 0,95	0,028 \pm 0,016
Palline di vetro	0,2	23,03 \pm 0,31	0,036 \pm 0,011
Palline di vetro	0,5	22,70 \pm 0,69	0,043 \pm 0,008
Palline di vetro	1	22,10 \pm 0,20	0,057 \pm 0,022

In ogni caso, a fine di tale tesi, si considerano grafici e dati ottenuti tramite interpolazione.

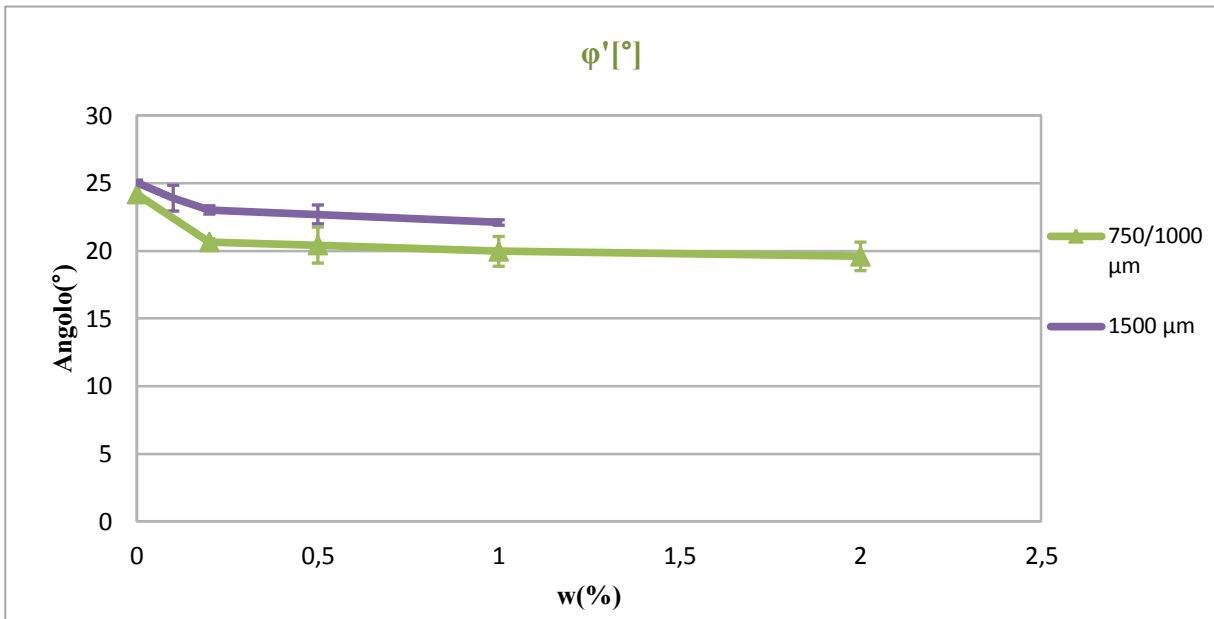


Figura 4.6: Andamento dell'angolo di attrito rispetto alla percentuale di acqua aggiunta (valori medi)

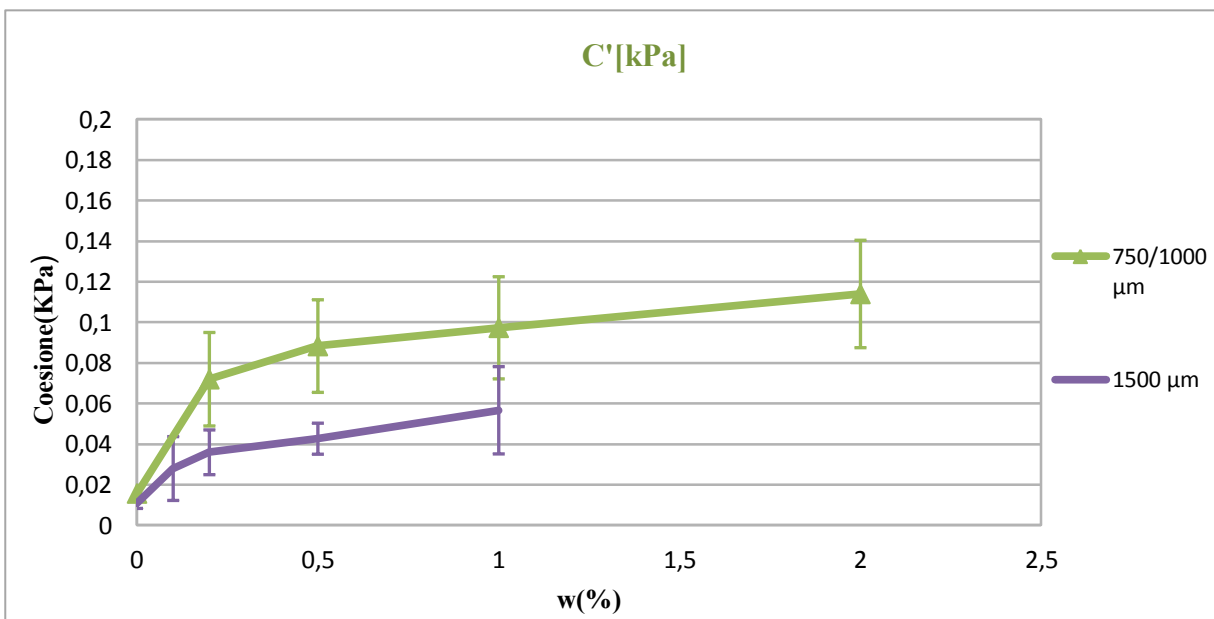


Figura 4.7: Andamento della coesione rispetto alla percentuale di acqua aggiunta (valori medi)

In generale comunque, valutando le due condizioni opposte del materiale, quindi in condizioni di secco, e con una percentuale pari al 2% (per 750-1000 μm , che è la granulometria testata per tale tesi) si può dire che l'attrito parte da un valore di circa 24° per arrivare ad un valore di 19°, quindi una diminuzione di 7° per l'angolo di attrito, avvenuta per l'aggiunta di acqua. La coesione invece ha mostrato un aumento, abbastanza lineare, partendo

da 0,017 kPa, e come risultato finale 0,114 kPa. Tale comportamento ha rispecchiato le aspettative previste, riguardo le teorie studiate sui materiali granulari.

4.2.2 Carbonato di calcio

Per il carbonato, sono state studiate le stesse quattro frazioni trattate per la prova di collasso, con le stesse percentuali, unite a risultati di analisi precedenti (tutte e quattro le frazioni valutate allo 0%, 0,5%, 1% e 2%, *Sandalo*), per poter valutare nel complesso il problema, quindi il comportamento ottenuto al variare del liquido aggiunto, e meglio relazionare i risultati di tale prova con quelli ottenuti dalla prima prova sperimentale eseguita. Le percentuali affrontate quindi sono state: 2,5%, 3% e 4% con la ripetizione della prova al 2% (già eseguita in altri studi ma ripetuta per confronto dati); si nota che queste percentuali sono state aggiunte alle frazioni 3 e 4, in quanto, tali percentuali hanno verificato il collasso nella prova precedente. Per la frazione 1 (800-1000 μm) l'analisi si è fermata al 2,5% di acqua, e per la frazione 2 (1180-1410 μm) fino al 3%, perché per percentuali maggiori la prova di collasso non ha prodotto risultati, mostrando il materiale compatto e non franato (Fig. 3.19 e 3.20).

Si riportano in seguito i valori interpolati sempre per una tensione di consolidazione di 0,8 kPa.

Tabella 4.5: *Frazione 1 carbonato, 800-1000 μm da interpolazione*

Materiale	% w	ϕ [°]	C' [kPa]
Frazione 1	0	36,71	0,022
Frazione 1	0,5	37,46	0,032
Frazione 1	1	36,97	0,038
Frazione 1	2	34,08	0,082
Frazione 1	2,5	31,25	0,120

Tabella 4.6: *Frazione 2 carbonato, 1180-1410 μm da interpolazione*

Materiale	% w	ϕ [°]	C' [kPa]
Frazione 2	0	38,72	0,038
Frazione 2	0,5	34,36	0,099
Frazione 2	1	39,30	0,047
Frazione 2	2	35,48	0,068
Frazione 2	2,5	34,74	0,093
Frazione 2	3	32,68	0,131

Tabella 4.7: Frazione 3 carbonato, 1410-2000 μm da interpolazione

Materiale	% w	φ [°]	C' [kPa]
Frazione 3	0	38,62	0,060
Frazione 3	0,5	37,39	0,085
Frazione 3	1	37,62	0,063
Frazione 3	2	36,40	0,056
Frazione 3	2,5	33,72	0,109
Frazione 3	3	33,24	0,115
Frazione 3	4	33,24	0,115

Tabella 4.8: Frazione 4 carbonato, 2000-2830 μm da interpolazione

Materiale	% w	φ [°]	C' [kPa]
Frazione 4	0	38,20	0,043
Frazione 4	0,5	36,61	0,113
Frazione 4	1	39,66	0,081
Frazione 4	2	36,98	0,095
Frazione 4	2,5	36,52	0,072
Frazione 4	3	35,37	0,106
Frazione 4	4	37,06	0,107

Tutti i valori sono stati riportati in grafici, analizzati in base alla percentuale in peso di acqua (non sono stati inseriti i risultati corrispondenti allo 0,5% in quanto sono stati ritenuti poco rappresentativi).

