

POLITECNICO DI TORINO

Collegio di Ingegneria Chimica e dei Materiali

**Corso di Laurea Magistrale
in Ingegneria Chimica e dei Processi Sostenibili**

Tesi di Laurea Magistrale

Studio del fenomeno di sollevamento di polveri non tradizionali ad opera di un impulso aeraulico



Relatore

prof. Luca Marmo

Correlatore

Dott. Enrico Danzi

Candidato

Alessio Corrente

NOVEMBRE 2018

*“Lo sviluppo progressivo dell’uomo è
vitalmente dipendente dall’invenzione”*

Nikola Tesla

INDICE

1. INTRODUZIONE	1
2. ESPLOSIONE DI POLVERI E RISCHI IN AMBITO INDUSTRIALE.....	3
2.1 POSSIBILI FONTI DI INNESCO	5
2.1.1 SUPERFICI CALDE.....	5
2.1.2 SCARICHE ELETTROSTATICHE	5
2.1.3 ATTRITO O URTO	6
2.1.4 FIAMME LIBERE.....	7
2.1.5 CENERI E POLVERI INCANDESCENTI	7
2.2 PARAMETRI CHE REGOLANO L'INFIAMMABILITA'	7
2.2.1 COMPOSIZIONE CHIMICA.....	7
2.2.2 UMIDITA'	7
2.2.3 DIMENSIONE DELLE PARTICELLE	8
2.2.4 CONCENTRAZIONE E DISPERSIONE	8
3. COS'E' UNA POLVERE NON TRADIZIONALE	9
3.1 PRINCIPALI INCIDENTI LEGATI ALLE POLVERI NON CONVENZIONALI IN AMBITO INDUSTRIALE	11
4. BASI TEORICHE PER LA DISPERSIONE DI UNA POLVERE IN UN GAS	15
4.1 FORZE AGENTI TRA LE PARTICELLE.....	15
4.1.1 FORZE DI VAN DER WAALS	15
4.1.2 FORZE ELETTROSTATICHE	16
4.1.3 FORZE INTERPARTICELLARI DOVUTE ALLA PRESENZA DI LIQUIDI ...	16
4.2 DINAMICA DELLE PARTICELLE SOSPESE IN UN GAS.....	18
4.2.1 FORZE DI TRASCINAMENTO	18
4.2.2 FORZE DI SOLLEVAMENTO.....	19
4.3 RIMOZIONE DI PARTICELLE DI POLVERE DA UNO STRATO PER INTERAZIONE CON UN GETTO D'ARIA.....	20
4.3.1 SOGLIA DI TRASCINAMENTO DELLA SINGOLA PARTICELLA.....	21
4.3.2. TRASCINAMENTO IN MASSA DELLO STRATO	26
4.4 PRINCIPALI TEST DI DISPERSIBILITA'	30
5. PROGETTAZIONE DELLA CAMERA DI DISPERSIONE	37
5.1 PROCEDURA OPERATIVA	41
6. CARATTERIZZAZIONE DEI CAMPIONI.....	43
6.1 DETERMINAZIONE LUNGHEZZA CARATTERISTICA	44
6.1.1 CAMPIONE 164/15	44
6.1.2 CAMPIONE 182/15	46

6.1.3 CAMPIONE 297/17	47
6.1.4 CAMPIONE NYLON	49
6.2 FRAZIONE DI CAMPIONE CON DIMENSIONE INFERIORE AI 500 MICRON.....	49
6.3 ANGOLO DI RIPOSO.....	49
6.4 DENSITA' DI BULK	52
6.5 INDICE DI POLVEROSITA'	55
7. SPERIMENTAZIONE	57
8. CONCLUSIONI	71
9. RINGRAZIAMENTI.....	75
10. BIBLIOGRAFIA	77

1. INTRODUZIONE

Il rischio legato all'esplosioni di polveri in ambito industriale, in particolare nel settore tessile, è da tempo sottovalutato nonostante diversi incidenti accaduti negli ultimi anni in questo settore industriale.

In generale, si ha generazione di polvere in qualunque tipo di lavorazione che preveda organi in movimento/sviluppo di attrito/urto tra materiali fragili ecc., in particolare essa una volta accumulatasi in strati o dispersa in aria potrebbe portare, in caso d'innesco, ad un evento incidentale.

Il settore tessile ha la particolarità di generare polveri con una specifica morfologia a causa delle lavorazioni effettuate e a causa dei materiali utilizzati. Esse sono definite non tradizionali, cioè con la peculiarità di avere una dimensione significativamente maggiore rispetto alle altre, la definizione tradizionali, invece, si riferisce a materiali con una forma il più possibile simile ad una sfera.

La problematica principale derivante da questa loro particolare forma è che tutti i test standardizzati presenti ad oggi a livello internazionale per valutare le proprietà esplosive di materiali pulverulenti sono stati ideati per disperdere efficacemente particelle il più simili possibili a sfere e quindi non risultano efficaci per polveri fibrose. a causa dei problemi di intasamento delle valvole o degli ugelli di dispersione.

Per ovviare a questo problema si è sviluppato un prototipo di camera di dispersione che fosse in grado di testare questo genere di polveri.

In particolare il lavoro svolto in questa tesi si pone l'obiettivo di indagare in maniera approfondita tutte le variabili che concorrono ad una dispersione in nube di una polvere non tradizionale così da poter valutare quali siano le proprietà che la influenzano maggiormente.

Verrà descritto come è stata progettata la camera e tutti i circuiti ad essa collegati, in particolare sarà illustrato come è stata sviluppata la procedura operativa per il test di dispersione nella camera. È stata ideata anche un'apparecchiatura per la deposizione in strato, questo ha permesso di avere una polvere con un grado di compattazione il più simile possibile ad un accumulo generato per gravità.

Tutti i campioni utilizzati provengono da varie lavorazioni del settore tessile e prima dei test di disperdibilità sono stati caratterizzati indagandone al microscopio ottico e al SEM la dimensione caratteristica e attraverso altri test standardizzati la densità di bulk e l'angolo di riposo.

Attraverso i test di dispersione si è cercato di correlare gli indici di polverosità che danno un'idea qualitativa della tendenza di un campione ad essere disperso, all'effettiva dispersione di starti per effetto di un getto d'aria, in modo da ottenere risultati più quantitativi, ovvero al valore della massa di polvere dispersa per unità di superficie e in un determinato intervallo di tempo. Inoltre si è cercato di correlare le principali proprietà chimico-fisiche dei campioni con la loro tendenza ad essere disperse.

I test effettuati prevedono una dispersione in nube dei vari campioni con una variazione progressiva della distanza dal getto d'aria mantenuto ad una pressione costante.

Infine si è cercata una correlazione tra i valori di flussi in massa ricavati dalle sperimentazioni a modelli analitici sviluppati per altri prototipi di camere di dispersione, come ad esempio

esperimenti effettuati in shock tube, dove venivano testate polveri tradizionali. Quest'ultima parte del lavoro è stata realizzata allo scopo di riuscire a ricavare un fattore correttivo o una relazione in grado di predire con buona affidabilità la tendenza di un campione di polvere non tradizionale a formare una nube in funzione della pressione dell'aria che lo investe e della velocità della stessa.

Tutte le sperimentazioni si sono svolte presso il laboratorio "Centro Sperimentale per la Sicurezza Industriale sulle Atmosfere Esplosive", del dipartimento DISAT, del Politecnico di Torino con l'affiancamento di personale qualificato.

2. ESPLOSIONE DI POLVERI E RISCHI IN AMBITO INDUSTRIALE

Un'esplosione è definita come una reazione di ossidoriduzione esotermica in grado di rilasciare in modo quasi istantaneo energia termica e meccanica.

Essa coinvolge combustibili di natura solida, liquida o gassosa [1], la classificazione di questo fenomeno prevede di dividere le esplosioni in due categorie:

- Le deflagrazioni
- Le detonazioni

La discriminazione viene fatta in base alla velocità del fronte di pressione venutosi a creare dopo l'innesco, infatti un'esplosione genera gas a temperature elevate che se confinati in un volume costante provocheranno un'onda d'urto.

Rientrano nel campo delle deflagrazioni tutte le esplosioni con fronte di pressione subsonico, invece le detonazioni hanno un fronte supersonico.

Soffermandosi in particolare sulle esplosioni generate da un solido combustibile, bisogna definire cosa sia una polvere: essa viene descritta come un insieme di particelle solide derivanti da trattamenti industriali, e non, con un ampio spettro di dimensioni. Per avere un'atmosfera potenzialmente infiammabile le dimensioni devono essere, generalmente, inferiori a 500 micron [1]. La forma delle singole particelle può essere molto varia si passa da materiale assimilabili a sfere fino ad arrivare alle fibre.

Analogamente a quanto avviene per la descrizione dei fenomeni di combustione ed esplosione dei liquidi o gas dove è stato sviluppato il triangolo del fuoco per le polveri la figura alla quale fare riferimento è il pentagono dell'esplosione mostrato nell'immagine 2.1.

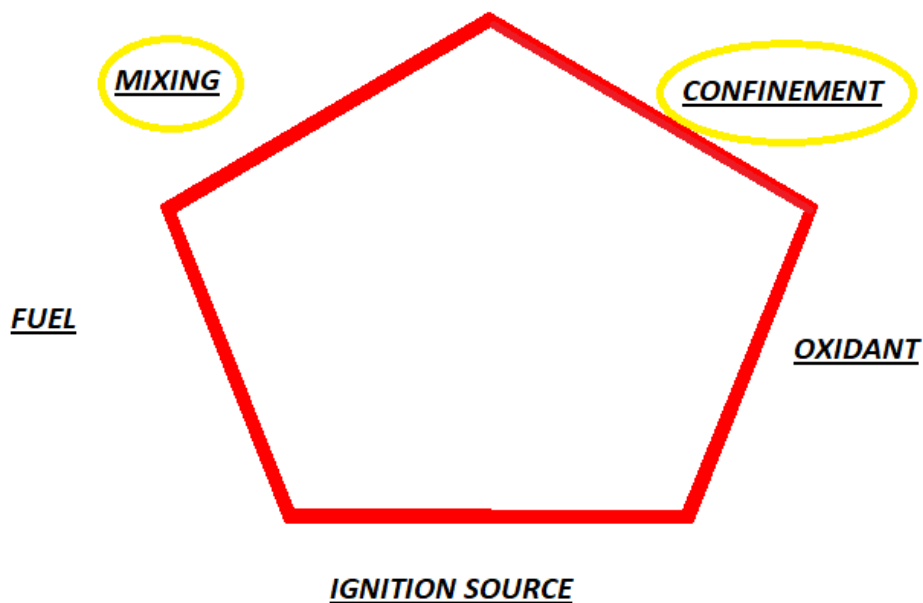


Figura 2.1 pentagono dell'esplosione polveri

Le principali differenze rispetto al triangolo del fuoco, in questa rappresentazione sono la presenza, affinché avvenga l'esplosione, del miscelamento della polvere e di un ambiente confinato.

Questo pone l'attenzione quindi su un fattore estremamente importante in questo tipo di fenomeni: cioè che la polvere dovrà in qualche modo essere dispersa in un ambiente "chiuso" in maniera tale da far ricadere la sua concentrazione in determinati range che permettano l'innesco della nuvola e che si possa creare una sovrappressione.

Quando si parla di polveri la loro massa e la loro aerodinamicità giocano un ruolo fondamentale perché a seconda di queste proprietà esse possono rimanere aereo disperse per un periodo relativamente lungo o depositarsi in tempi brevi sotto forma di strato.

Il duplice comportamento è la ragione per cui con le polveri possono verificarsi esplosioni concatenate, infatti l'esplosione primaria solitamente si verifica all'interno delle apparecchiature di processo dove si possono avere concentrazioni che ricadono all'interno dei range di esplodibilità. Differentemente dai gas o dai liquidi dove a causa della mancanza o della esigua quantità di comburente all'interno delle apparecchiature solitamente l'innesco avviene in atmosfera per via di perdite o sversamenti. L'onda d'urto dell'esplosione primaria potrebbe sollevare depositi di polveri presenti nell'impianto con la possibilità quindi di generare un'esplosione secondaria e così via.

Questo tipo di fenomeni è detto "effetto domino" [1] ed è uno dei responsabili degli eventi incidentali più distruttivi accaduti negli anni in ambito industriale dato il suo potere distruttivo.

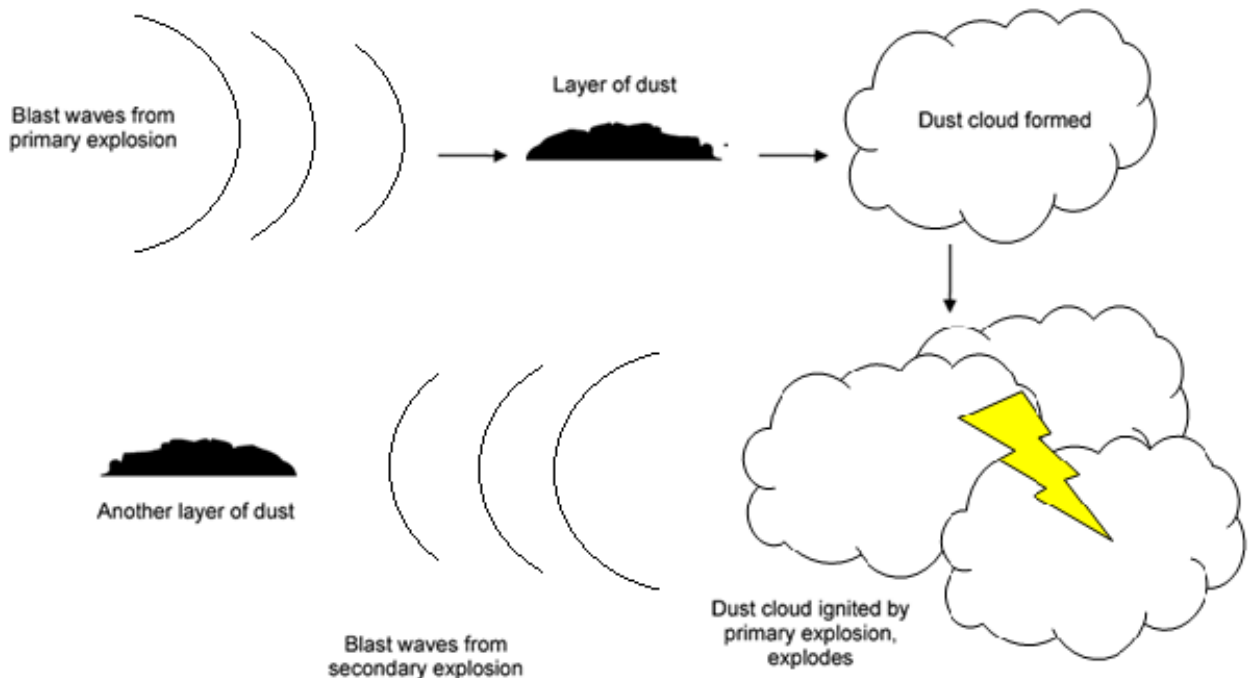


Figura 2.2 effetto domino esplosione polveri

2.1 POSSIBILI FONTI DI INNESCO

Come anche visto in precedenza la sola presenza di una polvere combustibile e di un comburente anche se miscelati e opportunamente confinati non è sufficiente perché avvenga un'esplosione, vi è bisogno di una fonte d'innesco che abbia una energia sufficiente da provocare l'evento incidentale.

Un fattore da tenere in considerazione è che ogni polvere avrà una sensibilità all'innesco diversa a causa, in primis della sua natura chimica e secondariamente a seconda che si trovi dispersa in forma di nuvola o di strato su una superficie.

Le principali fonti d'innesco che possiamo incontrare in ambito industriale sono [1]:

- Superfici calde
- Scariche elettrostatiche
- Attrito o urto
- Fiamme libere
- Ceneri o polveri incandescenti

2.1.1 SUPERFICI CALDE

La presenza in impianto di superfici calde non coibentate potrebbe essere una possibile fonte d'innesco di strati di polvere e di nubi di polveri che una volta entrate in contatto con la fonte di calore potrebbero generare l'esplosione. Bisogna tenere però a mente che le temperature che possono generare questo tipo di conseguenze sono generalmente nell'ordine dei 400-500 °C per le nubi e ancora maggiori per gli strati (ovviamente a seconda del materiale ci sono polveri con LIT di 300 °C o meno).

Esempi in ambito di processo:

- Nube di polvere all'interno di un forno
- Deposito di una polvere su una superficie all'interno di uno spazio riscaldato, ad esempio della polvere sulla superficie interna di un essiccatore
- Deposizione e successiva dispersione su una superficie che genera calore come ad esempio una lampada elettrica o su motori elettrici surriscaldati ecc.

2.1.2 SCARICHE ELETTROSTATICHE

Quando si parla di scariche elettrostatiche, per avere una maggiore precisione è utile specificare che il rilascio può avvenire in due modi:

- Per accumulo di carica elettrostatica
- Archi elettrici generati da rottura di circuiti elettrici

In entrambi i casi va comunque tenuto conto che la minima energia per un innesco elettrostatico varia con il tipo di polvere, la concentrazione nella nuvola, la turbolenza, la taglia effettiva delle particelle e con la distribuzione di energia della scarica [2].

Nella maggior parte dei casi in ambito industriale questi tipi di inneschi avvengono per via di un trasferimento e un successivo accumulo di carica dovuto allo sfregamento di due superfici. Le fasi più soggette a questi tipi di fenomeni sono quelle di trasporto e manipolazione, dove vi

è un trasferimento di carica tra la polvere e le apparecchiature di processo sono state individuate sei tipi di scarica elettrostatica [3][4].

La generazione di carica elettrostatica può avvenire ad esempio nel processo di trasferimento di una polvere organica da un sacco in materiale plastico, infatti durante questo processo i due materiali si caricano con possibile successiva scarica e rapida ricombinazione delle cariche inizialmente separate.

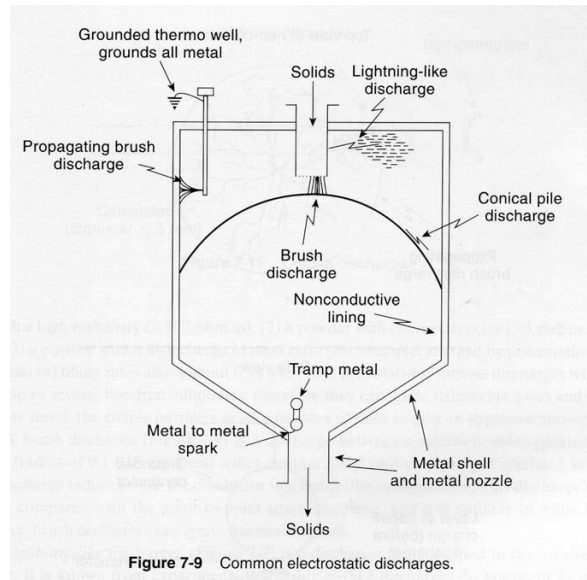


Figura 2.3 esempi di possibili tipi di scarica elettrica [1]

2.1.3 ATTRITO O URTO

Sono fenomeni differenti che però spesso nella letteratura delle esplosioni di polveri sono analizzati insieme a causa della non completa distinguibilità in ambito industriale degli inneschi di una nuvola di polveri.

Volendo definire i due fenomeni, si definisce attrito lo sfregamento prolungato di due superfici e la successiva generazione di calore che può portare allo scoccare di una scintilla, invece per urto si intende un fenomeno di durata relativamente breve che avviene tra due corpi solidi che in quel momento posseggono forti energie meccaniche.

L'esperienza in ambito di processo conferma la possibilità di innesco da parte di questi fenomeni, però vi è ancora uno scarso numero di informazioni sui livelli di energia meccanica necessaria per accendere le diverse nuvole, sull'energia delle scintille così prodotte e sull'effetto del rapido raffreddamento sull'innesco dell'esplosione.

Tipici esempi di urto e attrito possono essere: cinghie che scorrono su pulegge, materiali metallici in impianti di macinazione delle polveri, urto di materiali metallici pesanti su superfici.

2.1.4 FIAMME LIBERE

Sono le sorgenti d'innescò più comuni in ambito processistico, sono prodotte dalla combustione di gas, liquidi o solidi.

In letteratura non sono state condotte molte ricerche sulla loro durata e sulle dimensioni minime richieste per innescare una miscela infiammabile data la loro ovvia potenzialità.

Infatti grazie alle alte temperature, che si aggirano tra i 1000 e i 2000 °C, la durata e il grande volume che esse possono riscaldare, le fiamme libere sono ritenute le più efficaci fonti di inneschi in ambito industriale.

2.1.5 CENERI E POLVERI INCANDESCENTI

Sotto certe circostanze le polveri depositate in cumuli o strati possono sviluppare al loro interno condizioni per le quali si avvia una combustione con conseguente sviluppo di alte temperature. Quindi nel deposito si viene a creare una zona calda che viene poi dispersa per azione meccanica o per un getto d'aria e a contatto con una nuvola di polvere infiammabile può generare l'evento catastrofico [5]

2.2 PARAMETRI CHE REGOLANO L'INFIAMMABILITA'

2.2.1 COMPOSIZIONE CHIMICA

La natura chimica di un campione è fondamentale per capire se essa potrà o meno dare luogo ad eventi incidentali a seguito di un innesco e con quanta energia rilasciata. Essa influenza sia la cinetica che la termodinamica delle reazioni di combustione.

Infatti se si pensa alla termodinamica, in particolare, alla quantità di calore liberato in seguito ad un innesco esso sarà differente per ogni campione. Questo in qualche modo può essere correlato alla massima pressione raggiunta durante l'esplosione, la presenza di azoto invece da esperimenti effettuati sulle proteine sembra mitigare il processo di combustione [1], ma in generale si sa che l'azoto è inerte quindi riduce la concentrazione di ossigeno e quindi la dinamica della combustione.

Per quanto riguarda la cinetica invece, la chimica della polvere influenza la velocità al quale il calore è liberato. Pensando infatti ai composti usati come soppressori di fiamma la presenza degli alogenati fa sì che vi sia un ritardo nella combustione e quindi nella velocità con cui il fenomeno viene a svilupparsi.

2.2.2 UMIDITA'

L'umidità gioca un ruolo fondamentale sia sulla violenza dell'esplosione di una nube di polvere sia sulla sensibilità all'innescò, i fenomeni che prendono parte a questo fenomeno sono abbastanza complessi, ma si osserva sempre una tendenza alla riduzione della sensibilità all'innescò e della violenza dell'esplosione all'aumentare dell'umidità.

A grandi linee i fattori sono il consumo del calore di combustione a favore di quello di vaporizzazione dell'umidità e la formazione di agglomerati a causa dei ponti d'acqua che si vengono a formare tra le particelle.

2.2.3 DIMENSIONE DELLE PARTICELLE

La caratteristica di questo tipo di reazioni è che sono fortemente influenzate dalla dimensione caratteristica del solido e quindi dell'area superficiale esposta, infatti incrementando il grado di suddivisione di quest'ultimo il fenomeno aumenterà in violenza e velocità.

Un esempio che porta a comprendere meglio questo fenomeno può essere la combustione di un ceppo di legna [1], infatti questo una volta acceso brucerà lentamente nel caso in cui la combustione coinvolgerà un elemento di grosse dimensioni. Se invece progressivamente le dimensioni del pezzo vengono ridotte si osserveranno un aumento della velocità di combustione e anche una maggiore facilità nell'innesco dello stesso.

Il caso limite è quello in cui la taglia delle particelle diventerà talmente piccola (all'incirca minore di 1 mm) da poter essere dispersa in una massa d'aria ed avere abbastanza spazio per bruciare senza "restrizioni", in questo caso la velocità di combustione è estremamente alta e l'energia necessaria per l'innesco veramente esigua paragonata al caso del ceppo intero.

2.2.4 CONCENTRAZIONE E DISPERSIONE

La concentrazione intesa come grammi di polvere dispersi in metro cubo d'aria è un'altra proprietà fondamentale nella caratterizzazione di una possibile nube esplosiva. Vi sono quindi concentrazioni alle quali essa può essere innescata che vanno da decine di grammi al metro cubo fino a chilogrammi al metro cubo. Per le polveri però è adeguato parlare di LEL ma non di UEL, in quanto rispetto ai Gas si depositano e non si ha una distribuzione omogenea della concentrazione. Teoricamente non esiste un limite superiore.

Nell'ambito industriale queste sono concentrazioni proibitive se presenti in maniera persistente e quindi scarsamente presenti, ma molto facili da raggiungere se causate da una dispersione di uno strato di polvere accumulato su qualche macchinario di processo o all'interno di esso.

La dispersione può avvenire in due modi:

- Dispersione delle singole particelle in aria
- Dispersione come agglomerati

La differenza tra le due è essenzialmente l'intensità con la quale avviene la dispersione, il primo per verificarsi dovrà subire un'onda di pressione molto elevata generando una dispersione con particelle singole e quindi con una maggiore area esposta. Il secondo invece prevede la presenza di più particelle disperse come un elemento unico che così presenterà nel complesso una minore area esposta.

3. COS'E' UNA POLVERE NON TRADIZIONALE

La definizione “polveri non tradizionali” comprende tutti i tipi di polveri, in genere fibrose o flocculanti, la cui forma prevede che la lunghezza sia notevolmente maggiore rispetto al diametro. Esse sono create per frammentazione o abrasione di materiali fibrosi, come conseguenza non sono più assimilabili a sfere, e quindi la dimensione caratteristica non potrà più essere solo il diametro, ma il rapporto lunghezza su diametro.

Generalmente questo tipo di polveri proviene dal settore tessile (ma anche agricolo-alimentare di recupero), in letteratura sono scarsi i dati relativi al rischio di esplosione di queste polveri e solo recentemente i materiali fibrosi sono stati inclusi come polveri potenzialmente pericolose dagli standard tecnici che regolano la protezione dalle esplosioni nei processi industriali (ISO 80079) [6].

La scarsa conoscenza è dimostrata anche dalla esigua quantità di campioni presenti nel database GESTIS-DUST-EX del Institut fuer Arbeitsschutz der Deutschen Gesetzlichen Unfallversicherung (IFA). [7].

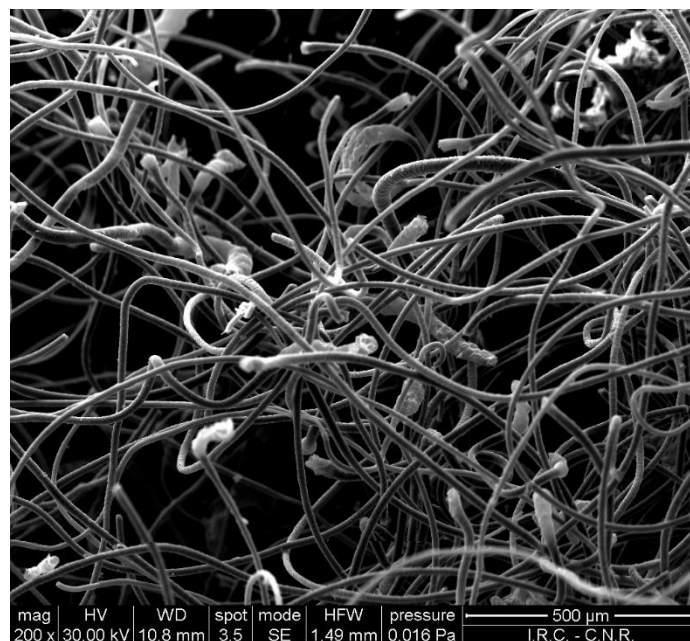


Figura 3.1 campione di lana

Per il regolamento Europeo [8] una polvere non tradizionale è un materiale con una morfologia specifica che prevede che una dimensione è almeno due ordini di grandezza maggiore rispetto alle altre ed ha elevata flessibilità e finezza. Il diametro medio varia di queste polveri varia da 10-1000 μm, un'altra misura utile che comunemente viene utilizzata nell'industria tessile per la caratterizzazione di questo tipo di polveri è il Tex che permette di calcolare la densità lineare ed è definita come la massa in grammi per mille metri.

L'esplosibilità delle polveri non tradizionali è stata investigata in alcuni studi nel corso degli anni, quelli effettuati da Marmo e Cavallero nel 2008 [9] hanno dimostrato che la MIE delle

fibre di nylon è influenzata molto di più dal diametro che non dalla lunghezza, successivi studi di Febo [10] hanno sottolineato la necessità di test sulla caratterizzazione e sull'esplosibilità delle polveri flocculanti che fossero indipendenti dalla forma.

Recentemente Amyotte et al. nel 2012 [11] hanno discusso la pericolosità delle fibre di poliammide e poliestere nelle industrie tessili ponendo l'accento sul marcato comportamento flocculento di queste polveri, successivamente Iarossi et al. [12] hanno fornito alcuni dati di esplosività per questi materiali.

Sempre negli studi di Amyotte [11], viene sottolineato come i valori di temperatura minima di accensione (MIT), energia minima di accensione (MIE) e concentrazione minima esplosiva (MEC) diminuiscano al decrescere delle dimensioni delle fibre, va comunque sottolineato la mancanza di un database rilevante sui valori di esplosibilità di tali polveri nella sfera Siwek da 20 l e sul comportamento ad accensione di questi tipi di polveri in nube.

La mancanza di letteratura è da attribuirsi allo scarso interesse, nel secolo scorso, sul rischio di esplosione di queste polveri dovuto al fatto che gli incidenti avvenuti nel settore tessile sono stati limitati [13] [14] [15] e alla poca conoscenza/sottovalutazione del fenomeno

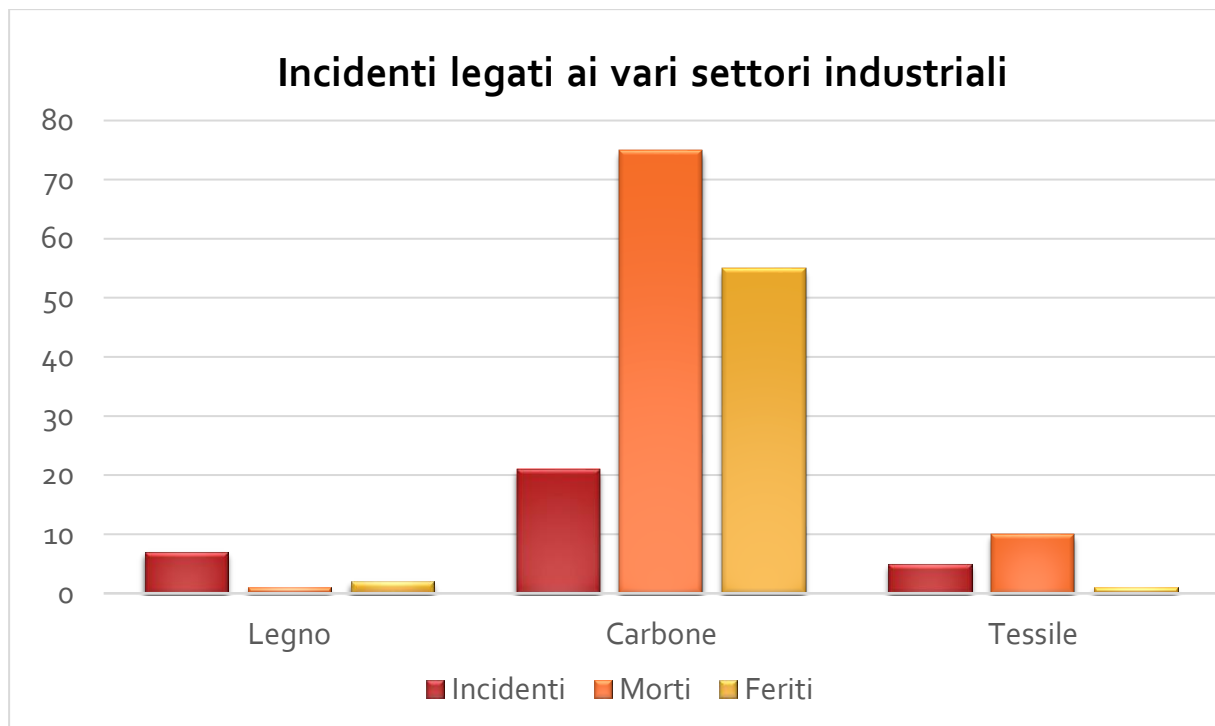


Figura 3.2 confronto incidenti tra vari settori [7]

L'US chemical Safety Board nel 2006 ha pubblicato un documento dove ha sottolineato come solo il 2% degli incidenti accaduti dal 1980 al 2005 sono legati all'industria tessile, la figura 3.2 pubblicata nel documento Marmo et al nel 2018 mostra come solo un numero esiguo di incidenti sono accaduti nelle industrie tessili, ad es. rispetto a un settore più "tradizionale" come l'industria del carbone.

La lana, che è una delle principali materie prime di questo settore, è considerata un ritardante di fiamma in relazione al fatto che ha una bassa tendenza all'innesco e all'alta temperatura di innesco che si aggira intorno ai 570 °C, quindi le esplosioni o anche solo gli incendi legati a questi materiali sono considerati trascurabili in ambito di analisi del rischio.

Tutti questi fattori fanno sì che la consapevolezza del pericolo legato a questi tipi di materiali sia scarsa e porti a sottovalutare la pericolosità di un innesco e della successiva esplosione. Nel prossimo capitolo verranno esaminati i principali casi accaduti da inizio Novecento ad oggi e si porrà l'accento su come un'analisi approfondita dei comportamenti delle polveri non convenzionali sia necessaria.

3.1 PRINCIPALI INCIDENTI LEGATI ALLE POLVERI NON CONVENZIONALI IN AMBITO INDUSTRIALE

Uno dei principali incidenti accaduti nell'ambito tessile si è verificato nel 1987 ad Harbin, Repubblica Popolare Cinese in uno stabilimento per la produzione di biancheria di lino. L'incidente è stato descritto da Echoff [1] e da Piccinini nel 2007 a causa delle non del tutto chiare cause dell'innesco che ad oggi sono attribuite o ad una scarica elettrostatica o ad un focolaio localizzato.

I sismografi nelle ore in corrispondenza dell'evento incidentale hanno rilevato nove esplosioni consecutive probabilmente innescatesi in una delle nove unità del sistema di raccolta polveri, queste ultime erano tutte collegate da condotti, il che ha fatto sì che le esplosioni passassero da un'unità all'altra. L'effetto domino dell'esplosione ha coinvolto anche la zona di cardatura e filatura fino al collettore esterno.

tutto l'evento durò 8 secondi ed ebbe conseguenze disastrose, il bilancio fu di 58 morti e 177 feriti e di danni strutturali ingenti in tutte le sezioni dell'impianto.

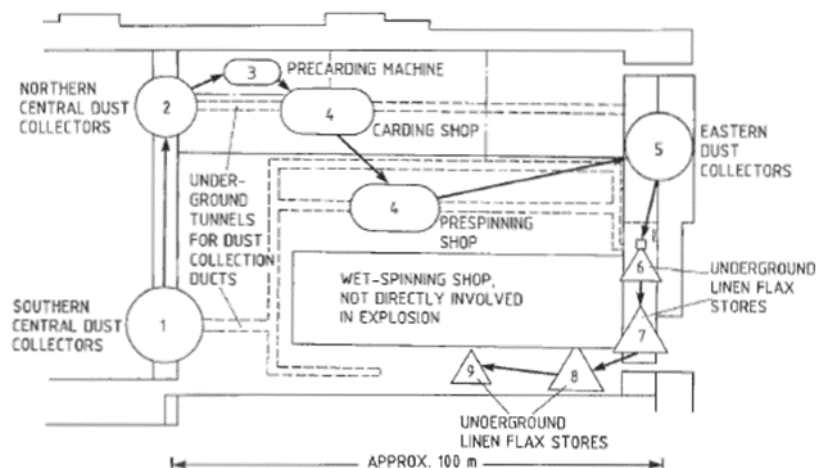


Figura 3.3 effetto domino esplosioni incidente di Harbin [1]

In successione cronologica un altro grande incidente riguardante il settore tessile si verificò il dicembre 1995 in Massachusetts, più precisamente nelle industrie della Malden Mills.

La fabbrica produceva prodotti di abbigliamento a base nylon, il caso è stato studiato da Frank nel 2004 [15], l'esplosione causò l'ustione di 37 persone e perdite economica per 500 milioni di dollari.