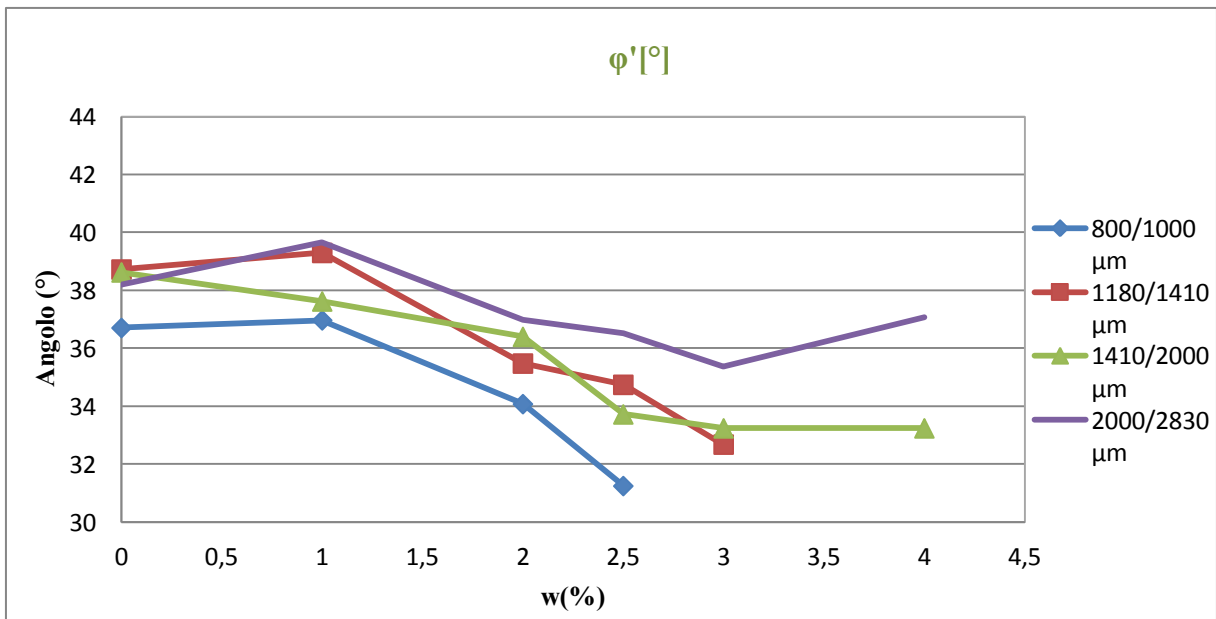


Figura 4.8: Andamento dell'angolo di attrito rispetto alla percentuale di acqua aggiunta (interpolazione)

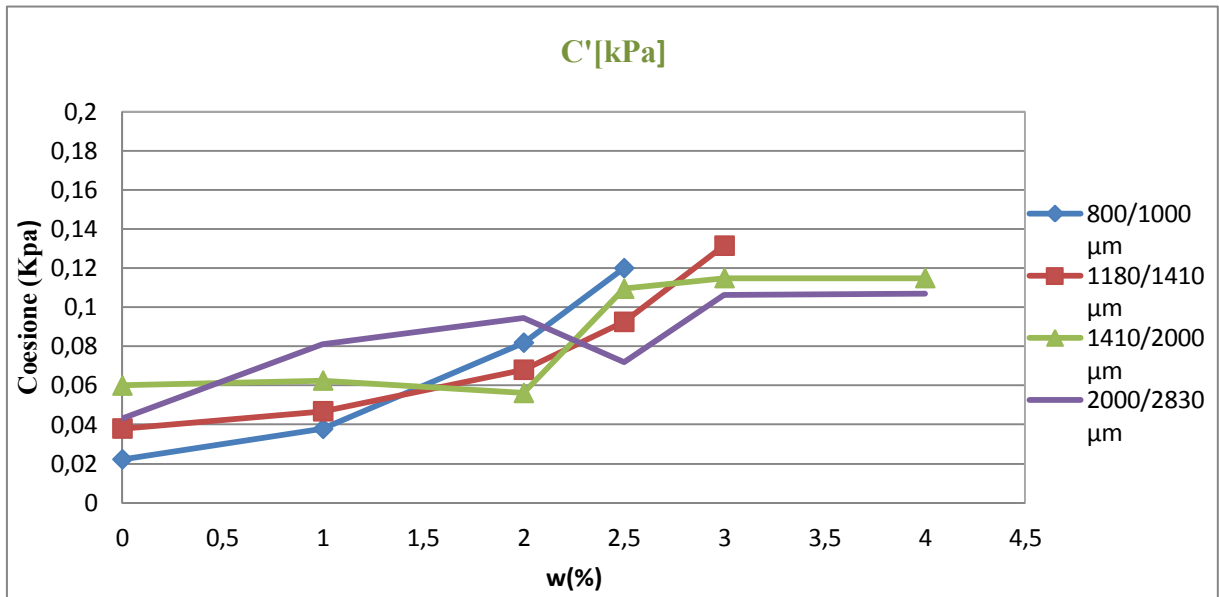


Figura 4.9: Andamento della coesione rispetto alla percentuale di acqua aggiunta (interpolazione)

Per questo materiale entrambi i fattori calcolati non mostrano grafici netti come per il caso delle palline di vetro, ma comunque si nota che l'attrito ha una diminuzione e la coesione un aumento, il tutto alla crescita delle percentuali di acqua inserita; un piccolo errore può essere considerato per il carbonato 2000-2830 µm in corrispondenza dello 2,5% di acqua (nonostante la prova sia stata ripetuta più volte), la granulometria con maggiori dimensioni e i dati di essa possono essere soggetti ad errore, in quanto la cella è predisposta per analisi di polveri fini. Il valore più basso di attrito è raggiunto dalla granulometria più piccola e quindi dal carbonato 800-1000 µm, pari a circa 31°, rispetto al risultato di 33° del carbonato 2000-2830 µm (valutati alla stessa percentuale): tale condizione è sempre giustificata (come per le palline di vetro) dalle dimensioni che le particelle presentano, ossia più il loro raggio è piccolo, minore risulta essere l'attrito, con un valore di coesione però più alto, infatti in quel caso risulta essere pari a circa 0,12 KPa, superiore alla coesione di particelle di 2000-2830 µm, testimonianza della creazione di forze capillari di maggiore intensità, dipendenti anch'esse dal raggio della particelle, come già affermato (Cap 3).

Si riportano anche in questo caso, come esempio, i valori ottenuti attraverso il calcolo delle medie dei primi tre dati generati dal software.

Tabella 4.9: *Frazione 1 carbonato, 800-1000 μm , valori medi*

Materiale	% w	φ [°]	C' [kPa]
Frazione 1	0	37,57 ± 1,29	0,015 ± 0,010
Frazione 1	0,5	37,17 ± 0,59	0,033 ± 0,008
Frazione 1	1	37,43 ± 0,67	0,029 ± 0,018
Frazione 1	2	32,70 ± 1,15	0,089 ± 0,022
Frazione 1	2,5	31,70 ± 0,69	0,115 ± 0,016

Tabella 4.10: *Frazione 2 carbonato, 1180-1410 μm , valori medi*

Materiale	% w	φ [°]	C' [kPa]
Frazione 2	0	39,23 ± 1,27	0,033 ± 0,042
Frazione 2	0,5	34,73 ± 3,27	0,072 ± 0,039
Frazione 2	1	39,10 ± 1,48	0,045 ± 0,038
Frazione 2	2	35,87 ± 1,76	0,064 ± 0,053
Frazione 2	2,5	33,83 ± 1,31	0,091 ± 0,055
Frazione 2	3	32,30 ± 1,21	0,132 ± 0,089

Tabella 4.11: *Frazione 3 carbonato, 1410-2000 μm , valori medi*

Materiale	% w	φ [°]	C' [kPa]
Frazione 3	0	37,73 ± 2,06	0,063 ± 0,060
Frazione 3	0,5	39,80 ± 3,57	0,048 ± 0,054
Frazione 3	1	37,00 ± 0,92	0,057 ± 0,032
Frazione 3	2	35,80 ± 1,35	0,054 ± 0,013
Frazione 3	2,5	34,83 ± 1,08	0,105 ± 0,050
Frazione 3	3	32,30 ± 1,95	0,112 ± 0,040
Frazione 3	4	34,93 ± 3,76	0,088 ± 0,016

Tabella 4.12: *Frazione 4 carbonato, 2000-2830 μm , valori medi*

Materiale	% w	φ [°]	C' [kPa]
Frazione 4	0	37,07 ± 4,36	0,030 ± 0,020
Frazione 4	0,5	37,20 ± 0,89	0,086 ± 0,060
Frazione 4	1	37,90 ± 2,69	0,072 ± 0,036
Frazione 4	2	36,87 ± 0,93	0,074 ± 0,1078
Frazione 4	2,5	31,70 ± 7,24	0,098 ± 0,041
Frazione 4	3	35,60 ± 1,87	0,106 ± 0,057
Frazione 4	4	36,73 ± 1,72	0,089 ± 0,031

Tutti i dati trascritti sono risultati provenienti dall'applicazione di cinque carichi di consolidazione come già affermato (Cap. 4.2).