Le cause che innescarono la deflagrazione ad oggi non sono completamente chiare, le ipotesi avallate parlano di un problema al sistema di riscaldamento all'interno degli essiccatori, più

precisamente al fluido usato come riscaldante nello scambiatore di calore delle linee di floccaggio o da una scarica elettrostatica prodotta dal sistema di griglie elettrostatiche presenti all'inizio delle linee di produzione. Infatti il processo di floccaggio prevede il passaggio del nylon bagnato con un collante all'interno di un essiccatore che asciuga quest'ultimo con una temperatura media all'interno di questi ultimi intorno ai 230°C.

Le fonti riferiscono che al momento dell'evento incidentale fossero in corso delle operazioni di pulizia e il personale era obbligato ad indossare dispositivi di protezione individuali (maschere per le vie respiratorie).



Figura 3.4 incendio Malden Mills 1955

Marmo et al nel 2010 hanno studiato due casi simili avvenuti in Italia, dove stato concluso che le possibili fonti d'innescò per la deflagrazione primaria erano da ricercarsi in una scarica elettrostatica all'inizio del processo di floccaggio, ipotesi verosimile grazie alla bassa MIE misurata per i campioni di flock di nylon [9]. Altra ipotesi fu il surriscaldamento di uno strato di polvere presente sullo scambiatore di calore che ha innescato una combustione dello strato, una volta investito da un getto d'aria ha sviluppato una combustione a fiamma fungendo da innescò della nuvola di polvere presente all'interno dell'essiccatore.

Dopo l'incidente di Malden Mills l'OSHA (Occupational Safety and Health Administration, the USA, 1998) ha pubblicato un Bollettino di Informazione sul Rischio nel quale era descritto il pericolo legato ad alcuni processi tessili. Il bollettino descriveva "flocking" l'operazione unitaria in cui una fibra, finemente suddivisa, viene applicata a scopi decorativi o funzionali su vari substrati con l'ausilio di un campo elettrostatico. Le unità di floccaggio sono considerate a rischio evento incidentale e devono essere dotate di misure di protezione adeguate.

Il documento oltre a specificare che il processo stesso, a causa delle varie apparecchiature in grado di generare un campo elettrostatico, presenta delle fonti di innescò (scariche elettrostatiche, archi da apparecchiature ad alta tensione ecc.) riporta le principali misure da adottare per limitare al minimo questo rischio potenziale includendo procedure da adottare per le apparecchiature elettriche e per la pulizia.

Uno degli incidenti più rilevanti accaduti in Italia risale al 2001, precisamente il 9 gennaio a Vigliano Biellese nella Pettinatura Italiana.

Il caso è stato studiato da Piccinini nel 2008 [16] e da Salatino et. al. nel 2012 [17] l'incidente ha causato enormi danni strutturali e ingenti perdite economiche oltre a tre morti e otto feriti.

Le cause dell'innescò non sono ancora certe, ma verosimilmente fu una scintilla o un hot spot derivante dal circuito elettrico per il sistema di illuminazione.

Le operazioni unitarie effettuate dall'azienda erano pettinatura lavaggio e cardatura di lane, le polveri generate erano i residui delle operazioni di cardatura (le fibre corte scartate e impurità, di origine vegetale) con una temperatura di autoaccensione intorno ai 270 °C. Inoltre nell'ambiente di lavoro erano presenti sia polveri in nube che in strato, per sopperire a questa condizione il ricircolo dell'aria nei locali era molto elevato. Condizione per cui il fumo generato dalla combustione non è stato notato, l'innescò è scaturito nel seminterrato, da scarti di cardatura stipati in varie sezioni collegate tra loro. La deflagrazione primaria si propagò nel resto dell'impianto scatenando la dispersione e successiva esplosione di strati di polveri nelle varie sezioni dell'impianto fino alla formazione di una fiamma visibile dall'esterno.



Figura 3.5 incidente laneria italiana

Un aspetto che mette in relazione tutti questi tipi di incidenti è la scarsa pulizia (housekeeping) sul luogo di lavoro, infatti la presenza di polvere depositata in strati nelle varie sezioni degli impianti ha fatto sì che in alcuni casi essa fungesse direttamente da innescò, altre volte invece a seguito della deflagrazione e della successiva onda d'urto i depositi presenti fossero dispersi generando così una nube che con una probabilità molto elevata ricadesse nei range di esplosibilità con conseguente effetto domino.

L'NFPA (National Fire Protection Association) 654 [18] a titolo d'esempio specifica che uno strato di polvere alto circa 8 mm a seguito di un'onda di pressione in grado di disperderlo uniformemente creerebbe una nuvola con una concentrazione di circa 350 g/m³ (usando la densità di bulk delle più comuni polveri organiche). Valore che nel contesto di una deflagrazione potrebbe essere considerato un range ottimale per ottenere un livello massimo di delta di pressione e quindi di magnitudo di danno

Altri studi [19] confermano che la scarsa pulizia e ancor più la scarsa consapevolezza del rischio legato alle polveri derivanti dall'industria tessile [20] fanno sì che si vengano a creare in varie zone dell'impianto condizioni favorevoli per eventi incidentali, soprattutto legati a esplosioni secondarie.

Tabella 3.1 principali incidenti nel settore tessile

<i>Episodio (anno)</i>	<i>Feriti/deceduti</i>	<i>Materiale, Processo (sezione)</i>	<i>Probabile fonte di innesco</i>
<i>Cina (1986)</i>	5, 11	<i>Sconosciuto (stabilimento tessile)</i>	<i>Scintille da attrito</i>
<i>Harbin, Cina (1987)</i>	58, 177	<i>Lino (collettore raccolta polveri)</i>	<i>Scarica elettrostatica</i>
<i>California, US (1990)</i>	0,1	<i>Prodotti tessili</i>	-
<i>Okaharu, Giappone (1994)</i>	-	<i>Scarti di cotone</i>	<i>Perdita elettrica</i>
<i>California, US (1994)</i>	0,1	<i>Prodotti tessili</i>	-
<i>Maiden Mills, US (1995)</i>	0,27	<i>Nylon (unità di floccaggio)</i>	<i>Scarica elettrica</i>
<i>Connecticut, US (1997)</i>	0,3	<i>Prodotti tessili plastici</i>	-
<i>Biella, Italia (2001)</i>	0,3	<i>Nylon (essiccatore, unità di floccaggio)</i>	<i>Scintilla elettrostatica</i>
<i>Biella, Italia (2001)</i>	3, 6	<i>Lana (sistema di raccolta scarti)</i>	<i>Scintilla elettrostatica</i>
<i>Mississippi, US (2002)</i>	1,0	<i>Prodotti tessili plastici</i>	-
Totale (d,f)	67, 229		

4. BASI TEORICHE PER LA DISPERSIONE DI UNA POLVERE IN UN GAS

Per comprendere al meglio ciò che avviene quando una polvere stratificata viene dispersa a causa di un getto d'aria provocato da una deflagrazione primaria, bisogna soffermarsi su due tipi di forze presenti in questo fenomeno:

- Forze che preservano l'integrità dello strato;
- Forze aerodinamiche che agiscono sulle particelle;

Le prime possono essere classificate come forze di attrazione tra le particelle e quindi che si "oppongono" alla dispersione, le seconde sono quelle che permettono a quest'ultime di rimanere sospese nel mezzo fluido per un tempo tale e con un volume occupato tale da poter essere innescate e quindi contribuiscono alla rimozione di materiale dallo strato

Risulta chiaro, quindi, che sia in via teorica che in via sperimentale per avere un'idea della massa di materiale che viene rimossa per unità di tempo e di superficie dallo strato bisognerà fare un bilancio tra le forze che cercano di trattenere la particella nel deposito, e le forze che cercano di rimuoverla da esso.

Nel seguente capitolo verrà fatta una rassegna di queste forze e di come entrano in gioco durante una dispersione.

Verranno anche analizzati i principali studi di disperdibilità effettuati, con particolare interesse ai test effettuati in prototipi di camere di dispersione e shock tube con riferimento anche alle principali problematiche che i test attuali hanno per lo studio delle polveri non tradizionali, in particolare quelle tessili.

4.1 FORZE AGENTI TRA LE PARTICELLE

4.1.1 FORZE DI VAN DER WAALS

La stratificazione di una polvere fa sì che si instaurino tra le particelle delle interazioni attrattive tali da conferire allo strato compattezza e poca mobilità delle singole molecole, queste interazioni riguardano sia molecole polari che apolari e prendono il nome di forze di Van Der Waals. Esse sono interazioni con una energia modesta che si aggira in un range che va da 0,1-10 kJ/mol con raggio di azione molto breve che diminuisce all'aumentare della distanza.

Per calcolare le forze di Van Der Waals tra due molecole sferiche, la procedura prevede l'integrazione su tutte le possibili coppie di molecole interagenti nello strato [1] con l'ottenimento della seguente espressione:

$$F_w = \frac{A}{a^2} \frac{x_1 x_2}{x_1 + x_2} \quad (4.1)$$

Dove A è una costante e a è la minima distanza tra le due sfere, x_1 e x_2 sono i rispettivi diametri delle particelle.

Molte volte nei casi studio pratici, come in questo lavoro, i materiali che si incontrano non sono sfere lisce ed omogenee, ma superfici che presentano discontinuità e la loro morfologia non è

più assimilabile ad una sfera. Sono state quindi sviluppate altre formule che prendessero in considerazione, ad esempio, un piano che interagisce con un punto di una particella di diametro x [1].

4.1.2 FORZE ELETTROSTATICHE

Questo tipo di forze di attrazione si vengono a generare all'interno di un deposito di polvere e variano a seconda delle caratteristiche del materiale, in particolare in funzione della sua conducibilità elettrica [1].

Se prendiamo in considerazione particelle conduttive vi è la presenza di forze di attrazione, il processo prevede un trasferimento di elettroni da una superficie all'altra anche se esse una volta messe in contatto non presentano sulla loro superficie un eccesso di carica. Sono influenzate da impurità, formazione di layer di ossidi ecc. Considerando due superfici ad una distanza minore di 100 nm possiamo esprimere la forza elettrostatica con la seguente formula:

$$F_{e,n} = \pi \epsilon_0 \epsilon_l \frac{U^2}{a} \frac{x_1 x_2}{x_1 + x_2} \quad (4.2)$$

Dove ϵ_0 è la permittività nel vuoto e ϵ_l è la costante dielettrica del gas che circonda le molecole e U è il potenziale di contatto tra la superficie delle particelle.

Se invece consideriamo il caso di particelle non conduttive, la forza di attrazione elettrostatica tra le particelle è trascurabile e il vero meccanismo che genera attrazione è l'eccesso di carica che si viene a formare, per via ad esempio di processi di lavorazione, sulla superficie delle particelle.

Ovviamente questo tipo di approccio per stimare le forze elettrostatiche di attrazione è puramente teorico, in condizioni reali strati di polveri o nubi presentano caratteristiche morfologiche molto complesse oltre ad interazioni variabili da punto a punto all'interno del volume considerato.

4.1.3 FORZE INTERPARTICELLARI DOVUTE ALLA PRESENZA DI LIQUIDI

Oltre alle forze di natura elettrica precedentemente citate, vi sono altri fenomeni che possono generare attrazione interparticellare in un deposito, uno di questi è la presenza di liquidi. Infatti è risaputo che una polvere secca o comunque con un contenuto di umidità relativamente modesto è molto più facile da disperdere in aria rispetto ad una umida, questo perché a distanze nell'ordine dei nm vengono ad assorbirsi strati di liquido che rendono le particelle più sferiche e lisce, diminuendo così la distanza effettiva tra due granelli di polvere adiacenti.

Quando il contenuto di umidità aumenta vi è la formazione di "ponti" di liquido tra le particelle che ne aumentano la forza di coesione. Possiamo distinguere quattro fasi per descrivere come la presenza, e il relativo aumento, di un liquido possa generare attrazione tra le particelle [1]:

- a) Il contenuto di umidità raggiunge un livello critico per il quale vi è la formazione dei primi ponti di liquido tra le particelle;
- b) Il quantitativo di umidità diventa così elevato da iniziare a riempire tutti i volumi vuoti presenti;
- c) Tutti i volumi vuoti sono stati riempiti e si entra così nel range capillare, infatti questo fenomeno fornisce la maggior parte della forza di coesione;
- d) Punto di transizione tra una polvere coesiva e una polvere sospesa in un liquido

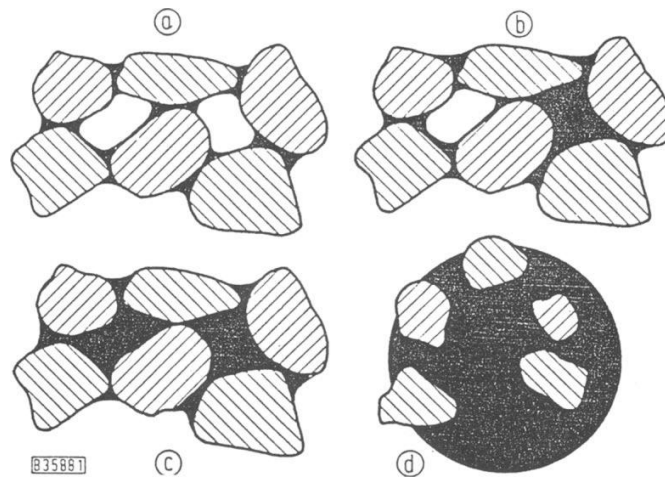


Figura 4.1 distribuzione del liquido in una polvere [1]

Shubert [1] derivò un'equazione per stimare la resistenza agli stress in un deposito di polvere tra due particelle sferiche messe in contatto da un ponte di liquido. Egli partì da una formula che era stata concepita per i letti impaccati arrivando ad un'espressione che nella sua forma finale ha una dipendenza lineare dalla tensione superficiale del liquido e dalla forza di attrazione generata sempre dal liquido, oltre che essere funzione del grado di vuoto e dimensione delle particelle. L'espressione da lui derivata non presenta soluzione analitica, ma grafica (figura 4.2), dove sull'asse delle ordinate viene posta la resistenza a trazione invece sulle ascisse la frazione di vuoto tra le particelle riempita con un liquido.

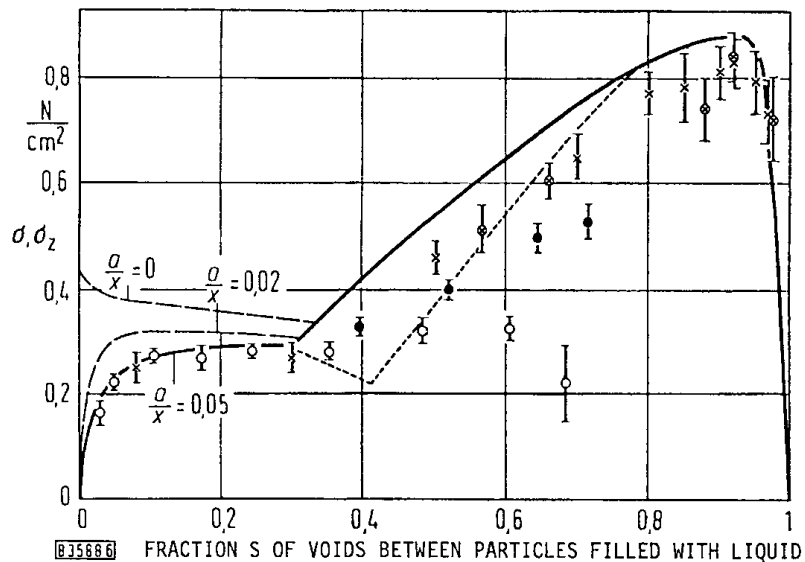


Figura 4.2 Soluzione grafica equazione di Shubert 1973 [1]

4.2 DINAMICA DELLE PARTICELLE SOSPESE IN UN GAS

Le forze aereeodinamiche agenti su uno strato di polvere sotto l'effetto di un'onda di pressione, possono rimuovere particelle da esso e trascinarle all'interno del moto del fluido.

Convenzionalmente questo tipo di forze sono divise rispetto alle componenti del flusso [21]:

- Forze di trascinamento agenti nella direzione del flusso;
- Forze di sollevamento agenti in maniera perpendicolare al flusso;

4.2.1 FORZE DI TRASCINAMENTO

La forza di drag per una particella investita da un getto d'aria può essere espressa come:

$$F_d = 0,5 A C_d \rho U^2 \quad (4.3)$$

Dove A è la sezione della particella, C_d è il coefficiente di *drag*, ρ è la densità dell'aria e U è la velocità dell'aria rispetto alla particella. Essa descrive la forza con la quale una particella viene trascinata dal mezzo fluido dal quale viene investita.