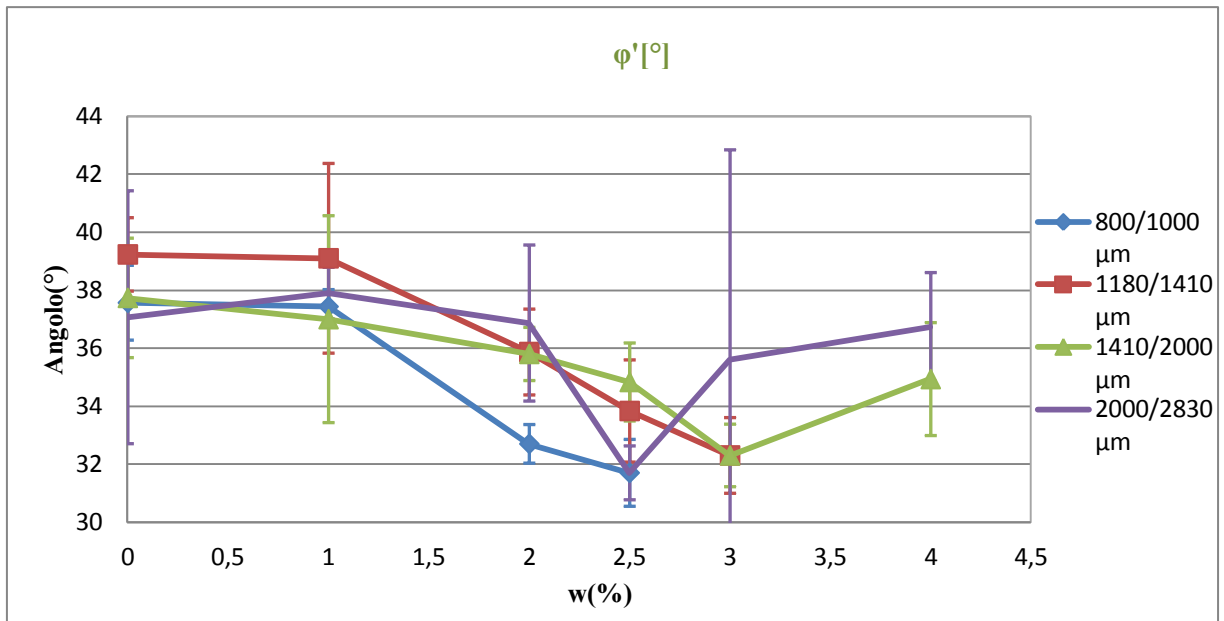


Figura 4.10: Andamento dell'angolo di attrito rispetto alla percentuale di acqua aggiunta (valori medi)

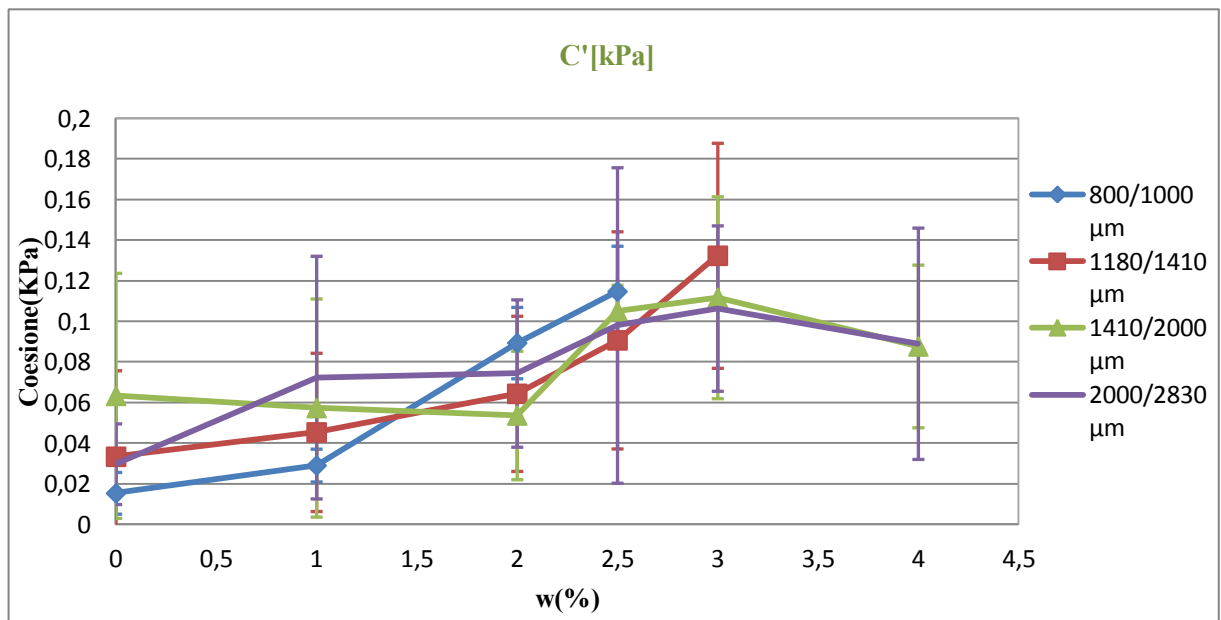


Figura 4.11: Andamento della coesione rispetto alla percentuale di acqua aggiunta (valori medi)

Per tale tipo di materiale, si dimostra che i grafici valutati attraverso il calcolo dei valori medi, non risultano di immediata valutazione, anche se comunque, a grandi linee, l'attrito cala e la coesione cresce, sempre in relazione all'aumento di liquido inserito. Come si nota, attraverso l'inserimento delle barre di errore, i dati ottenuti risultano essere molto variabili per certi intervalli di valori; si conferma quindi, come lo è stato per le palline di vetro, la presa in considerazione dei calcoli eseguiti attraverso il metodo dell'interpolazione.

Si riportano infine, gli esempi di attrito e coesione risultanti dalle prime esecuzioni della prova eseguita in laboratorio, con due applicazioni di carico per alcune frazioni del carbonato, in particolare per granulometrie 800-1000 μm (aggiunta di acqua al 2% e 2,5%), 1180-1410 μm (aggiunta di acqua al 2%, 2,5% e 3%), 1410-2000 μm (aggiunta di acqua al 2,5%, 3% e 4%): la scelta è ricaduta in tale modalità, in quanto la macchina ha generato errore con l'applicazione di cinque carichi, bloccando così la cella, e generando grossi errori (conferma data anche dai cerchi Mohr generati dal software, all'applicazione dei carichi. Fig. 4.12). Una soluzione quindi è stata sottoporre il materiale a carichi di consolidazione diversi, e inferiori, in particolare pari a 0,28 kPa e 2,45 kpa, come già introdotto, grazie ai quali la prova è sempre andata a buon fine; nonostante ciò, i dati ottenuti sono risultati molto variabili, poco legati tra loro, non riuscendo quindi a dare una corretta valutazione finale. Il passo successivo quindi è consistito nel riprovare una consolidazione a cinque carichi per tutte le granulometrie e tutte le percentuali, ma con maggiore compattazione nel materiale, e quindi densità, e una stesura non totalmente spianata all'interno del porta-campione circolare, ottenendo così grafici più esaustivi rappresentati dalle Fig. 4.8 e 4.9.