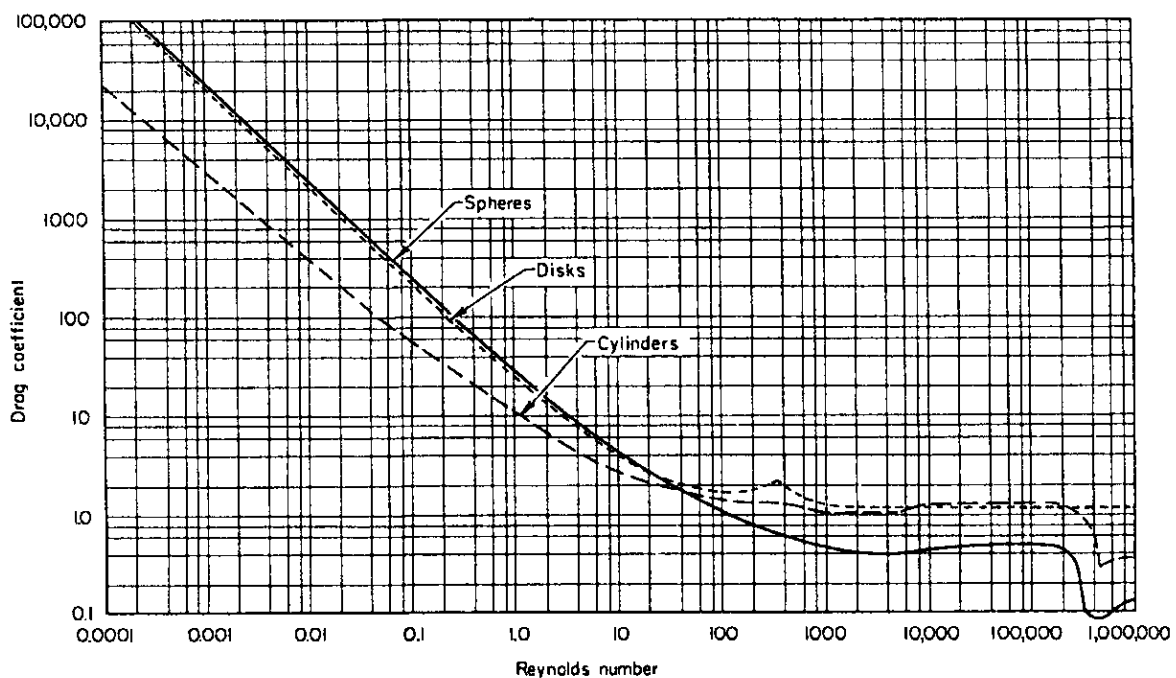


Figura 4.3 coefficiente di drag per varie forme in funzione del numero di Reynolds [1]

Da questa espressione si nota come vi sia una relazione sia con la forma che con i parametri caratteristici del flusso, ma anche con il parametro C_d . Esso viene espresso in vari modi a seconda del tipo di regime che si considera, per il regime laminare (regime di *Stokes*) ad esempio prende il nome di *Stokes drag coefficient*:

$$C_d = \frac{24}{Re} \quad (4.4)$$

Come si può notare esso ha una dipendenza inversamente proporzionale rispetto al numero di Reynolds, sono state derivate diverse formule per il coefficiente di drag in funzione della forma del materiale che veniva studiato (figura 4.3), ad esempio Clift nel 1978 [22] propose un'espressioni per le particelle sferiche e un Reynolds minore di 1000 formula (4.5):

$$C_d = \frac{24}{Re} (1 + 0,15Re^{\frac{2}{3}}) \quad (4.5)$$

Se consideriamo una sfera il più semplice esempio di applicazione di flusso uniforme è la caduta libera, essa può essere ricavata dall'equazione per la forza di *drag* e il peso della particella considerando un regime laminare.

Se consideriamo invece i casi in cui il numero di *Reynolds* è elevato il coefficiente di *drag* diventa indipendente da quest'ultimo e la forza di *drag* diventa proporzionale alla seconda potenza della velocità relativa e alla dimensione delle particelle.

Infine se la forma della particella devia significativamente dalla forma sferica la velocità di caduta libera non potrà più essere calcolata con la legge di *Stokes* per la velocità di sedimentazione se non introducendo il concetto di diametri equivalenti [1]. Alcuni studi sono stati portati avanti negli anni per calcolare la forza di *drag* anche per forme più complesse, Herdan nel 1960 [23] studiò varie morfologie compresi cilindri ed ellissoidi e concluse che un parametro fondamentale per la valutazione della forza era l'orientazione media delle molecole rispetto al flusso.

Per far in modo di poter valutare il trascinamento su particelle di qualsiasi forma è stata introdotta una approssimazione che consiste nel calcolo dell'orientazione media delle particelle e della loro area esposta e tramite un'equivalenza confrontarle con una sfera che presenta la medesima superficie esibita al flusso.

4.2.2 FORZE DI SOLLEVAMENTO

La forza di lift su una particella sferica è indotta se essa è messa in rotazione con asse perpendicolare alla direzione del flusso o è soggetta ad un flusso di taglio, la maggior parte degli studi su questo argomento sono condotti per numeri di *Reynolds* o molto alti o molto bassi.

I primi tentativi di calcolare la forza di lift per un campo di moto uniforme e per bassi numeri di Reynolds sono stati fatti da Rubinow e Keller [24] e arrivarono a questa espressione:

$$L = \frac{1}{8} D^3 \pi \rho \omega U \quad (4.6)$$

Dove ω è la velocità angolare di rotazione. E' interessante notare come questa formula assomigli molto all'equazione della forza di *lift* che viene a generarsi a causa di un campo potenziale. Altri studi portarono alla formulazione di una espressione per calcolare la forza di sollevamento causata da un flusso di taglio che investe una particella sferica appoggiata su una superficie piana, a valori di *Re* bassi [25]:

$$L_w = 0,8 v^{\frac{1}{2}} \gamma^{\frac{1}{2}} D^3 \quad (4.7)$$

Dove γ è il gradiente di velocità, invece il valore della velocità *U* è considerata come il valore registrato al centro della particella e in questa formula è espresso come $\gamma * 0,5D$ a causa dell'ipotesi di superficie piana.

Per invece alti numeri di Reynolds il calcolo delle forze di lift dovute alla rotazione di una particella sferica in un flusso uniforme sono state chiamate forze di Magnus: esse sono state

studiate da Clift nel 1978 e la sua conclusione fu che questo tipo di forze sono generate grazie alla formazione di un'onda di pressione asimmetrica.

Altri studi [26] portarono alla stima di un coefficiente di lift C_L nel caso di una particella soggetta ad un flusso uniforme appoggiata su una superficie piana.

4.3 RIMOZIONE DI PARTICELLE DI POLVERE DA UNO STRATO PER INTERAZIONE CON UN GETTO D'ARIA

Vi sono vari modi con cui una polvere può venire trascinata da un flusso d'aria, e molti studi sono stati fatti negli anni per scoprire quali siano i parametri per i quali una polvere venga rimossa come entità singola o in massa. Una prima informazione può essere ricavata dal grado di coesione che si osserva nella polvere, infatti nel caso in cui esso possa essere ritenuto trascurabile è più facile che le particelle vengano rimosse una ad una, invece per gradi di coesione più alti ci si può aspettare un trascinamento in massa di parte dello strato.

Fairchild, Tillery, and Wheat nel 1985 hanno condotto un esperimento in camera del vento dove veniva studiato il trascinamento di particelle di alluminio, con diametri tali da farle ricadere nel range coesivo, da uno strato. Studi fotografici del loro esperimento dimostrarono che le particelle venivano rimosse secondo due meccanismi:

- Erosione, separazione in particelle elementari durante la dispersione con coinvolgimento di solo una parte del deposito;
- Denudazione, improvvisa dispersione di tutta la massa depositata;

Studi più approfonditi su questi meccanismi sono stati effettuati da Shao nel 2008 [27] studiando l'erosione che il vento provoca sui granelli di sabbia. Come mostrato in figura una particella rimossa dallo strato può rotolare sulla sua superficie fino a trovare un punto in cui le forze fluidodinamiche subiscono un crollo, come un buco, e fermarsi, oppure potrebbe urtare una successiva particella e trasmettere la sua energia così da rimuovere un successivo granello. Invece se una particella viene rimossa dallo strato e sollevata, pur rimanendo vicino alla superficie, si dirà che ha subito uno scorrimento superficiale. Altro tipo di moto che può sperimentare una particella è la saltazione, tipicamente in idrogeologia è il trasporto di materiali grossolani operato da una massa fluida che li sposta per salti successivi: in questo caso il fenomeno è simile, ma prevede il sollevamento verticale della particella e il successivo trasporto orizzontale ad opera del vento.

Possiamo quindi discriminare due casi [28]:

- Studio della soglia di trascinamento della singola particella;
- Studio del trascinamento in massa dello strato;

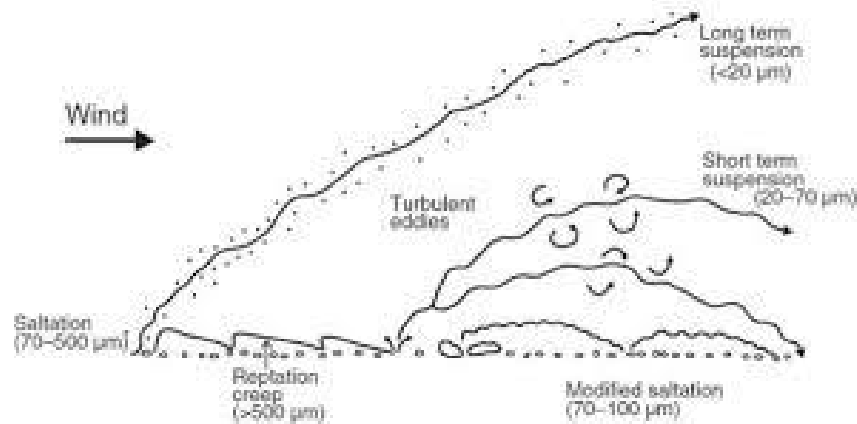


Figura 4.4 differenti tipi di moto per le particelle di sabbia (tratto da Shao 2008)

La maggior parte degli studi presenta la seguente configurazione: un flusso d'aria che investe, a regime stazionario, un deposito di polvere posto parallelamente alla sua direzione su una superficie piana e liscia. Una volta raggiunta una determinata velocità le particelle presenti nello strato vengono rimosse e trascinate dal campo di moto dell'aria. Attraverso la misurazione di diversi parametri che riguardano sia il deposito, sia la nuvola data dalla dispersione e sia il flusso d'aria si potrà caratterizzare il tipo di trascinamento e la successiva dispersione.

4.3.1 SOGLIA DI TRASCINAMENTO DELLA SINGOLA PARTICELLA

La difficoltà nella previsione delle forze aerodinamiche che possono agire su una particella e l'altrettanto difficile stima delle forze complessive che possono essere presenti in uno strato hanno portato allo sviluppo di numerose correlazioni empiriche per la stima della soglia di trascinamento.

Esse sono state sviluppate o in atmosfere aperte o in camere del vento con flussi d'aria aventi caratteristiche comparabili. Purtroppo essendo correlazioni sperimentali i risultati non possono essere generalizzati per tutti i tipi di polveri.

Bagnold [29] effettuò i primi studi per capire quale fosse la soglia di trascinamento dei granelli di sabbia con dimensione caratteristica in media di 100 micron (dimensione per la quale le forze di adesione sono trascurabili rispetto alla forza peso) egli usò una camera del vento di sezione 30x30 cm. Bagnold determinò che la soglia per cui i grani venivano mossi era:

$$\tau_w > 0.01 \rho_p g D \quad (4.8)$$

Dove τ_w indica lo stress di taglio alla parete e gli altri termini sono la densità e il diametro delle particelle e l'accelerazione gravitazionale. Nei suoi studi Bagnold, avendo usato polveri con diametri dell'ordine di 10^2 micrometri, riferisce una maggior facilità al trascinamento di campioni con dimensioni più piccole rispetto a quelle maggiori. Questo perché in quell'ordine di grandezza le forze coesive erano per lo più inesistenti.

Corn & Stein [30] nel 1965 hanno studiato la rimozione di un monolayer di particelle in una camera del vento di sezione di 1x25 mm.

Questa geometria gli permise di mettere in relazione le forze di drag esercitate dal gas sulle particelle e le forze di adesione tra la polvere e il piano della camera. Con questo tipo di sistema il profilo di velocità del gas e la velocità dell'aria sopra la particella erano ben definite,

riuscirono così a calcolare le forze di trascinamento in maniera piuttosto accurata. Da questo studio conclusero che le particelle più piccole erano più difficili da trascinare rispetto a quelle più grandi quando i diametri si aggirano nell'arco delle decine di micrometri invertendo quindi il trend ipotizzato da Bagnold.

Singer, Greninger e Grumer [31] hanno creato una camera del vento con sezione più larga (51x71 mm) fecero degli esperimenti che confermarono la maggior difficoltà di rimozione delle particelle con diametro che ricade nel *cohesive range*.

Bagnold nel 1960 [32] ipotizza che vi sono due meccanismi consecutivi per il trascinamento di una polvere: il primo prevede che l'aria fluidizzi un monolayer di polvere sulla superficie dello strato con conseguente rotture dei legami interparticellari. Il successivo che le particelle vengano sollevate orizzontalmente grazie agli *eddies* creati dal moto turbolento. Egli ricavò i valori di velocità che causano la prima fluidizzazione di un letto di sabbia silicea monodispersa.

Questi studi confermarono la maggior difficoltà per la rimozione di particelle che hanno un diametro nel cohesive range (<40 micron) figura 4.5.

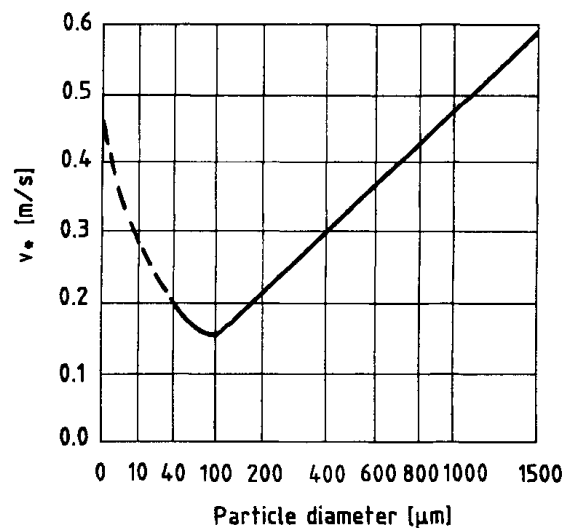


Figura 4.5 velocità critica di trascinamento in funzione delle dimensioni del materiale [1]

Un altro aspetto rilevante di questa ricerca consiste nel fatto che in corrispondenza del range coesivo depositi di particelle possono essere trascinati facilmente se la rugosità superficiale dello strato è elevata rispetto alla dimensione delle particelle, specialmente se la superficie presenta spigoli. Questo tipo di fenomeno prevede che le particelle più fini rimangano coese e si spostino come agglomerati.

Ricerche concomitanti di Gutterman & Ranz [33] si concentrarono sullo studio dello spessore del *laminar boundary layer*. Infatti un flusso gassoso turbolento che passa sopra un letto di polvere presenta sempre uno strato limite entro il quale le condizioni di moto sono laminari e funzione di viscosità e densità del gas. Se le dimensioni delle particelle sono al di sotto dello spessore del *boundary layer* esse non possono essere catturate dagli *eddies* generati dal moto turbolento e quindi non verranno rimosse dallo strato (formula 4.9).

$$\delta \frac{(\tau_0 \rho)^{0.5}}{\nu} \cong 11,4 \quad (4.9)$$

Dove ν è la viscosità cinematica del gas, ρ è la sua densità e τ_0 sono gli shear stress all'interfaccia tra il flusso e la superficie della polvere.

Gutterman e Ranz ricavarono che lo spessore dello strato limite era di 250 micrometri e cercarono anche di stimare le forze aerodinamiche che agiscono sulle particelle. Per il loro studio considerarono particelle sferiche e fecero svariate ipotesi semplificative tra le quali: viene considerata trascurabile ogni forza interparticellare ad eccezione di quella di gravità, le forze di drag che agiscono su una particella sospesa sono le stesse che se essa fluttuasse in un volume di gas infinito, un profilo di velocità laminare calcolato al centro della particella. Il risultato fu un set di equazioni in grado di predire il valore critico degli *shear stress* per la soglia di trascinamento (formule 4.10 e 4.11):

$$C_D Re^2 = 0,65 \times 10^{12} x^3 \rho_p \Phi \quad (4.10)$$

$$\tau_0 = 5,9 \times 10^{-10} \frac{Re}{x^2} \quad (4.11)$$

Esperimenti successivi confermarono la bontà delle relazioni per calcolare la velocità di soglia.

Tutte queste ricerche confermano che le particelle sotto i 40 micrometri hanno uno shear stress critico che aumenta con il diminuire della dimensione, in prima battuta questo fenomeno è stato attribuito alle sole forze di adesione. Ragionando sulla base delle relazioni espote, le forze di adesione sono linearmente proporzionali alla dimensione caratteristica della particella, invece le forze gravitazionali sono in relazione alla taglia delle particelle con una proporzionalità alla terza potenza, il che nel range micrometrico confermerebbe la prevalenza delle forze di adesione su quelle gravitazionali. Le forze aerodinamiche invece sono proporzionali alla seconda potenza del diametro della particella. L'apparente contraddizione del trend che si verifica passando da una particella grande ad una piccola è spiegabile dalla teoria del bilancio delle forze.

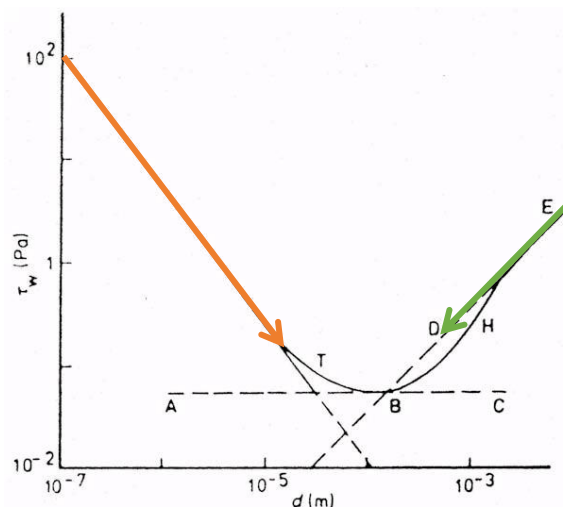


Figura 4.6 predizione della teoria del bilancio di forze (Phillips 1980)

Il grafico 4.6 mostra gli stress di taglio alla parete in funzione del diametro delle particelle, Phillips usò per il suo esperimento della sabbia, egli descrisse sulla base della teoria del bilancio di forze come per dimensioni elevate la retta DE (verde in figura) rappresenti l'uguaglianza tra forze di drag aerodinamiche e forza peso. Invece per diametri molto piccoli l'uguaglianza sia sollevamento aerodinamico = forze di adesione (linea gialla in figura).

Greely & Iverson effettuarono delle ricerche sulla base di questa teoria per mettere in relazione la velocità di soglia con il modo in cui una particella viene trascinata osservando l'erosione della sabbia ad opera del vento.