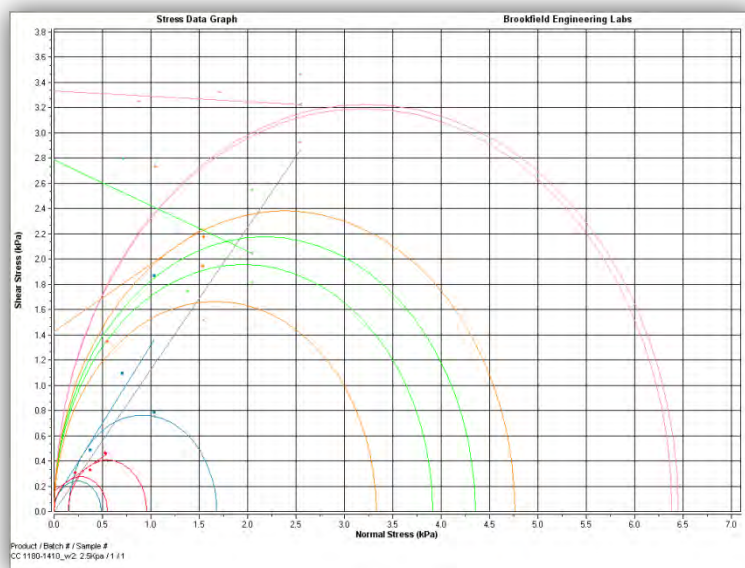


Figura 4.12: *Cerchi di Mohr ottenuti con errori nei dati risultanti e blocco della cella*

I diagrammi con l'applicazione di due carichi per le granulometrie precedentemente descritte (con calcoli sempre basati su interpolazione) sono i seguenti:

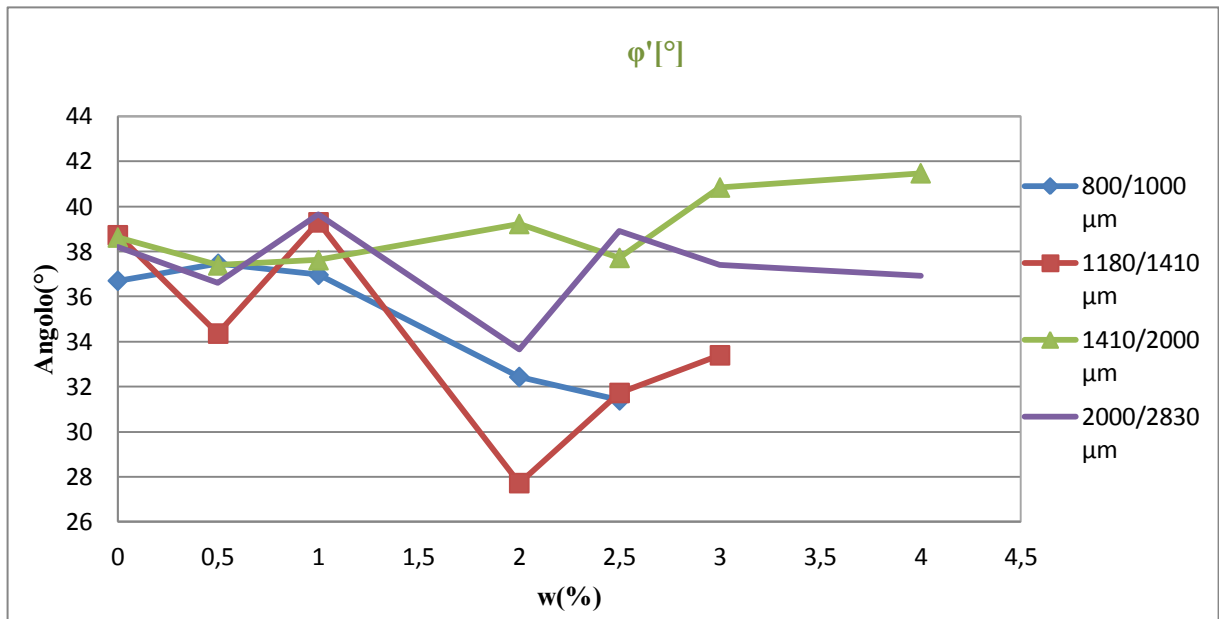


Figura 4.13: Andamento dell'angolo di attrito rispetto alla percentuale di acqua aggiunta (interpolazione), con applicazione di due carichi di consolidazione per le 800-1000 μm, 1180-1410 μm, 1410-2000 μm.

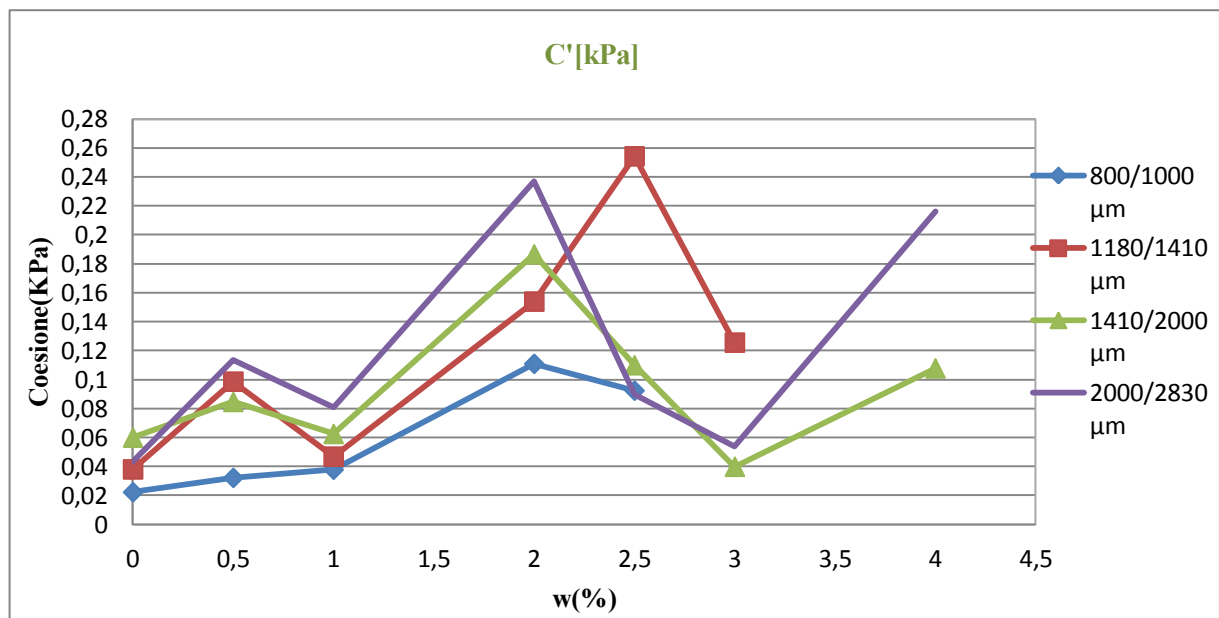


Figura 4.14: Andamento della coesione rispetto alla percentuale di acqua aggiunta (interpolazione), con applicazione di due carichi di consolidazione per le 800-1000 μm, 1180-1410 μm, 1410-2000 μm,

Come si nota da Fig. 4.13 e 4.14, non si è in grado di ipotizzare un ipotetico andamento favorevole dei dati, in entrambi in casi; la causa può essere data dalla preparazione del provino, e quindi le modalità eseguite in laboratorio, e ricordando che alcune granulometrie calcolano un'interpolazione su due carichi diversi dalle altre, secondo quanto già affermato. A tali esempi non sono riportati i dati, ma si è deciso di rappresentare solo a titolo di esempio i grafici.

Sono stati valutate nelle stesse condizioni anche le medie dei tre valori dati dal software, ma anche in quel caso si tratta di errori da cui si riescono a trarre poche osservazioni, che sono risultati maggiormente variabili di quelli appena descritti; per questo motivo, si è deciso di non trascriverli.

4.2.3 Confronto tra i due materiali

Anche per la prova di taglio è stato deciso di mettere a confronto due granulometrie simili dei materiali, per meglio visualizzare il diverso comportamento nello studio dei fattori di cui si sta trattando.

Le granulometrie analizzate sono:

- 750-1000 μm (palline di vetro) con 800-1000 μm (frazione 1 del carbonato di calcio).