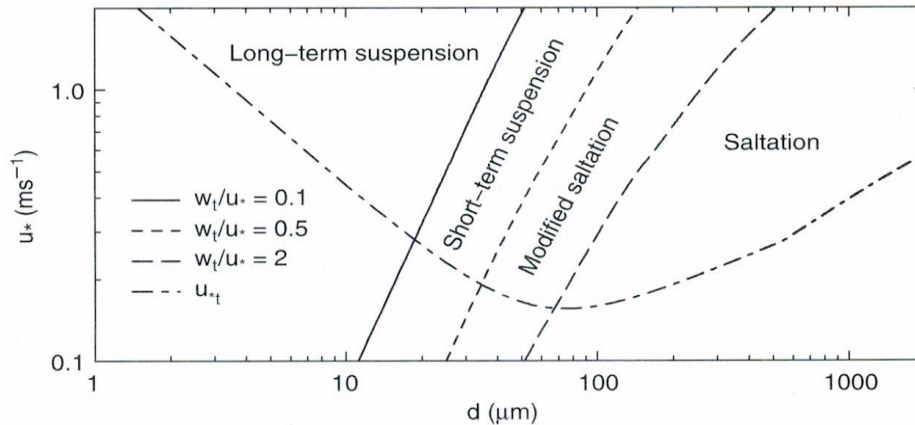


Figura 4.7 velocità di soglia in funzione dei modi di sospensione [28]

Per la polvere coesiva il valore degli stress di taglio al quale si verifica il movimento della prima particella è significativamente influenzato dal modo in cui si è venuto a formare il deposito.

Zimon [34] condusse un esperimento nel quale usava sfere di vetro posizionate su una superficie metallica che veniva investita da una corrente d'aria di 6,2 m/s. Egli calcolò gli sforzi di taglio a varie distanze e osservò che essi decrescevano con l'aumentare della distanza, misurò quindi le distanze alle quali tutto il materiale veniva rimosso e quelle dove non vi era rimozione, riuscendo così a stimare le forze aerodinamiche necessarie per la rimozione delle particelle.

Ural nel 1989 [35] scrisse che la dispersibilità delle polveri può essere caratterizzata da due parametri:

- Lo sforzo aerodinamico minimo richiesto per il trascinamento della polvere da una superficie orizzontale
- La distribuzione delle velocità di sedimentazione di una nuvola di polvere.

Sulla base di queste ipotesi sviluppò un apparato per testare la dispersibilità di una polvere che verrà descritto nel paragrafo seguente.

Kalman [36] propose una correlazione generale basata su numeri adimensionati per mettere in relazione la velocità di pick-up (definita come la velocità di soglia descritta precedentemente) con il diametro delle particelle. Essa è divisa in tre parti:

Zona I	Zona II	Zone III
$Re_p * = 5 Ar^{\frac{3}{7}}$ (4.12)	$Re_p * = 16.7$ (4.13)	$Re_p * = 21.8 Ar^{\frac{1}{3}}$ (4.14)

Tabella 4.1 formule ricavate da Kalman per le varie zone

Dove Re_p^* è il Reynold particellare e Ar è il numero di Archimede e Ar^* è il numero di Archimede modificato che tiene conto della non sfericità di alcuni campioni utilizzati:

Tabella 4.2 definizione dei numeri adimensionati

$Re_p^* = \frac{\rho U_p d}{\mu (1,4 - 0,8 e^{-\frac{D}{D_{50}}})^{1,5}}$ <p>(4.15)</p>	$Ar = \frac{g \rho d^3 (\rho_p - \rho)}{\mu^2}$ <p>(4.16)</p>	$Ar^* = Ar (0,03 e^{3,5 \phi})$ <p>(4.17)</p>
---	---	---

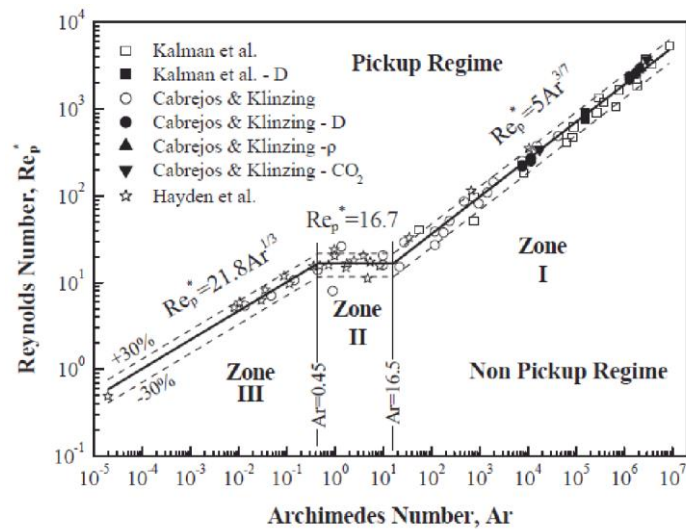


Figura 4.8 numero di Reynolds in funzione di quello di archimede [28]

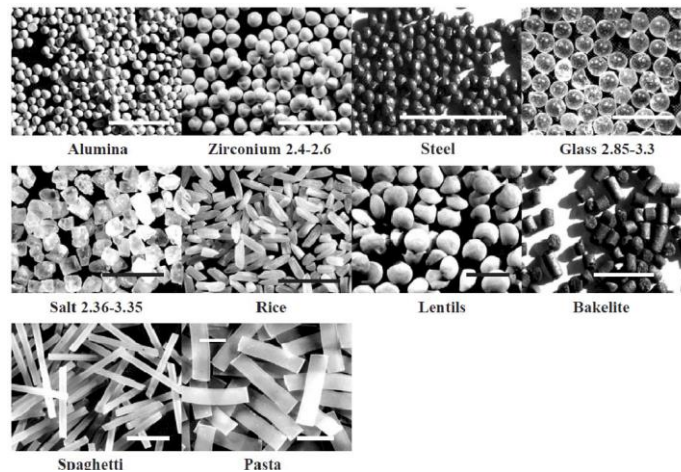


Figura 4.9 Materiali con diversa morfologia testati nel lavoro di [28]

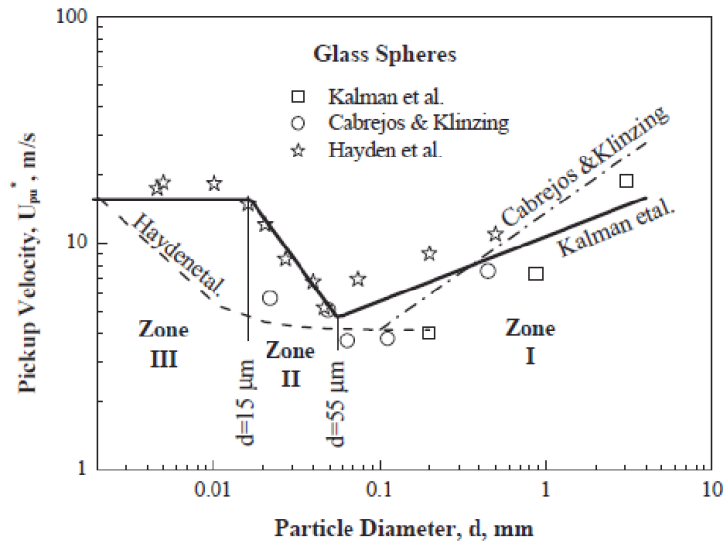


Figura 4.10 velocità di pickup in funzione del diametro della particella [28]

4.3.2. TRASCINAMENTO IN MASSA DELLO STRATO

Il trascinamento consiste fondamentalmente nella misura del flusso in massa di polvere trascinata per azione dell'aria, è un parametro più difficile da misurare rispetto alla soglia di trascinamento.

Vari studi sono stati condotti in questo senso sia per lo sviluppo di modelli matematici che potessero prevedere il fenomeno sia per lo sviluppo di esperimenti che potessero dimostrare un carattere generale.

Hartenbaum (1971) [37] condusse una serie di esperimenti di trascinamento su uno strato di polvere composto da sabbia silicea con diametro medio di 250 micrometri in una camera del vento con un regime stazionario dell'aria. La portata dell'aria fu fatta variare da 34 a 115 m/s e il flusso in massa fu messo in relazione con la velocità dell'aria attraverso la seguente relazione:

$$\Phi \left[\frac{lb}{ft^2s} \right] = 0,366 \times 10^{-2} \left(U \left[\frac{ft}{s} \right] \right)^5 \quad (4.18)$$

Batt et al [38] svilupparono una correlazione per calcolare il trascinamento in massa con valori di velocità dell'aria molto elevati:

$$\Phi = (0,3 \pm 0,1) \frac{\rho_e U_f M_e^{0,5}}{\alpha / \alpha_{WMSR}} \quad (4.19)$$

Dove a numeratore abbiamo la densità dell'aria, la *friction velocity*, e il numero di Mach, a denominatore il rapporto degli angoli di riposo di due differenti materiali. Questa correlazione era in grado di prevedere in maniera affidabile il flusso in massa trascinato e quest'ultimo risultava proporzionale alla potenza 1,5 della velocità dell'aria. Studi di Bagnold proponevano un esponente pari alla terza potenza rispetto alla velocità dell'aria, Batt concluse che quella correlazione era appropriata per l'erosione causata dal vento su particelle di sabbia quindi con velocità del vento più basse, tipicamente attorno ai 20 m/s.

Il maggior limite di questa formula è l'uso della *friction velocity*, quindi a costo di perdita di precisione l'espressione è stata riformulata da Batt per introdurre la velocità dell'aria. Questa formula stima in maniera affidabile il flusso in massa dovuto a velocità dell'aria molto basse e tende a zero quando quest'ultima tende alla velocità di soglia.

$$\Phi = (0,002)\rho_e U_e [U_e^{0,5} - \frac{U_t^2}{U_e^{1,5}}] \quad (4.20)$$

Dove U_e rappresenta la velocità dell'aria e U_t la velocità di soglia o pickup, il coefficiente 0,002 è stato selezionato per includere i dati di Batt et al.

Studi più recenti di Zydak and Klemens (2007) [39] hanno sviluppato una correlazione per esperimenti condotti all'interno di uno shock tube con una sezione di 112x72 mm con altezza dello strato di polvere da trascinare che variava da 0,1 a 0,8 mm.

$$\Phi = 0,004 h^{0,216} U^{1,743} D^{-0,054} \rho_p^{-0,159} A_p^{0,957} \quad (4.21)$$

Dove h è l'altezza dello strato in mm, U è la velocità dell'aria sopra lo strato, D è la dimensione caratteristica della particella in micrometri e le restanti due variabili sono la densità della particella e una costante empirica adimensionata. La maggiore peculiarità di questa formula è che a meno di fattori che risultano costanti nello stesso tipo di materiale, questa correlazione pone il flusso in massa proporzionale alla U elevata alla 1,75.

Una successiva sperimentazione di Ural [28] per lo studio sia della velocità di soglia e sia del trascinamento in massa di polvere da uno strato portarono a trovare che la velocità di soglia è proporzionale alla densità della particella con una potenza di fattore 1/3:

$$U_t = 0,46 \rho_p^{1/3} \quad (4.22)$$

L'autore consiglia che se le particelle tendono a rimuoversi come agglomerati la sostituzione della densità di particella con la densità di bulk migliorerebbe la stima della formula. In caso di particelle non sferiche alla formula va aggiunto un fattore correttivo per tener conto della minore sfericità.

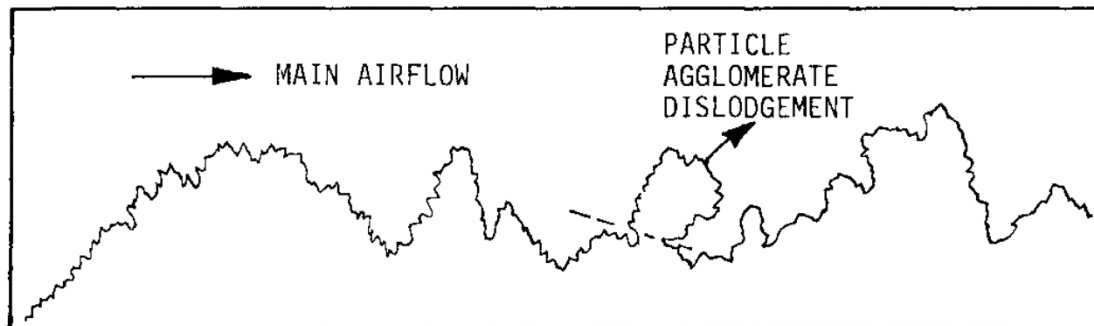


Figura 4.11 esempio di come le particelle coesive possano essere rimosse come agglomerati [1]

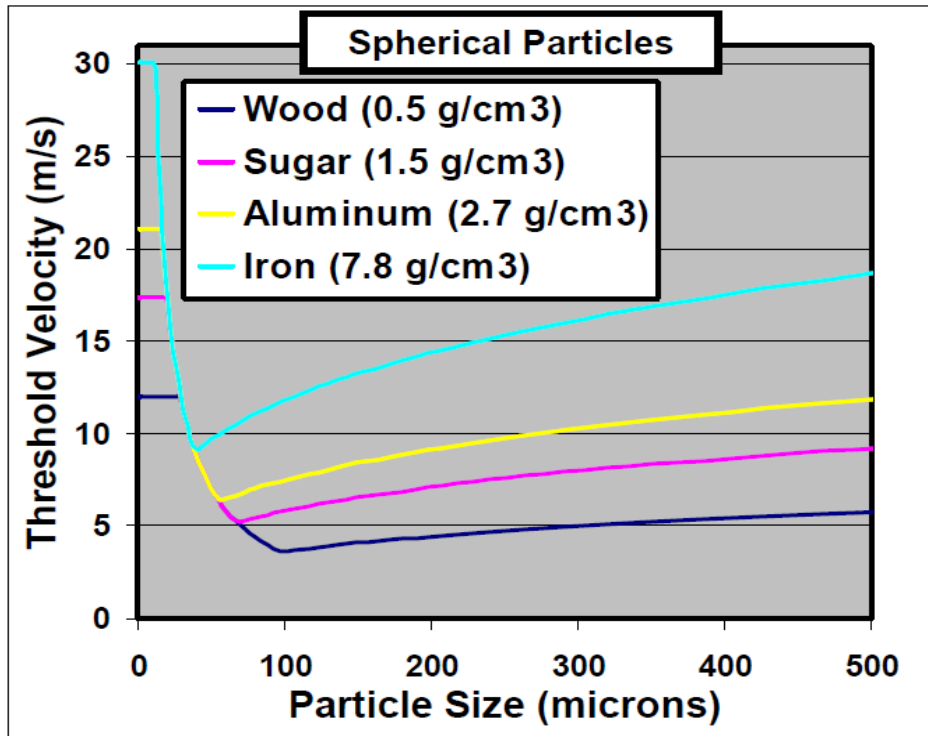


Figura 4.12 velocità di soglia rispetto alla taglia delle particelle [28]

Tenendo conto della possibilità di calcolare la velocità di soglia dalla formula (4.22) o di poterla stimare dal grafico 4.12 Ural formulò la seguente correlazione per la stima del flusso in massa:

$$\Phi = (0,002)\rho U(U^{0,5} - \frac{U_t^2}{U^{1,5}}) \quad (4.22)$$

Questa formula ha la particolarità di essere proporzionale alla potenza 1,5 della velocità e di tendere a zero quando la velocità si avvicina alla velocità di soglia.

Altri studi recenti che sono stati fatti per capire come una polvere venisse trascinata e dispersa in aria sotto l'effetto di un'onda di pressione.

Catalin e al [40] nella loro sperimentazione hanno usato un modello matematico per lo studio dell'effetto della polidispersità di uno strato di polvere investito da un getto d'aria. Conclusero che le particelle con taglia inferiore sono quelle più coinvolte nei fenomeni di sollevamento il che è anche confermato dall'evoluzione della loro posizione verticale in funzione del tempo (figura 4.12). Allo stesso modo i dati ricavati suggerirono che il quantitativo di materiale sollevato aumentava significativamente in funzione della polidispersità dello strato, il che è stato attribuito alla maggiore frequenza di collisione che avviene in caso di particelle non monodisperse (grafico 4.13).

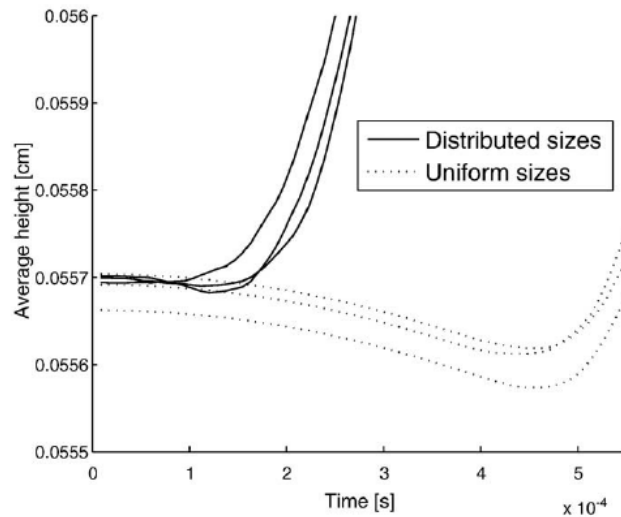


Figura 4.12 Altezza media della paricella in funzione del tempo [40].

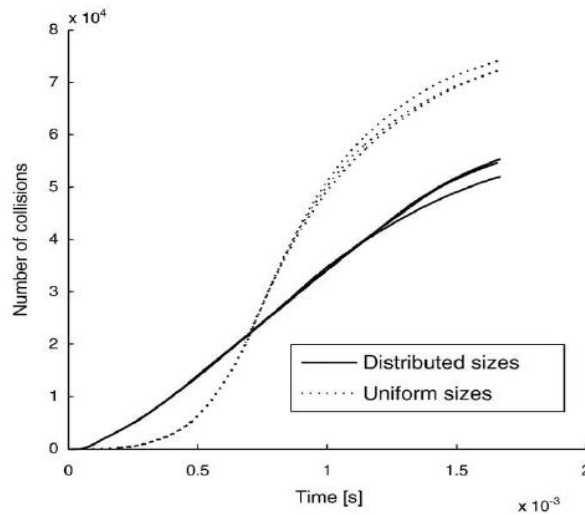


Figura 4.13 numero cumulative degli urti delle particelle in funzione del tempo [40]

Chowdhury et al [41] hanno condotto studi sempre all'interno di shock tube per testare l'effetto della taglia delle particelle e della polidispersità di queste ultime all'interno di uno strato dopo il passaggio di un'onda di pressione.

La sperimentazione si è concentrata su di polveri di alluminio sferiche, testate con numeri di Mach che variavano in un range da 1,23÷1,52, sono stati individuati due regimi di "crescita", che hanno portato allo sviluppo di due relazioni lineari, una tra l'aumento dell'altezza dello strato e il numero di Mach e l'altra tra il tasso di sollevamento della polvere, la polidispersità e il numero di Mach.