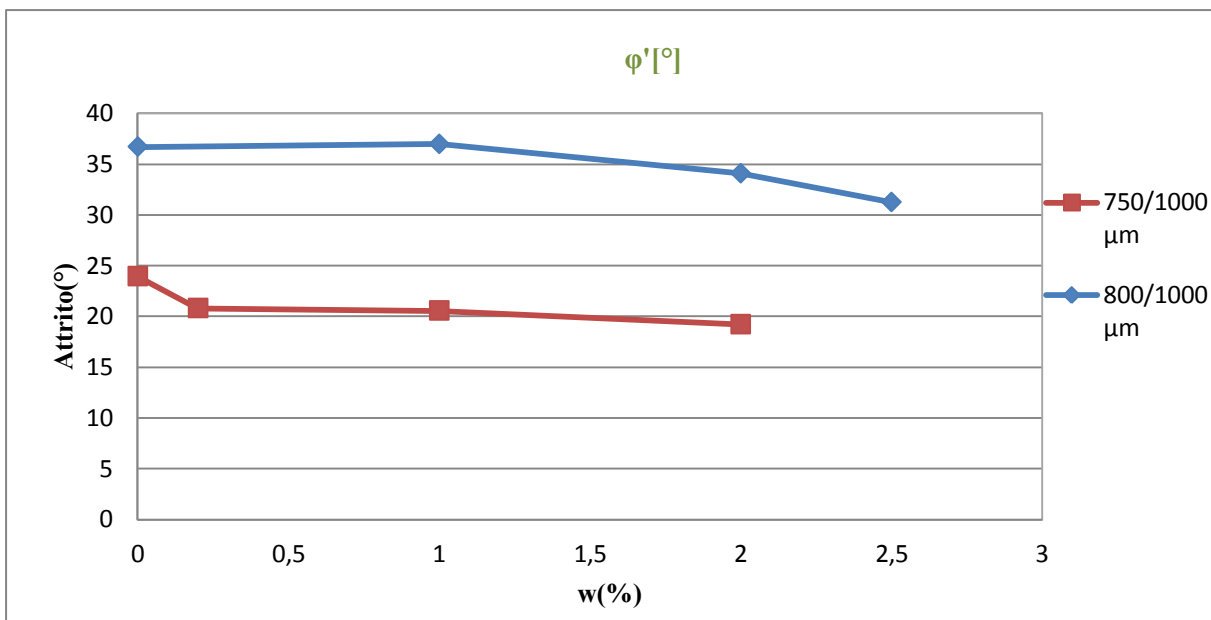


Figura 4.15: Confronto palline 750-1000 μm con carbonato 800-1000 μm nel calcolo dell'attrito

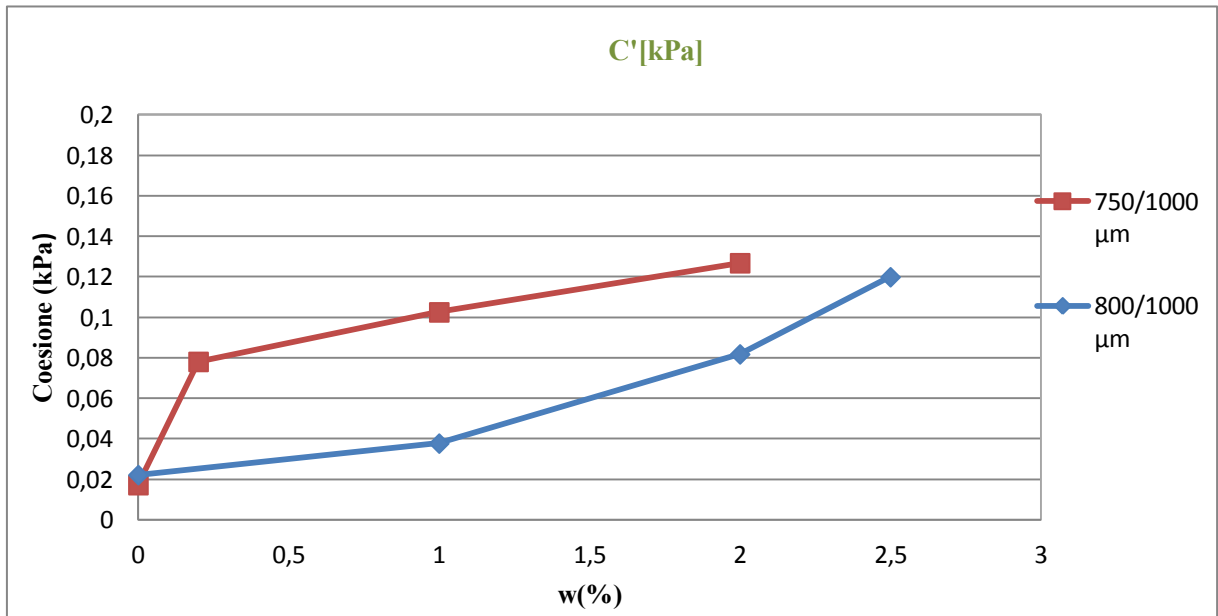


Figura 4.16: Confronto palline 750-1000 μm con carbonato 800-1000 μm nel calcolo della coesione

Dai grafici ottenuti le palline presentano, rispetto al carbonato, un attrito iniziale, in condizioni di secco, minore, probabilmente dovuto al fatto della loro dimensione, che comunque risulta inferiore rispetto agli 800 μm , e questo permette al carbonato di creare un migliore incastro tra le particelle, e quindi un attrito superiore, e maggiore resistenza; inoltre il carbonato, forse, ha un'influenza positiva per il fatto che l'irregolarità della forma stessa genera un migliore incastro tra le particelle rispetto alle palline, che invece hanno una forma esattamente sferica. All'aggiunta di liquido, per entrambi i casi il valore studiato diminuisce, in modo comunque pressoché simile: ad una pari percentuale di liquido comunque il valore più alto è sempre raggiunto dal carbonato.

Fattori quindi che possono influenzare i comportamenti diversi tra i due materiali, per l'attrito sono:

- quantità di liquido: alla sua aggiunta l'attrito decresce;
- forma delle particelle: una forma irregolare permette un mutuo incastro e quindi un migliore attrito;
- rugosità della superficie delle particelle.

Soffermandosi invece nello studio della coesione i grafici si ribaltano: in condizioni di secco i dati partono esattamente dallo stesso punto, in prossimità dello zero, conferma che il materiale si trova in condizioni di secco; all'aumento invece della quantità di liquido, come conferma la teoria della geotecnica, la coesione cresce, ma a parità di percentuale per i due materiali (per

esempio al 2%) chi mostra un valore di coesione più alto sono le palline di vetro (circa 0,13kPa, rispetto a 0,8 kPa del carbonato); nello studio di tale fattore la coesione risulta più alta nel vetro, in quanto, come è già stato studiato per la prova di collasso, le forze capillari che si vanno a creare nelle palline, forse sono di una intensità superiore, in quanto tutto il volume di acqua inserito va a creare essi, e scivola sulla superficie delle particelle, ed inoltre, si ricorda che tale forza cresce alla diminuzione del raggio. Maggiore quindi è la forza capillare, maggiore è la coesione che essa esercita nel materiale considerato.

Si può dire quindi che anche qui i fattori che influenzano i diversi comportamenti dei due materiali, per la coesione in questo caso, sono:

- quantità di liquido: alla sua aggiunta la coesione decresce;
- dimensioni delle particelle: più il raggio è piccolo, maggiore è la forza capillare che a sua volta conferisce maggiore coesione;
- forma delle particelle: una forma irregolare diminuisce il volume di liquido che va a far parte della formazione del ponte, quindi una minor forza capillare e minor coesione, in quanto una piccola percentuale di acqua va a ricoprire la superficie della particella.

Legando tali aspetti allo studio eseguito sul runout di tali materiali, e rivedendo le Fig. 3.34, 3.35, 3.40 e 3.41, si definisce che essendo $750-1000 \mu\text{m} < 800-1000 \mu\text{m}$, di conseguenza comporta la creazione di maggiori forze capillari, causando (a parità di liquido):

- maggior coesione;
- minor attrito;
- L^* di un valore più piccolo;
- Lc^* di un valore più grande, per la diminuzione di (L_0-L_c) ed (L_f-L_0) .

Tutte queste caratteristiche sono legate tra loro, e sono tra loro dipendenti, oltre che dipendere da:

- dimensioni delle particelle;
- forma delle particelle;
- quantità di liquido aggiunta;
- disposizione dei ponti capillari.

Questa ultima caratteristica ha previsto lo studio di tomografie (Cap. 2) con relativa prova di evaporazione (Cap. 2 e 5).

Capitolo 5

Risultati sperimentali prova di evaporazione

In questo ultimo capitolo si espongono i risultati ottenuti dalla seconda prova sperimentale eseguita: essa è stata effettuata per poter capire la quantità di acqua evaporata durante la scannerizzazione del materiale, o anche detta tomografia (Cap. 2), perché essa è stata eseguita in determinati intervalli di temperatura, in particolare 29°- 30° C, causando così una perdita del liquido. L'evaporazione studiata può essere quindi valutata come una precisazione sulle tomografie eseguite.

Tutto ciò ha come obiettivo il continuo studio delle forze capillari, e della loro disposizione tra i grani del materiale preso in considerazione, parti fondamentali nello studio del collasso, cioè l'obiettivo principale di tale tesi.

5.1 Risultati delle prove

L'unico materiale analizzato in questa prova è stato il carbonato, nelle granulometrie 800-1000 μm e 2000-2830 μm , esattamente le stesse frazioni analizzate per le tomografie, con il 4% di acqua aggiunta. La scelta è ricaduta su di esso, in quanto è risultato dalle scansioni, una più difficile valutazione della disposizione dei ponti capillari, che ha reso necessaria una "sottrazione delle immagini risultanti" (Cap. 2). Si sottolinea, che nel caso di tale materiale, come già ripetuto, i ponti capillari non sono totalmente formati dalla totalità del volume di acqua aggiunta nella percentuale scelta, perché una piccola parte va a ricoprire la superficie, un'altra le pareti del porta-campione scelto, ed infine per questa prova, una parte evapora a causa della temperatura.

Si riportano i risultati ottenuti a seconda della granulometria, e a seconda del tipo di chiusura del porta-campione (Cap. 3).

Tabella 5.1: *Frazione 1 carbonato, 800-1000 μm , chiusura con lastrina*

Materiale	Tempo[min]	Peso [gr]	Temperatura[$^{\circ}\text{C}$]	w persa [gr]	w persa [%]
Frazione 1	0'	14,94	28		
Frazione 1	30'	14,94	28,9		
Frazione 1	60'	14,91	30		
Frazione 1	120'	14,91		0,21	35,14
Frazione 1	180'	14,88			
Frazione 1	240'	14,73			
Frazione 1	253'	14,73			

Tabella 5.2: *Frazione 4 carbonato, 2000-2830 μm , chiusura con lastrina*

Materiale	Tempo[min]	Peso [gr]	Temperatura[$^{\circ}\text{C}$]	w persa [gr]	w persa [%]
Frazione 4	0'	14,27	28,2		
Frazione 4	30'	14,27	28,8		
Frazione 4	60'	14,27	28,8		
Frazione 4	120'	14,12		0,22	38,54
Frazione 4	180'	14,08			
Frazione 4	240'	14,08			
Frazione 4	253'	14,05			

Tabella 5.3: *Frazione 1 carbonato, 800-1000 μm , chiusura con plastilina*

Materiale	Tempo[min]	Peso [gr]	Temperatura[$^{\circ}\text{C}$]	w persa [gr]	w persa [%]
Frazione 1	0'	14,43	29,5		
Frazione 1	30'	14,43	28		
Frazione 1	60'	14,40	29		
Frazione 1	120'	14,40		0,06	10,40
Frazione 1	180'	14,38			
Frazione 1	240'	14,38			
Frazione 1	253'	14,37			

Tabella 5.4: *Frazione 4 carbonato, 2000-2830 μm , chiusura con plastilina*

Materiale	Tempo[min]	Peso [gr]	Temperatura[$^{\circ}\text{C}$]	w persa [gr]	w persa [%]
Frazione 4	0'	14,47	29		
Frazione 4	30'	14,47	29		
Frazione 4	60'	14,45	30,5		
Frazione 4	120'	14,45		0,04	6,91
Frazione 4	180'	14,45			
Frazione 4	240'	14,44			
Frazione 4	253'	14,43			

Tabella 5.5: *Frazione 1 carbonato, 800-1000 μm , chiusura con tappino usato per tomografia*

Materiale	Tempo[min]	Peso [gr]	Temperatura[$^{\circ}\text{C}$]	w persa [gr]	w persa [%]
Frazione 1	0'	14,65	28	0,09	15,36
Frazione 1	253'	14,56			

Tabella 5.6: *Frazione 1 carbonato, 2000-2830 μm , chiusura con tappino usato per tomografia*

Materiale	Tempo[min]	Peso [gr]	Temperatura[$^{\circ}\text{C}$]	w persa [gr]	w persa [%]
Frazione 4	0'	14,37	28	0,07	12,18
Frazione 4	253'	14,30			

Dai dati risultanti è possibile fare delle osservazioni: innanzitutto la perdita maggiore di liquido che si ha avuto è stata quella per cui si è basata la prova con l'utilizzo della lastrina di materiale plastico, con perdite intorno al 35% per entrambe le granulometrie; sia per carbonato 800-1000 μm , che per 2000-2830 μm , la quantità di liquido è di circa 0,20 gr (la differenza tra i due è minima, di circa 0,06 gr), le percentuali risultano leggermente diverse in quanto sono state calcolate rispetto ad un peso iniziale (materiale umido) diverso, con una differenza di circa 0,70 gr. Comunque, in generale, la perdita è risultata così alta, in quanto tale chiusura non risulta perfettamente ermetica, e quindi non in condizioni ideali; ulteriore fattore da considerare, riguarda il disturbo che è stato magari recato al provino, continuando a effettuare misurazioni ad intervalli regolari (Cap. 2), e riponendo il provino nella posizione iniziale. Infine, altra considerazione da non tralasciare, è la non costanza della temperatura: purtroppo lo strumento che è stato utilizzato non è uno strumento di precisione, e il porta-campione (con materiale all'interno) non è stato posto in condizioni di isolamento, in modo tale da concentrare in qualche modo l'aria in una specifica direzione. Ricapitolando quindi, l'insieme di tutte queste condizioni può avere ulteriormente influenzato una perdita così elevata di liquido, oltre al tipo di chiusura scelta.

Se infatti ci si sofferma sui dati ottenuti attraverso una chiusura realizzata con l'ausilio di plastilina (che ha permesso una ottima chiusura ermetica), i risultati dimostrano un netto miglioramento, oscillanti tra il 6,9% e il 10% che rappresentano rispettivamente una perdita di 0,04 gr e 0,06 gr: anche in questo caso il carbonato con granulometria più bassa è stato quello che ha dimostrato una quantità persa maggiore, però si ricorda che si fa riferimento a quantità molto piccole, infatti per il primo caso la perdita è stata pari a 0,01 gr, in questa situazione è di 0,02 gr.

L'ultimo caso riporta esiti della prova eseguita chiudendo il porta-campione con lo stesso tappino di plastica utilizzato per le scansioni, e infatti sono i dati nel quale ci si concentra maggiormente, e a tale scopo di tesi, da prendere come riferimento.

In questo ultimo caso, si è invertito un comportamento che è risultato uguale per i due esempi precedenti: non è stato il carbonato con granulometria più bassa a presentare maggior perdita di liquido, ma bensì il 2000-2830 μm , sottolineando che tali differenze sono piccole, infatti è

pari a 0,02 gr, ricordando che anche per questo caso i due materiali sono stati valutati ad un peso iniziale diverso, che va ad influire sul calcolo della percentuale. Tale prova comunque, tra tutte quelle eseguite, è stata la meno disturbata, in quanto le misurazioni sono state fatte all'inizio e alla fine della prova, senza spostare il provino dalla sua postazione; inoltre è stato cercato di isolarlo grazie all'utilizzo di pareti cartonate, in modo da concentrare una certa quantità di calore, ed evitare la dispersione. È stata inoltre ripetuta due volte per granulometria (e non singolarmente come per gli altri esempi) in quanto ci sono stati problemi di taratura della bilancia: il porta-campione inizialmente, senza l'inserimento di materiale in esso, ha mostrato un peso pari circa ad 8,16 gr, ma a prova terminata, tolto il carbonato dal suo interno, è risultato di circa 8,19 gr; tale condizione, si presume, dipende dal liquido che si è depositato sulle pareti nel momento in cui è stato inserito il materiale umido al suo interno, e lasciato in esso per tutta l'esecuzione della prova. E' una ulteriore considerazione da fare, perché tale piccola parte di liquido che si perde nelle pareti, non va a far parte della formazione dei ponti, nonostante si sia trattando di quantità di valori molto bassi. A tal proposito quindi, sono stati portati alcuni accorgimenti durante la misurazione effettuata in laboratorio (azzeramento della bilancia e nuova taratura successiva), in modo tale da eliminare possibili errori di influenza, ottenendo i risultati riportati.

Si possono riassumere schematicamente le prove sostenute affermando che:

- la chiusura con lastrina di materiale plastico è quella che presenta valori di percentuali maggiori, che sono risultati tra il 35% e il 38%;
- la chiusura ermetica con il pongo può essere ritenuta ideale, con un rispettivo valore calcolato di tra il 7% e il 10%;
- il tappino di plastica è da ritenere il valore da prendere in considerazione, date le modalità in cui è stata eseguita la prova, con una perdita di liquido del 12/15%.

Non vengono fatte particolari osservazioni riguardo alla differenza dei risultati, che, si presume, non dipendano dalla granulometria, perché i valori ottenuti presentano poca variabilità, ricordano le condizioni e il carattere sperimentale della prova.