Conclusero che in particelle di taglia piccola il fattore che governa il maggiore o minore tasso di sollevamento è la polidispersità del campione, fecero anche dei paragoni con le polveri di carbonato di calcio per verificare come la densità influisca sui fenomeni di lift, la conclusione fu che la morfologia della polvere influisce in maniera significativa sui fenomeni di sollevamento.

Lay et al [42] nel 2018 hanno presentato uno studio, tramite modellazione matematica, dell'effetto della dimensione delle particelle sui fenomeni di sollevamento di uno strato di polvere investito da un getto d'aria.

Il modello matematico utilizzato è Euleriano basato sulla teoria dell'energia cinetica e tiene conto delle singole caratteristiche di ogni particella, sono state modellate due tipi di particelle con dimensioni in un range tra 10 e 80 micron e disposte in due strati come mostrato in figura 4.14.

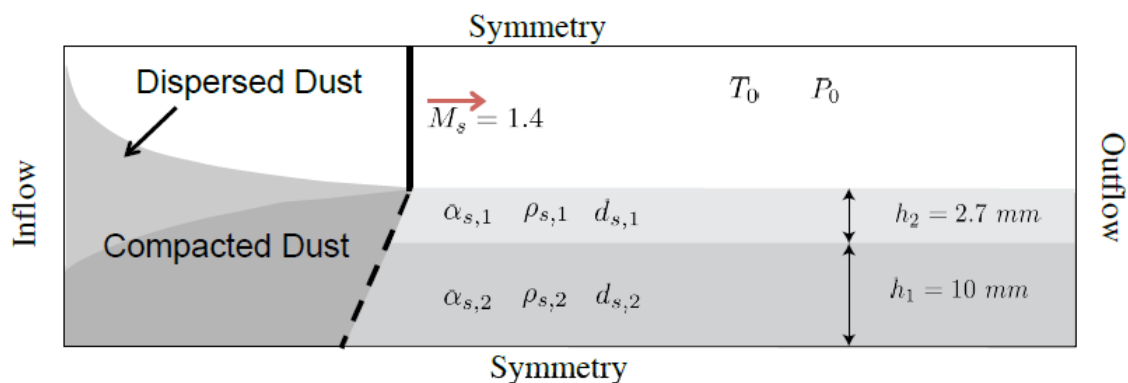


Figura 4.14 condizioni iniziali della simulazione [41]

Sono stati simulati due casi: nel primo le polveri con dimensioni maggiori venivano disposte nella parte sovrastante della stratificazione, nel secondo invece le polveri con dimensioni maggiori vengono disposte nella parte inferiore. Sotto l'effetto dell'onda di pressione lo strato subisce una compressione e un successivo mixing che permette la conseguente dispersione. In entrambi i casi le particelle con dimensioni maggiori subiscono un sollevamento ad altezze più elevate indipendentemente dalla configurazione iniziale, inoltre osservarono che queste ultime venivano accelerate in maniera significativamente maggiore rispetto a quelle più piccole.

Shimura et al [43] attraverso un modello numerico simularono il passaggio di un'onda d'urto su uno strato di polvere inerte, dopo l'esplosione di una polvere di carbone.

I risultati confermarono ciò che era stato osservato sperimentalmente in relazione all'altezza alla quale le particelle vengono sollevate, attribuendo alle forze di contatto tra le particelle l'effetto dominante per l'avviamento del processo di dispersione.

4.4 PRINCIPALI TEST DI DISPERDIBILITA'

Come già detto il termine disperdibilità identifica la tendenza di una polvere a formare nuvole fini aeree disperse, è una proprietà fondamentale da studiare in relazione alla sensibilità all'innescò e all'esplosività di un materiale. Ciò nonostante non sono stati ancora sviluppati test standardizzati in grado di permettere uno studio approfondito del fenomeno nel caso delle polveri non tradizionali.

Andreassen [44] condusse uno dei primi esperimenti di misura della disperdibilità: esso consisteva nel far fluire un campione di polvere all'interno di una fessura all'interno di un tubo posto verticalmente di 250 cm di altezza e 14,5 cm di diametro.

Le particelle una volta attraversato il tubo fluivano in aria ed erano raccolte su un fondo piano, l'esperimento consisteva nel pesare la quantità di particelle che nell'arco di sei secondi raggiungevano la base. Secondo l'autore le singole particelle non sarebbero state in grado di depositarsi in quel lasso di tempo, quindi calcolandone la differenza si sarebbe determinata la frazione dispersa.

Questo tipo di procedura presenta diversi limiti, tra cui il fatto che nella frazione non depositata possono essere presenti numerosi agglomerati che non possono essere considerati come elementi singoli.

Carr nel 1965 [45] ideò una procedura semi-quantitativa per descrivere la dispersibilità delle polveri, l'apparato consiste in un cilindro di plastica supportato verticalmente da un anello posto al di sopra di un disco di vetro. La prova consisteva nel far cadere 10g di campione all'interno del cilindro e pesare quanta polvere rimane sul disco e attraverso la differenza con il campione iniziale calcolare il quantitativo di polvere dispersa durante la prova.

L'ASTM (American Society for Testing and materials International) nell'arco degli anni ha sviluppato due test standardizzati per la misura della disperdibilità, ASTM D547-41 e l'ASTM D4331-81, per rientrare negli standard i test devono avere una riproducibilità maggiore del 20%.

Il primo test consiste essenzialmente in un armadio di cinque piedi di altezza e con una sezione interna di 18 pollici, in cui sono state installate tre guide orizzontali nelle quali vengono inserite delle lamine scorrevoli, quindi in grado di creare dei compartimenti all'interno dell'armadio, posizionate a varie altezze e un cassetto sul fondo.

Le tre guide sono state posizionate a 12 e 24 pollici dalla sommità dell'armadio, il test consiste nel caricare 50 libbre di campione sulla lamina posta in posizione superiore rispetto alle altre e all'inizio tenere le altre due in maniera tale che non ostruiscano la caduta del campione. Il test inizia sfilando velocemente la lamina dove è alloggiato il campione. Dopo cinque secondi si inseriscono le altre due lamine che permarranno per un tempo di 2 e 10 minuti, l'indice di disperdibilità verrà calcolato sulla base del quantitativo di campione depositato sulle varie lastre.

Il secondo invece, l'ASTM D4331-81, prevede l'uso di un tubo di plastica con diametro di tre pollici e lungo 18 pollici. Il test consta nel convogliare un flusso d'aria continuo dal fondo del tubo, tenuto in posizione verticale, con velocità pari a 6 cm/s. La sommità del cilindro, prevede un'apertura ostruita al 27% attraverso la quale fluirà il campione e una pompa di aspirazione che lavora con una velocità di aspirazione mantenuta costante, con un filtro a valle per recuperare il campione. Durante la misura il cilindro è posto in vibrazione a 29000 rpm, per un campione di 200 g gli standard prevedono un tempo di esposizione di 20 minuti. La disperdibilità verrà calcolata misurando la massa di campione raccolta dal filtro durante il tempo di test.

Ural nel 1989 [35] ideò un test per misurare la velocità di soglia di uno strato di polvere su una superficie orizzontale. L'apparato consisteva in una superficie circolare di diametro di 380 mm sopra alla quale ve ne era posta una seconda di diametro 300 mm con un foro centrale di 25 mm, con angoli smussati e montata ad una distanza che può variare dai 3 ai 13 mm.

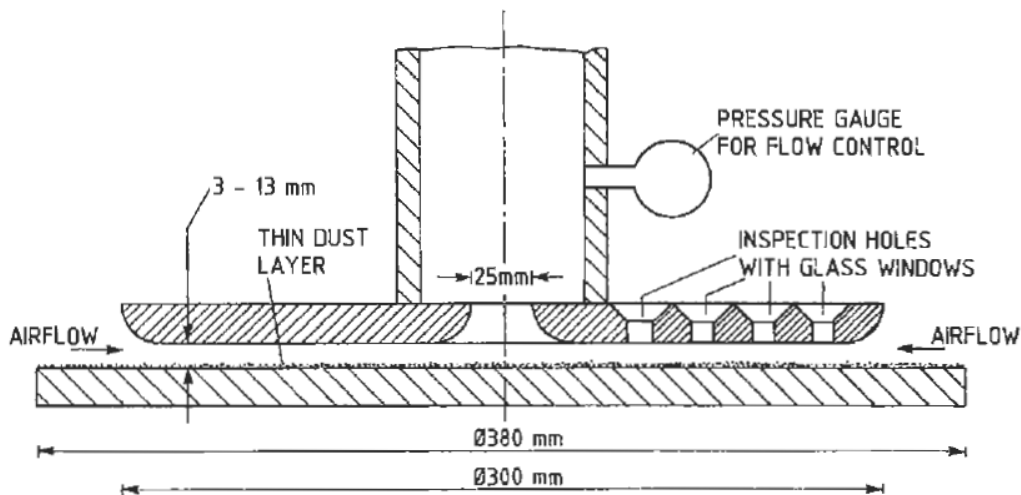


Figura 4.15 apparato di lift di Ural (1989) [1]

L'esperimento consiste nel fluire l'aria tra le due piastre creando una depressione nel tubo verticale collegato al foro centrale della seconda piastra, l'aria subirà un'accelerazione a causa della diminuzione di sezione e porterà con sé parte delle particelle presenti nello strato, grazie ad una risoluzione grafica creata dall'autore in base ai risultati sperimentali si possono fare considerazioni sulle velocità di soglia e sulle forze aerodinamiche.

Klippel nel 2008 [46] ha messo a punto una procedura standardizzata per assegnare un indice di polverosità di bulk a vari campioni con un valore che va da 1 a 6.

Il test consiste in un silo dove viene stoccato il campione, esso è messo in agitazione grazie ad un sistema di pale al suo interno, sul fondo di questo dispositivo vi è un sistema per il trasporto del solido nella camera di misura, esso convoglia una portata volumetrica costante.

Nella camera di misura è presente un dispositivo per registrare la concentrazione della nuvola di campione in funzione del tempo.

Tabella 4.3 indici di polverosità di Klippen [46]

VDI Dustiness Group	Dustiness Index (g/m^3)
1	LT 1
2	1 to 5
3	5 to 10
4	10 to 20
5	20 to 50
6	GT 50

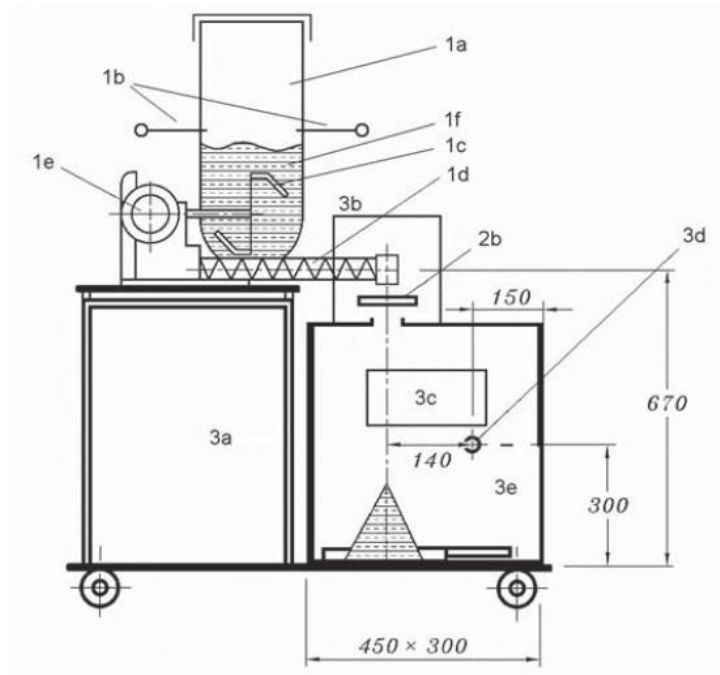


Figura 4.16 struttura del dispositivo di Klippel [46]

Sempre Klippel [46] nel 2013 per verificare se i suoi indici di polverosità fossero affidabili creò un apparecchio di dispersione che consiste in un tubo in vetro di 300 mm di diametro e con un volume di 75 L. Il cilindro è dotato sia di sensori per la misurazione della pressione (misuratori piezo elettrici) che di sensori per la misura della concentrazione ad infrarosso posti a 37 e 70 cm sopra una piastra filtrante posta sul fondo del tubo. Su questa piastra viene stratificato il campione che verrà investito da un getto d'aria di 23 m³/h per due secondi, dopo altri due secondi la polvere viene innescata con un innesco di 10 J.

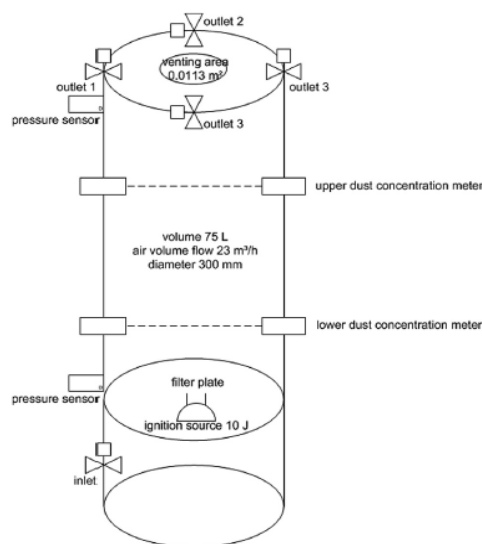


Figura 4.17 apparecchio di dispersione verticale [46]

Perera et al [47] al fine di caratterizzare la disperdibilità della polvere di roccia che viene applicata nelle miniere di carbone per inertizzare l'ambiente hanno sviluppato nel 2015 una

camera di dispersione di sezione quadrata con lati di 15,24 cm e lunga 152,4 cm. La camera è dotata di un sistema per generare un getto d'aria di 2,8 bar comandato da una elettrovalvola che investe un portacampione dove è depositato il materiale. All'interno della camera è presente un sistema ottico che permette di misurare la concentrazione e il tempo di ricaduta del materiale.

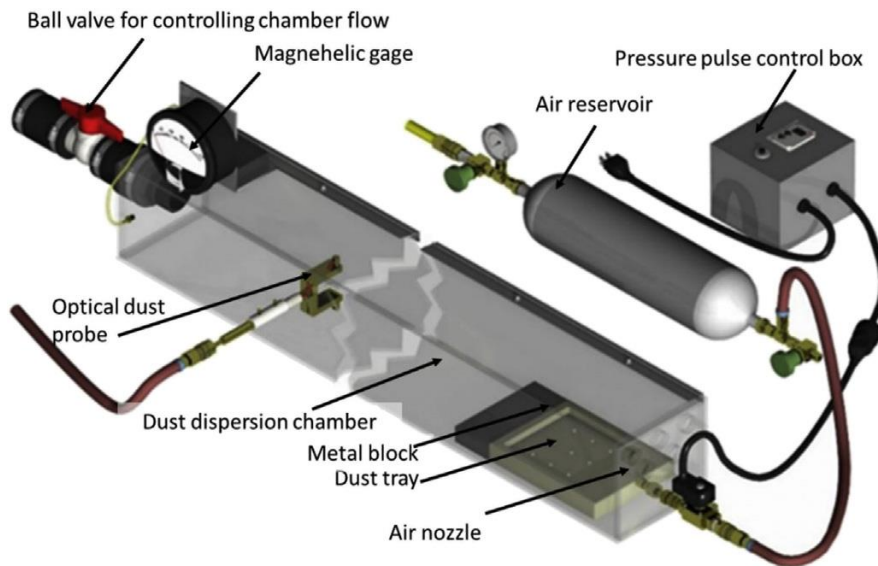


Figura 4.18 schema camera di dispersione [46]

Al fine di attribuire al campione una caratterizzazione sulla polverosità, è stato sviluppato dal Centro Sperimentale per la Sicurezza Industriale delle Atmosfere esplosive al Politecnico di Torino un test qualitativo che assegna un punteggio da 1 a 3 alla polvere esaminata in tre prove differenti.

La prima consiste nell'osservazione del campione all'interno, ad esempio di un contenitore e nel verificare se il materiale presenta a seguito di un movimento la tendenza a disperdersi in aria e a seconda dell'intensità del fenomeno attribuire ad esso un diverso punteggio

La seconda consiste nel verificare la presenza o meno di agglomerati (osservando il campione sedimentato) e a seguito di una movimentazione la loro tendenza a disgregarsi, la terza prevede la dispersione del campione all'interno del tubo di Hartmann modificato (in assenza di innesco) con un getto d'aria in pressione (8 bar) e valutarne la tendenza a disgregarsi e ad aderire alla parete dello strumento.

La tabella 4.1 nonché il test per la polverosità danno un'idea della capacità di un campione alla dispersione, ma non valore numerico confrontabile con test presenti in letteratura. Non sono in grado quindi di dare un valore quantitativo alla tendenza di un materiale a essere disperso in nube. L'unico confronto è stato possibile farlo con i KSt dove ad un aumento del DI corrisponde una dipendenza lineare dal KSt.

Per ovviare a questo problema è stata sviluppata una procedura e un prototipo di camera di dispersione per caratterizzare la tendenza delle polveri, in particolare quelle non tradizionali a formare delle nubi che verrà descritta nel capitolo seguente.

Tabella 4.1 test di polverosità

<i>VARIABILE</i>	SCORE		
	1	2	3
<i>1</i>	All'osservazione ad occhio nudo non si evidenzia dispersione di particelle fini in aria	All'osservazione ad occhio nudo si riporta la dispersione di alcune particelle assimilabili a fini in aria	All'osservazione a d occhio nudo si rileva la formazione di una nube di particelle fini in aria
<i>2</i>	All'osservazione ad occhio nudo il campione si presenta segregato in diversi agglomerati ed è irrilevante la presenza di fini. Se movimentato non si ha separazione degli stessi.	All'osservazione ad occhio nudo il campione risulta caratterizzato da una segregazione delle particelle, dove i fini sono accumulati sul fondo e diversi agglomerati di particelle sono presenti in superficie. In risposta al movimento si ha una parziale disgregazione degli agglomerati.	All'osservazione ad occhio nudo il campione risulta sedimentato in cumulo, nessun tipo di agglomerato è visibile. Se movimentato si ha un comportamento poco viscoso, tipo fluido.
<i>3</i>	Il campione, se sollecitato da getto di aria in pressione viene sollevato verso l'alto, non si disgrega né si ha evidente adesione dello steso alle pareti dello strumento, la > parte ricade nel portacampione senza subire alterazioni.	Il campione, sollecitato da getto di aria in pressione, viene sollevato e libera una quantità discreta di fini che aderiscono alle pareti dell'apparecchiatura. in parte ricade nel portacampione.	Il campione, se sollevato da getto di aria in pressione, viene disperso e aderisce alle pareti dello strumento per la maggior parte.

5. PROGETTAZIONE DELLA CAMERA DI DISPERSIONE

La camera di dispersione utilizzata al Laboratorio “Centro sperimentale per la sicurezza industriale delle atmosfere esplosive” è stata ideata per quantificare la polverosità e quindi la tendenza ad essere dispersa in aria per una polvere, in particolare in questo lavoro si sono utilizzate polveri tessili per le quali non esiste un test standardizzato per la loro caratterizzazione.

La camera è stata costruita in plexiglass in maniera tale che, grazie alla sua trasparenza, possano essere apprezzati i fenomeni di dispersione, per quanto possibile, ad occhio nudo o per registrare tramite videocamera ad alta velocità le prove.

L'apparato prevede una sezione di 30 cm di larghezza e 50 cm di altezza e una lunghezza di 120 cm, entrambe le estremità sono chiuse da due pannelli uno incernierato, l'altro no, in modo da permettere una facile ispezione in caso di necessità (carico/scarico ecc.), e in particolare quella di uscita non prevede alcuna incernieratura, ma il pannello può essere smontato grazie alla presenza di 13 viti, invece quella di ingresso oltre alle viti presenta due cerniere che permettono. Entrambi i pannelli presentano un foro del diametro di 4 cm il cui centro dista 15 cm dalla base della camera, nella sezione d'ingresso questo foro permette l'ingresso del tubo e dell'apparecchio di diffusione dell'aria, in uscita invece serve a garantire uno sfogo in caso di sovrappressione all'interno della camera.

Il corpo della camera presenta otto fori praticati sui fianchi della camera (quattro da un lato e quattro dall'altro) del diametro di 2 cm posti a 15 cm dal fondo della camera e distanti 22 cm tra loro, essi sono presenti per dare la possibilità di inserire delle sonde per la rilevazione di concentrazione, pressione e velocità dell'aria all'interno di essa.

All'interno sono presenti tre setti di sostegno posizionati 10 cm di distanza uno dall'altro e che percorrono per intero la lunghezza della camera, essi sono stati predisposti per permettere di effettuare sperimentazioni a varie altezze e distanze dal getto d'aria, le distanze orizzontali sono state misurate creando sulla camera una griglia col nastro carta con passo 15 cm.

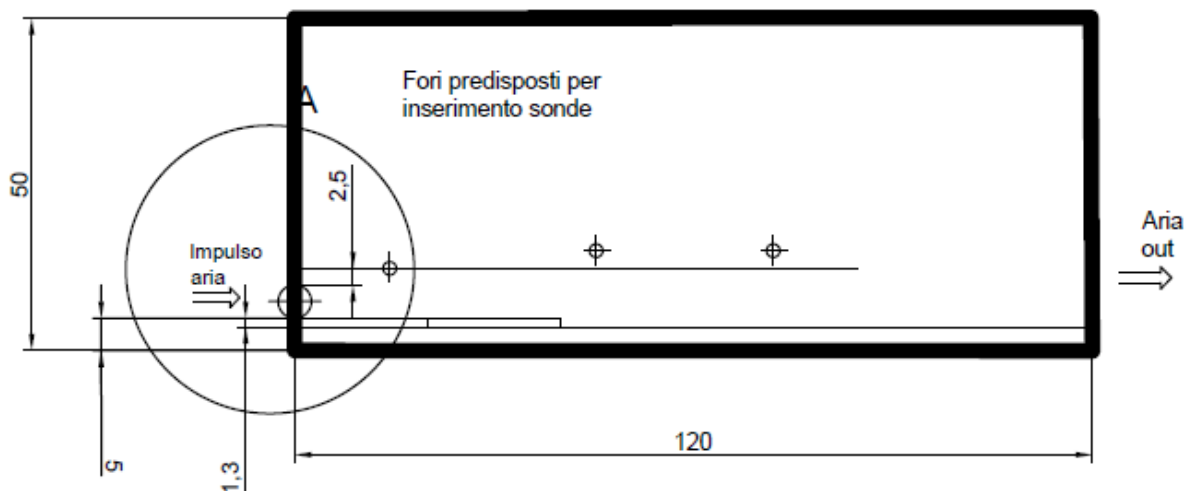


Figura 5.1 camera di dispersione

L'aria che viene flussata all'interno della camera proviene dalla rete dell'aria compressa presente in laboratorio, alla pressione di 7 bar. Per avere una maggiore manovrabilità sulla pressione che poi in camera genererà il campo di moto è stata installata sulla linea che porta alla nostra apparecchiatura una valvola riduttrice di pressione Metal Work Pneumatic in grado di sopportare un flusso in ingresso di 18 bar e temperatura pari a 50 °C.

Dalla valvola riduttrice di pressione parte una condotta metallica che dopo due gomiti arriva ad una valvola a globo collegata con un serbatoio per l'aria compressa di circa 0,547 L essa permette il riempimento con l'aria che arriva dalla valvola riduttrice di pressione. Collegato al serbatoio in pressione vi è un manometro per il controllo di questo parametro in camera.

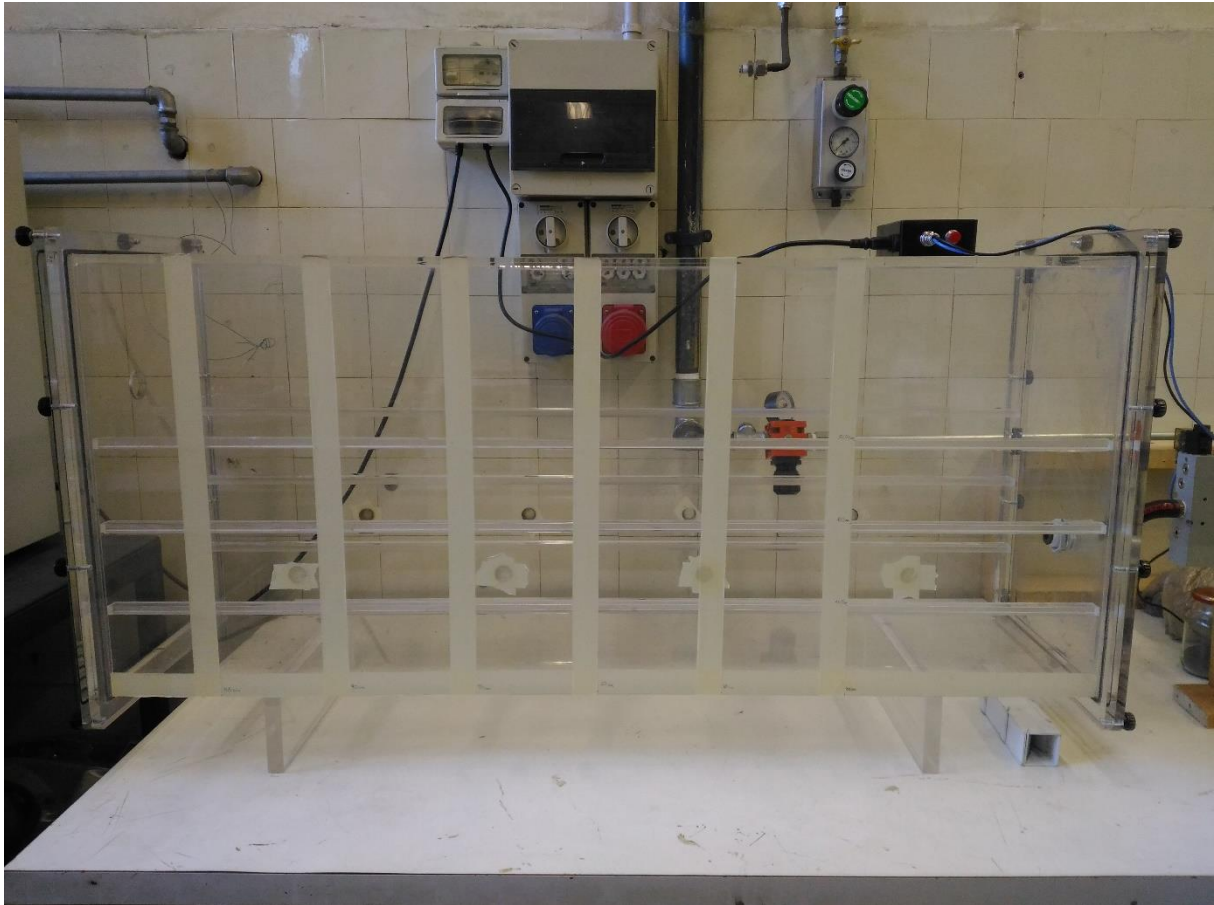


Figura 5.2 camera di dispersione

Dopo il serbatoio è presente un'elettrovalvola che sopporta al massimo 10 bar di pressione e un range di temperatura che va da -10 a 60 °C dotata di un collegamento elettrico ad una scatola dotata di pulsante per l'azionamento della stessa. Questo permette di creare un getto d'aria il più simile possibile ad un impulso, infatti l'elettrovalvola presenta in uscita un tubo da mezzo pollice che viene inserito nel pannello d'ingresso della camera e dotato a seconda delle necessità di vari tipi di diffusori.

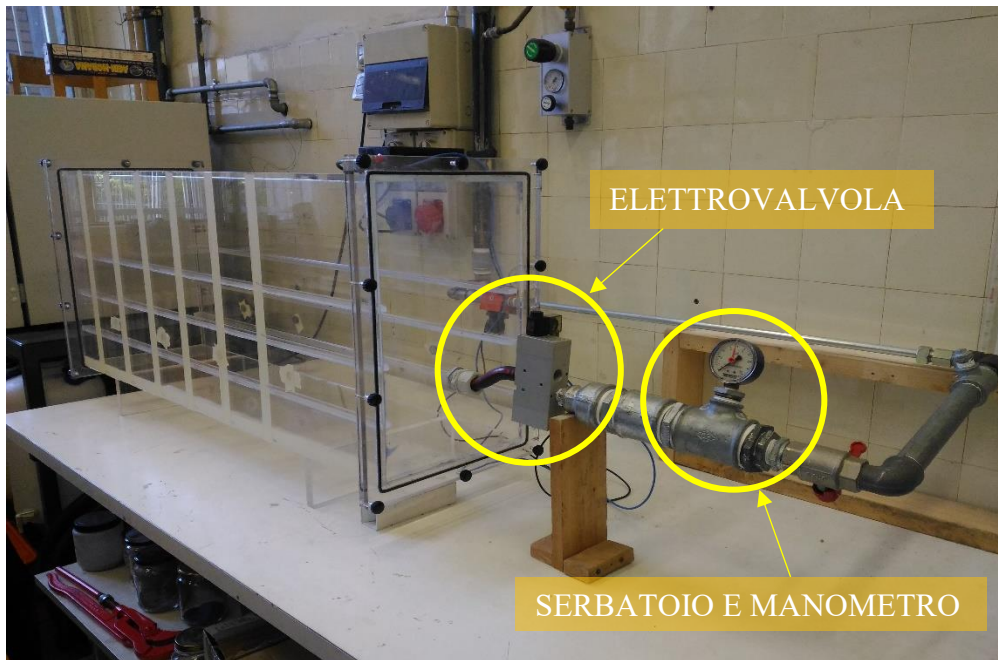


Figura 5.3 circuito dell'aria e camera di dispersione

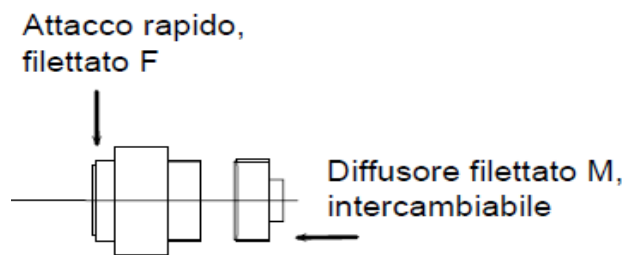


Figura 5.4 schema portagomma e diffusore intercambiabile

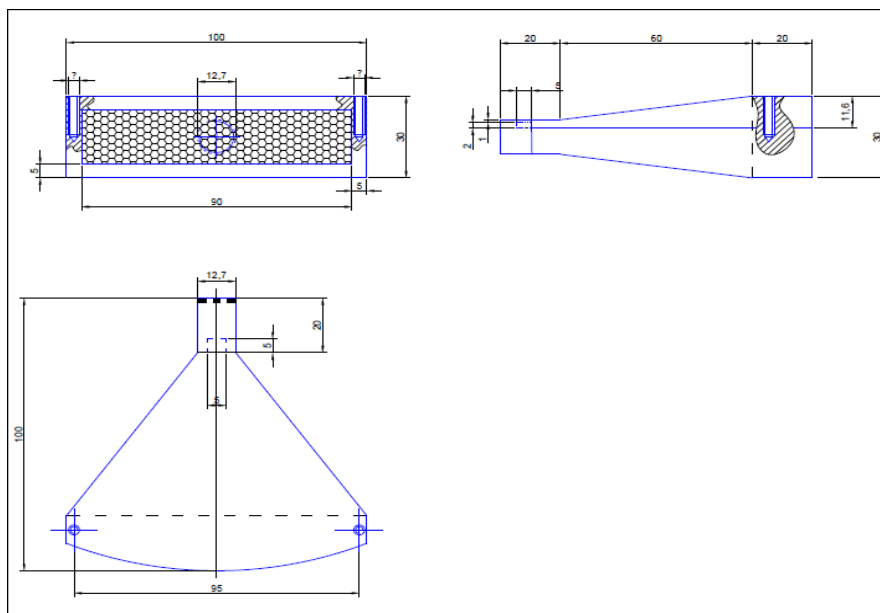


Figura 5.5 progetto diffusore per rendere omogeneo il getto

Per permettere una simulazione di dispersione più vicina possibile a quella che avviene su una superficie piana, presente in una ipotetica sezione di produzione industriale, è stato utilizzato per la sperimentazione in questione un portacampione piano in legno delle dimensioni di 10,1 cm di larghezza e 16,7 cm di lunghezza quindi con un'area complessiva di $168,67 \text{ cm}^2$.

Per simulare una deposizione naturale sulla sua superficie è stato ideato un apparecchio di deposizione che come mostrato nell'immagine 5.8 è realizzato con un setaccio con maglie da 1 mm il quale, attraverso l'uso del nastro è stato incorniciato con le misure del portacampione. Nella parte sottostante è stata compiuta la medesima operazione con l'aggiunta però di due alette in legno che favoriscono una caduta controllata. Sul vaglio è stato montato un braccio che permette l'installazione sul setacciatore meccanico utilizzato nel laboratorio (Giuliani IT3/WET).

La deposizione in strato avviene precaricando il campione sul vaglio e accendendo il setacciatore che attraverso la sua vibrazione favorirà la caduta del materiale simulando la deposizione che potrebbe avvenire su una qualsiasi superficie, avendo però un'elevata riproducibilità grazie alle caratteristiche standardizzate di vaglio e setacciatore. Il tempo di setacciatura e deposizione è di 30 s.

In figura 5.6 viene riportato il dispersore visto sia dall'alto che dal basso, invece in figura 5.7 è possibile apprezzare un esempio di strato creato con l'apparecchiatura descritta.

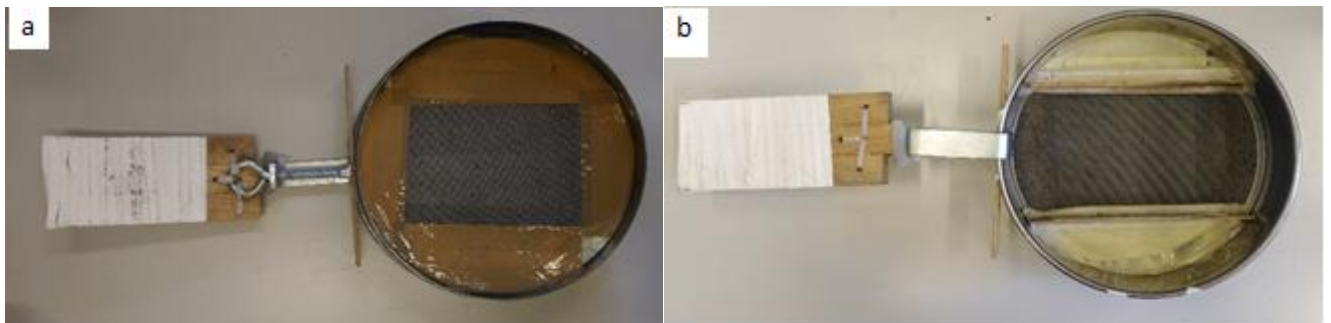


Figura 5.6 dispersore vista dall'alto (a) e vista dal basso (b)

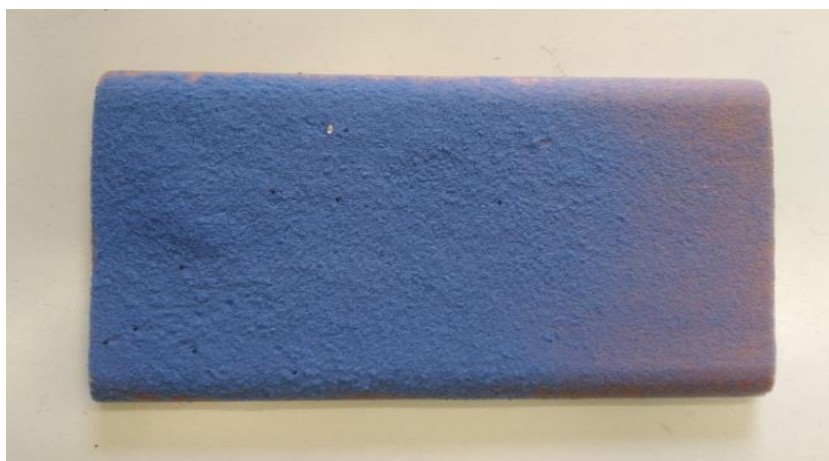


Figura 5.7 esempio di dispersione in strato dall'alto



Figura 5.8 esempio di dispersione in strato di profilo

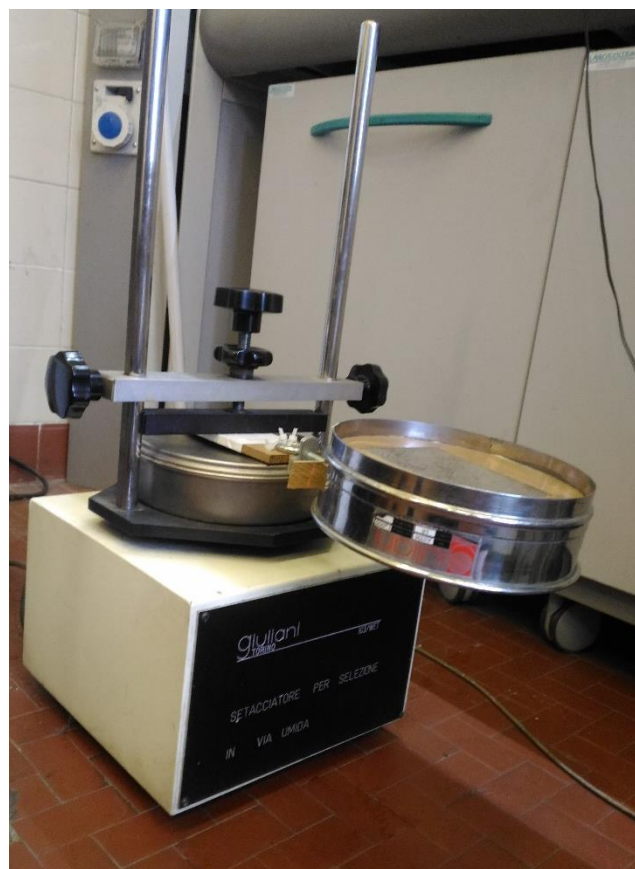


Figura 5.9 apparato di deposizione

5.1 PROCEDURA OPERATIVA

Al fine di standardizzare la procedura relativa alla disperdibilità delle polveri all'interno della camera e rendere così riproducibile la sperimentazione è stata redatta una procedura operativa descritta qui di seguito:

1. Aprire la valvola a globo della rete dell'aria compressa con la valvola riduttrice di pressione in posizione tutta aperta.
2. Regolare a pressione desiderata agendo sul pomello della valvola riduttrice di pressione.