Conclusioni

Questa tesi si pone l'obiettivo di indagare il fenomeno del collasso di una colonna di materiale granulare ponendo particolare attenzione sull'effetto della non idealità del campione, descritta confrontando le palline di vetro e il carbonato di calcio in base alla percentuale in peso di liquido aggiunto.

Il carbonato di calcio è stato caratterizzato da studi effettuati precedentemente, attraverso un'operazione di setacciatura per ottenere frazioni il più possibile omogenee, e complementando dati già calcolati; le palline di vetro sono state studiate per dimensioni simili al carbonato, integrando anche in questo caso calcoli già effettuati, per una maggiore visione del problema.

Date le frazioni di carbonato sono stati effettuati gli esperimenti, sia su di esso, che sulle palline di vetro, in un'apparecchiatura consistente in un parallelepipedo in vetro dotato di parete mobile alla quale è stato collegato un peso, in modo tale da poterla alzare lasciando cadere quest'ultimo e dar quindi inizio all'esperimento, che è stato osservato mediante l'utilizzo di una fotocamera digitale ad alta velocità. È stato quindi necessario elaborare le immagini, attraverso l'utilizzo del software Image J, ottenendo così i dati successivi posti ad analizzare, e calcolati attraverso delle formule empiriche: il software ha permesso di ricostruire i profili per ogni singola prova eseguita, e ha reso disponibili i risultati che a sua volta, attraverso excel, sono stati elaborati, caratterizzando così valori di collasso variabili a seconda della percentuale di acqua inserita nel materiale considerato. Per poter al meglio valutare il problema, come già sottolineato, sono stati uniti valori calcolati da altri studi già effettuati, e portando poi ad un confronto finale del comportamento dei due materiali attraverso opportuni grafici, ricavando le cause che possono aver causato tale diversità.

Dai diagrammi risultanti è possibile affermare che il collasso che un materiale genera, valutando una caratteristica in particolare, che è il runout, dipende da:

- forma della particelle
- dimensioni della particelle
- quantità di liquido inserito
- volume di liquido inserito.

Si sottolinea che tutte queste condizioni hanno permesso di valutare risultati diversi per i due materiali, decidendo così di porli a confronto per dimensioni di particelle simili, valutandone le caratteristiche alla stessa percentuale di acqua.

Caratteristiche ulteriori ricercate per i materiali, per meglio indagare riguardo al comportamento in fase di collasso alla variazione di liquido aggiunto, sono state l'attrito e la coesione, valutate attraverso l'utilizzo di cella shear, o cella di taglio anulare, che ha permesso di ottenere risultati attraverso l'applicazione di cinque carichi prestabiliti, restituendo il risultato con opportuno software.

Per potersi avvicinare al meglio alle condizioni in cui il materiale è stato posto nella prova di collasso, è stato deciso di elaborare i risultati derivanti attraverso un'interpolazione ad un valore di tensione pari a 0,8KPa, rappresentante il valore di tensione σ a metà della colonna di materiale, di dimensioni definite, posizionata nella cella di vetro in fase di preparazione dell'esperimento.

In generale è possibile confermare un abbassamento dell'attrito, con contemporaneo aumento della coesione, verificato per entrambi i materiali: anche in questo caso sono stati posti a confronto per granulometrie simili a pari percentuali di liquido, constatando le stesse dipendenze, come per il runout da forma e dimensioni della particella, e dalla quantità di liquido inserito.

Infine, concentrandosi sulla formazione dei ponti capillari, fondamentali nell'andamento della prova di collasso, e dei rispettivi valori di attrito e coesione, sono state valutate delle tomografie, che attraverso esempi di immagine, hanno permesso di dimostrare la loro disposizione. A fine di poter studiare tutte le variazioni che tale prova di scansione nella sua esecuzione può presentare, è stata eseguita una condizione di evaporazione, solo per il carbonato, nelle stesse granulometrie che sono state precedentemente scannerizzate, e con una umidità del materiale pari al 4%. Sono state apportate delle modifiche rispetto alla scelta della chiusura del porta-campione, ma alla fine i valori che sono stati presi in considerazione riguardano le modalità in cui la prova è stata condotta negli ultimi due casi, calcolando arrivando alla conclusione di aver constatato una perdita di liquido in 4h e 13' (stesso intervallo di tempo dell'esecuzione di una tomografia) pari al 15%.

Concludendo, si consigliano possibili sviluppi futuri riguardo alla prima prova sperimentale eseguita, attraverso lo studio di altre eventuali formule empiriche che prendano in considerazione non solo le lunghezze raggiunte durante la fase di collasso, e ottenute grazie al software Image j, ma anche eventuale peso del materiale, e la quantità di massa che si va a perdere durante l'erosione; si dovrebbe ulteriormente indagare, come per molti casi già presenti in letteratura, sull'effetto del rapporto tra altezza e lunghezza iniziale del campione, ed inoltre si consiglia di valutare il comportamento degli stessi materiali con maggiori

percentuali di liquido inserite (soprattutto per le granulometrie più grandi), con eventuale aggiunta di particolari liquidi tensioattivi.

In relazione al collasso, rimane utile eseguire in contemporanea, la valutazione di caratteristiche con l'ausilio della prova di taglio.

Bibliografia

Gabrieli F., Artoni R., Santomaso A. and Cola S (2013). Discrete particle simulations and experiments on the collapse of wet granular columns. *Physics of fluid* 25, 103303 (2013), AIP Publishing LLC.

Gabrieli F., Artoni R., Tono D., Cola S. and Santomaso A. Effetti della capillarità sulla cinematica di un flusso granulare. *Incontro annuale dei ricercatori di geotecnica, 2012-IARG 2012, Padova, 2-4 Luglio 2012.*

Gabrieli F., Artoni R., Tono D., Cola S. and Santomaso A. Collapse of quasi-two dimensional wet granular columns. *Physical review e* 87, 032205 (2013), American Physical Society.

Mika M. Kohonen, Geromichalos D., Scheel M., Schier C., Herminghaus S. On capillary bridges in wet granular materials. *Physica A: Statical Mechanics and its applications*, volume 339, Issues 1-2, August 20004, Pages 7-15.

Volpato S., Gabrieli F., Corà E., Cola S., Artoni R., Santomaso A.C. On the collapse of wet granular columns in pendular state. *The 8th International Conference for Conveying and Handling of Particulate Solids, Tel-Aviv, Israel, May 2015*

Tono D. (2011/12). Studio del collasso di una colonna granulare parzialmente satura. Tesi di laurea triennale in Ingegneria Civile. Dipartimento di Ingegneria Civile, Edile ed Ambientale, Università degli studi di Padova.

De Fanti M. (2011-2012). Studio sperimentale del collasso di colonne granulari umide. Tesi di laurea magistrale in Ingegneria Chimica e dei Processi Industriali. Dipartimento di Ingegneria Industriale, Università degli studi di Padova.

Sandalo A. (2014/15). Analisi della resistenza al taglio di materiali granulari in regime pendolare. Tesi di laurea triennale in Ingegneria Civile. Dipartimento di Ingegneria Civile, Edile ed Ambientale, Università degli di Padova.

Meruane, C. , A. Tamburrino, O. Roche (2010). On the role of the ambient fluid on gravitational granular flow dynamics. *Journal of Fluid Mechanic*, **648**, 381-404.

Siti Internet: La dinamica dei fluidi. Sapere.it; Materiali granulari, Enciclopedia della Scienza e della Tecnica (2007), Treccani.it; Setacciatura, Wikipedia.it; Tensione Superficiale, Wikipedia.it; geotechlab.wordpress.com.

Ringraziamenti

Ed eccomi al capitolo finale, uno dei più importanti in questa tesi, e il più pensato fra tutti.

Ho sempre pensato a questi ringraziamenti, dal come scriverli, verso chi, e sono arrivata alla conclusione che in questi 7 anni di Università ho avuto persone, vecchie e nuove, che in ogni piccolo mi hanno supportato, appoggiato, incitato, e anche semplicemente sopportato per magari le mie ansie, paure o timori, che mi hanno accompagnato nel percorso della vita, regalato e condiviso momenti che porto con me.

Il mio primo grazie va ai miei compagni di corso, sia chi mi ha appoggiato alla triennale, sia chi mi ha seguito nella specialistica, e chi mi ha regalato momenti divertenti anche nell'ultimo periodo di studio di questa tesi, e siete tantissimi: grazie a Pasa, una tra le prime persone che ho conosciuto, in quelle stancanti ore di matematica 1 e 2, mia compagna nei primi viaggi in treno, e che poi è diventata uno dei pilastri che mi ha sostenuto; grazie a Dodo, per la sua pazienza, per il sostegno dato, per il rapporto creato, per tutti i miei messaggi di stress e ansia che ha dovuto sopportare; grazie a Bob, per la sua presenza, per le serate passate assieme, complice in quel di Jesolo e in Polonia, amabile sostenitrice della birra e degli shortini alla vodka polacchi; grazie a Zoggia e Pedro, coppia di pazzi, capaci di mettermi ansia anche per i loro esami, ma portandomi sempre un sorriso, regalandomi battute anche nei momenti più seri; grazie a Sartori, Ricky Bullo, Chicca, Vero, De Leo, Alberta, Azz, con cui ho formato il primo gruppo in quella affollata p300, tra pause caffè, integrali non capiti, prime maledizioni, e primi esami. Ringrazio tutti voi, il "Trio Paloma", i "Limoni Duri" di Danzika, le pizzate di Natale e di ritorno dalle vacanze estive, tutti questi anni passati assieme, i momenti che mi sono stati regalati, i sorrisi e gli amici che ho trovato. Ringrazio chi di voi, tre anni fa, ha saputo starmi vicino, mi ha sostenuto, mi ha incitato a stringere i denti e non mollare, e mi ha fatto vedere le cose positive, con un semplice messaggio o una parola di conforto in più mi ha dato la forza e la volontà di portare a termine questi studi, e fatto credere che dietro a una sconfitta c'è sempre una rivincita.

Grazie al gruppo di trasportisti e non, che negli ultimi sei mesi, mi hanno fatta ridere tanto: questa tesi è stata vissuta serenamente, oltre che magari con un pochino di preoccupazione, con le vostre pause pranzo, il magico caffè dell'illy, il maledetto esame di inglese sudato fino all'ultimo, il mio laboratorio che mi ha tenuta rinchiusa ore tra palline di vetro e carbonato, e il benedetto treno delle 5.40 del ritorno. Grazie ad Ale, per il cappuccino di tutte le mattine, per i piccoli consigli dati, per i sorrisi e le chiacchierate in treno, per i momenti passati in questi ultimi mesi: so di avere trovato una persona che spero di mantenere nel tempo; grazie a

Melissa, per il suo sostenermi negli ultimi tempi per la tesi, per la partecipazione alla mia preoccupazione o tensione, e anche per i piccoli problemi di cuore. Grazie a Lazza per la benedizione delle note vocali di Whatsapp, per le risate, per le volte che sono stata ascoltata, per avermi sopportato e per avermi detto di essere un'amica; grazie a Bugno, per i suoi consigli, per la persona che ho scoperto lui essere, e per le "possibilità" che nella vita non ci si deve negare mai. Grazie a Gabri per la sua gentilezza, la grande pazienza e l'aiuto sempre datomi; grazie a Pippo, per aver condiviso consigli e preoccupazioni in questa tesi, per la sua dolcezza, e per terminare insieme di nuovo, come tre anni fa, questo percorso; grazie a Pat per le infinite pause studio, pause pranzo e la benedetta pineca. Grazie anche a Manuel, Omar, Bez, Massimo, Giovanni, Gasta e Diego, che ho avuto la possibilità di conoscere, e che sono stati parte anch'essi di quest'ultimo periodo, intenso ma spensierato, di tesi.

Il mio secondo pensiero, va a tutti i miei amici, a quelli che questi recenti anni sono riuscita a coltivare, e a i nuovi che ho trovato; non riuscirò a citarvi tutti, è impossibile credetemi, ho cercato di riassumere in queste poche righe le emozioni che mi avete dato, e quello che insieme abbiamo passato.

Ringrazio Valentina, persona che in mi è stata vicina in momenti di sconforto, con cui non è mancata occasione magari di scontro per due personalità diverse come le nostre, ma che ha cercato di farmi vedere il bicchiere mezzo pieno, composto di cambiamenti, di scelte e di seconde possibilità verso se stessi.

Grazie a Marco e Claudia che ho ritrovato, all'appoggio che ho ricevuto e all'avvicinamento che c'è stato; grazie agli "amici della sfigata cory", ad "Italia-Argentina", ai compleanni festeggiati, ai capodanni passati insieme, e a tutte le volte che mi hanno fatta guidare. Grazie a Nicolas, che mi ha insegnato a vivere di "sregolatezza", a sorridere di fronte alle avversità, alle serate cubane, al libro di Marilyn Monroe, grazie a Monaco, e alla salamandra del Parco Guell di Barcellona.

Grazie all'Argentina, e a i miei amici del gruppo argentina: Pablo, Giorgia, Mati, Zoe, Gisi, Ariel, Leo, Michela, Erika, Lucas, Alessandro, Stefano, Roberto, Anna, Guido: per tutte le feste fatte assieme, con asado, chorizo e Fernet con Coca, per la spensieratezza trasmessa, e per avermi fatta sentire parte di una seconda famiglia; grazie a San Vittore, il mitico Asado De Pablo, la pizzeria La Ruota, e la taverna della Giorgia e Pablo.

Grazie a Nena, per le chiacchierate,, le serate dei weekend, i bicchieri bevuti insieme, agli uomini idioti che non sanno cosa si perdono di noi, grazie al Lido delle Nazioni, il Micro, Villa Bonin e il Victory.

Grazie a Marilena, per esserci da quando l'ho conosciuta, per i venerdì sera, per le confidenze, per la mia ansia e stress nelle traduzioni, grazie al pensierino di ogni Natale, grazie alla Gargotte, la Loggia e il Wine, ai loro aperitivi, e ai bicchieri ricchi di chiacchierate e pensieri.

Grazie a "Lignano Beach", Alice e Vale; a quanto riempio di stress con le mie fisse mentali, alla preparazione di questo traguardo, e all'incoraggiamento; al weekend di tanto sole e poco alcool, ai militari, al Kursaal, il Tango e il Charlino con le sue carte d'Identità, al bar Lele, e alla mia festa di compleanno. Grazie al gruppo "serata" e le mie registrazioni vocali per regalare il buongiorno della mattina.

Grazie a Miriam, che conosco da quasi quindici anni, a quello che ha fatto alla mia laurea triennale, agli schemi per farla studiare a scuola, al mio svenimento all'esame di terza media, alla Franchetti, alle domeniche mattina di tre anni fa.

Grazie a Camilla, una delle persone che riserva sempre un posto nel mio cuore, che se anche vedo raramente, ma quando ci si trova è come se il tempo non fosse passato mai: grazie a Pinè, Gatteo Mare, ai momenti sui banchi di scuola, alla gita di Firenze, alle prime serate a ballare al Vr 2000.

Ringrazio i miei genitori, che mi hanno permesso di intraprendere questi studi, di continuare nella scelta di proseguire nella specialistica, dandomi la possibilità di non mollare e dimostrare di poter arrivare fino alle fine nonostante le difficoltà, nonostante le critiche, nonostante i timori, arrivando ad oggi, potendo dire "ce l'ho fatta".

Un sentito ringraziamento all'Ing. Gabrieli F. e il Prof. Santomaso A., per avermi permesso di poter collaborare all'elaborazione di tale tesi, e avermi dato la soddisfazione di vedere trasformarsi tale lavoro nell'articolo di un convegno; ringrazio per la pazienza e la disponibilità mostrata e la collaborazione datami nello sviluppo di questo elaborato.

Infine, grazie a tutti coloro che anche con una sola parola, una chiacchierata davanti ad una pizza od un bicchiere, o con un semplice messaggio, ha saputo darmi spensieratezza, ha voluto starmi vicino, ha deciso di sfogarsi in momenti di bisogno, o mi ha semplicemente fatta sorridere. Grazie a tutti quelli che hanno partecipato all'organizzazione di questo giorno, togliendo tempo a voi, il vostro lavoro e i vostri impegni, e grazie a tutti i partecipanti di questa festa, sperando di lasciarvi un bel ricordo, e soprattutto tanto divertimento.

Chiudo un lungo percorso che rifarei ancora, non per gli esami, gli studi e i sacrifici, ma per le persone che mi hanno accompagnato e con cui in questi anni ho legato, in modi diversi e in

tempi diversi. Dicono che non sono le persone che fanno i viaggi, ma sono i viaggi che fanno le persone: ho fatto un bellissimo viaggio, che mi ha portato ad una fine all'università, ma non nei rapporti creati, regalandomi tante foto che porto con me, e mi faranno sempre ricordare questo lungo e sereno tempo trascorso in questi meravigliosi anni, augurandomi non solo un buon finale, ma spero anche in un buon inizio, qualunque sia il futuro che mi aspetta.

Grazie di cuore.

Eli

*“Nessun ostacolo potrà fermarti finché la voglia di volare
sarà più forte della paura di cadere”*