3. Pesare il campione.
4. Pesare il portacampione
5. Montare il vaglio dotato di braccio sul setacciatore per selezione in via umida Giuliani IT3/WET.
6. Posizionare il portacampione al di sotto del dispersore.
7. Disperdere il campione pesato in maniera uniforme sul vaglio.
8. Accendere il setacciatore ed attendere fino a completa dispersione del campione (30s circa).
9. Prelevare il campione e pesare nuovamente campione più portacampione.
10. Calcolare la quantità di polvere persa durante la dispersione.
11. Inserirli all'interno della camera di dispersione sopra la lastra scorrevole e posizionarli alla distanza e all'altezza desiderata rispetto al diffusore.
12. Chiudere la camera di dispersione con le viti
13. Utilizzare la valvola a sfera per caricare il serbatoio dell'aria compressa aprendola e chiudendola quando il manometro a monte e a valle della valvola registrano la stessa pressione.
14. Utilizzare il pulsante per attivare l'elettrovalvola
15. Aprire la camera e prelevare il portacampione con il suo residuo non disperso.
16. Pesare nuovamente il portacampione.
17. Calcolare la quantità di campione disperso per differenza con quella iniziale.
18. Per ogni campione ripetere almeno tre volte la procedura che va da 3 a 17.

6. CARATTERIZZAZIONE DEI CAMPIONI

Al fine di caratterizzare il comportamento di un campione che verrà poi testato nella camera di dispersione se ne indagano le proprietà principali che possono dare delle informazioni preliminari sulla successiva dispersione.

Le proprietà che sono state calcolate per tutti e quattro i campioni testati, sono:

- Dimensione caratteristica, che per i campioni testati è stata talvolta il diametro, talvolta la lunghezza;
- La porzione di campione con taglia sotto i 500 micron
- L'angolo di riposo
- La densità di bulk
- L'indice di polverosità

I campioni utilizzati sono tutte polveri tessili derivanti da vari tipi di lavorazioni industriali in ordine abbiamo:

- 164/15 polvere di lana derivante da una lavorazione di cardatura campionata da macchinario
- 182/15 polvere di lana derivante da una preparazione campionata in un ambiente di lavoro
- 297/17 anch'essa polvere di lana derivante da una spazzolatura e campionata in ambiente
- 350/17 polvere di nylon

Campionata in ambiente di lavoro significa, che è raccolta nel sistema di recupero polveri generale dell'ambiente di lavoro. Da macchinario invece, che è campionata direttamente sulla superficie del macchinario o nel suo sistema dedicato di raccolta polveri.

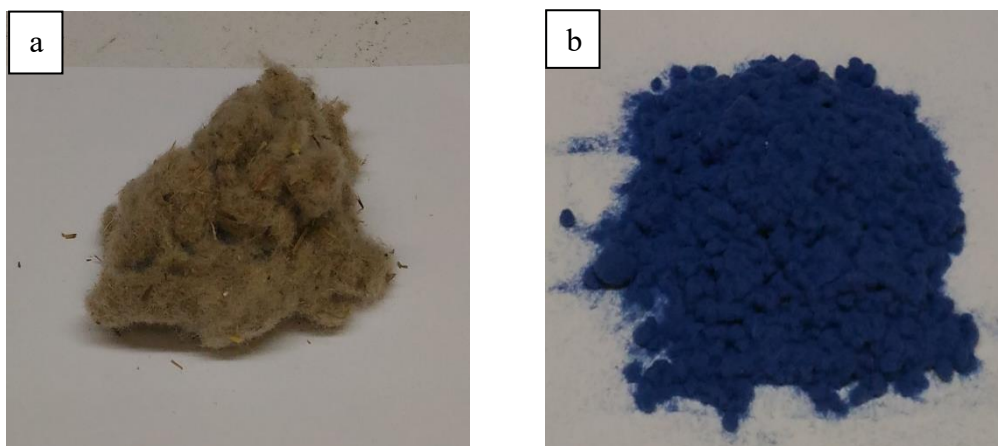


Figura 6.1 campioni 164/15 (a) e Nylon (b)

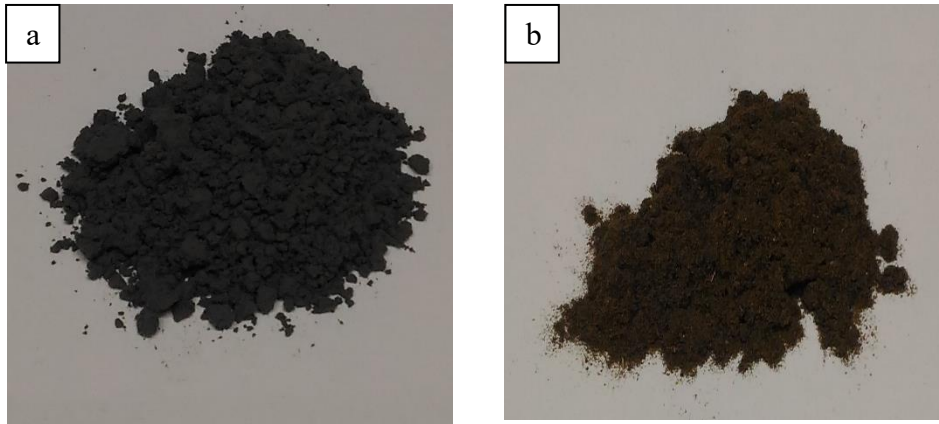


Figura 6.2 campioni 182/15 (a) e 297/17 (b)

6.1 DETERMINAZIONE LUNGHEZZA CARATTERISTICA

Per il calcolo della dimensione caratteristica tutti i campioni sono stati fotografati sia al SEM che al microscopio ottico e per alcuni, a causa del loro colore, è stato necessario utilizzare vari filtri fotografici per rendere più evidenti le fibre.

In seguito con l'ausilio di un software fotografico sono stati ricavati i diametri e dove possibile le lunghezze tramite delle proporzioni tra ingrandimento e dimensione del campione.

Dalle varie foto effettuate al SEM si è anche cercato di vedere come si potessero disporre le fibre una volta disperse per capire come l'eventuale schema di deposizione potesse influenzare in qualche modo la loro disperdibilità.

6.1.1 CAMPIONE 164/15

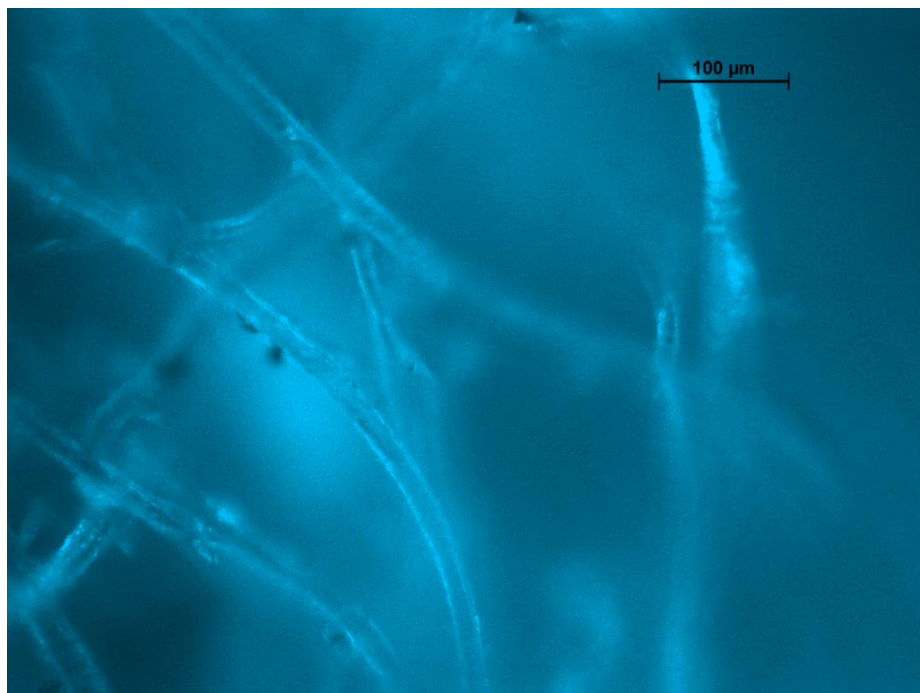


Figura 6.3 campione 164/15 microscopio ottico

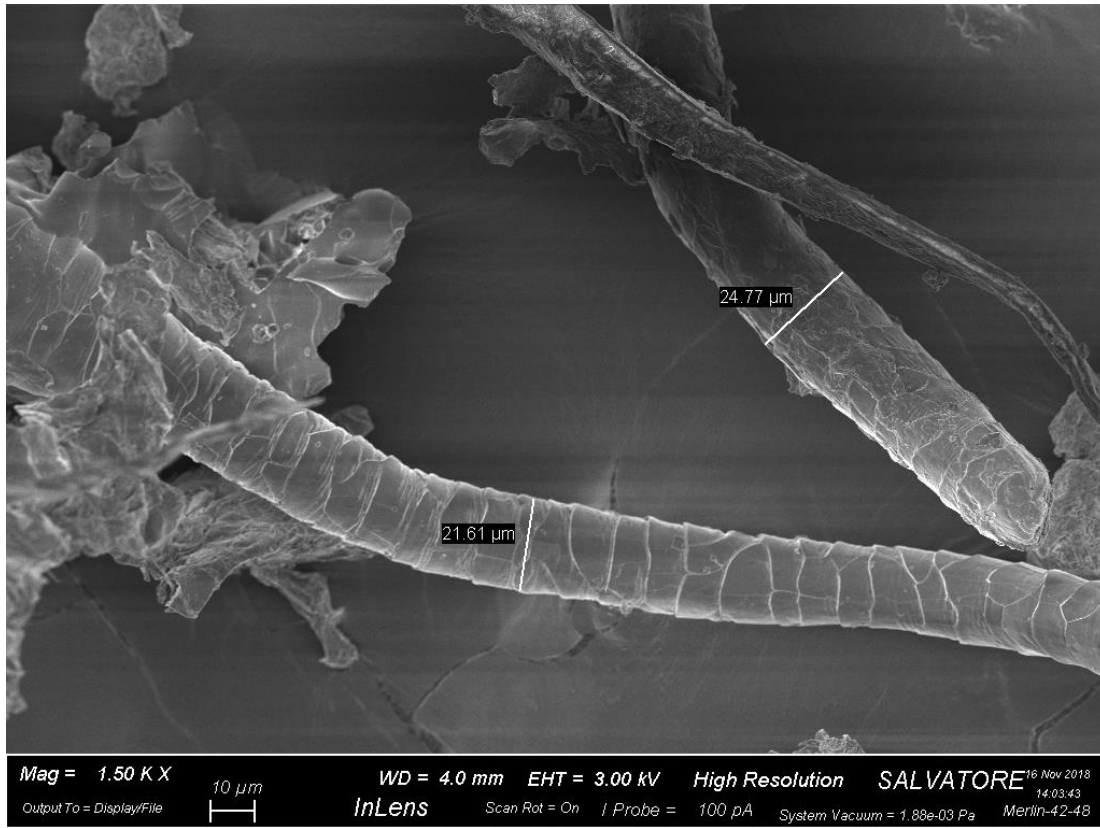


Figura 6.4 campione 164/15 SEM

A seguito di varie misurazioni effettuate sugli ingrandimenti ottenuti dal microscopio ottico si è ricavato che il diametro medio del campione è di 22,63 micron, come confermato dal grafico seguente.

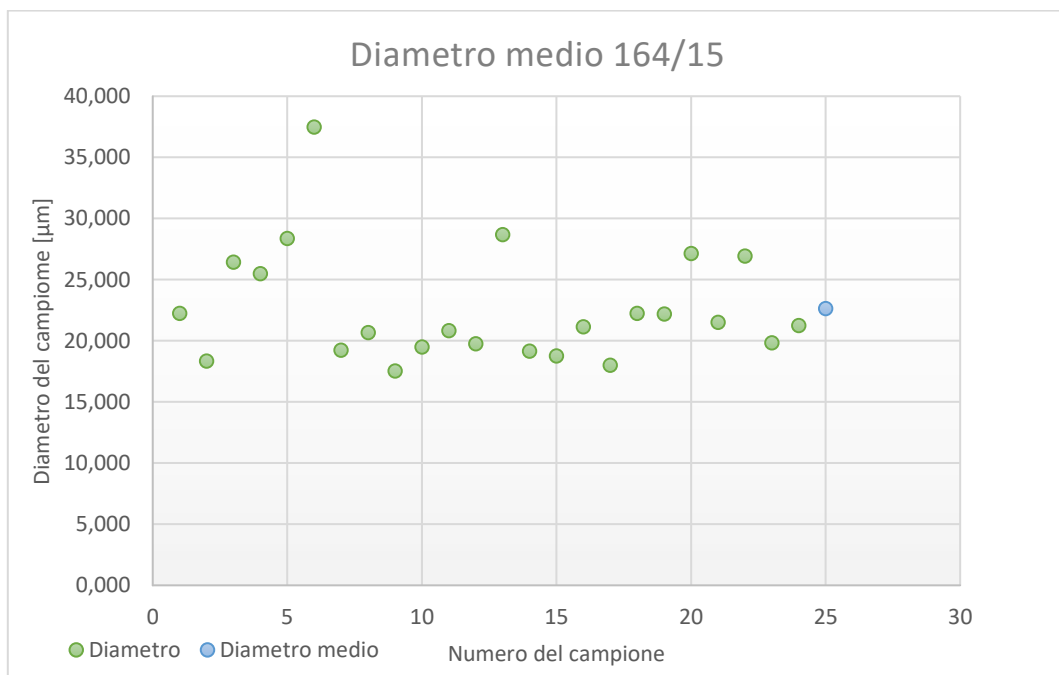


Figura 6.5 grafico per ricavare il diametro medio campione 164/15

6.1.2 CAMPIONE 182/15

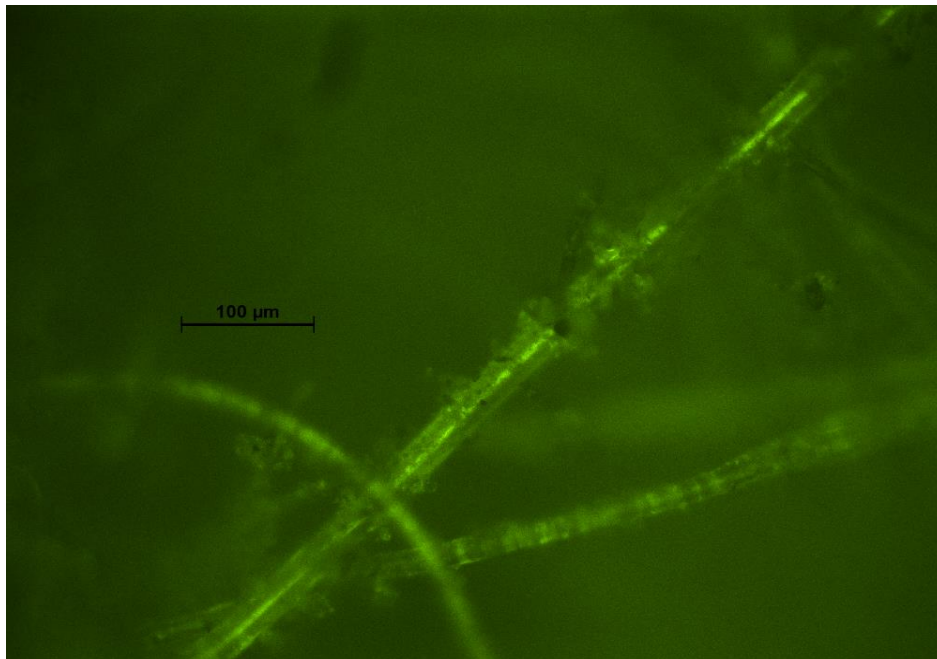


Figura 6.6 campione 182/15 microscopio ottico

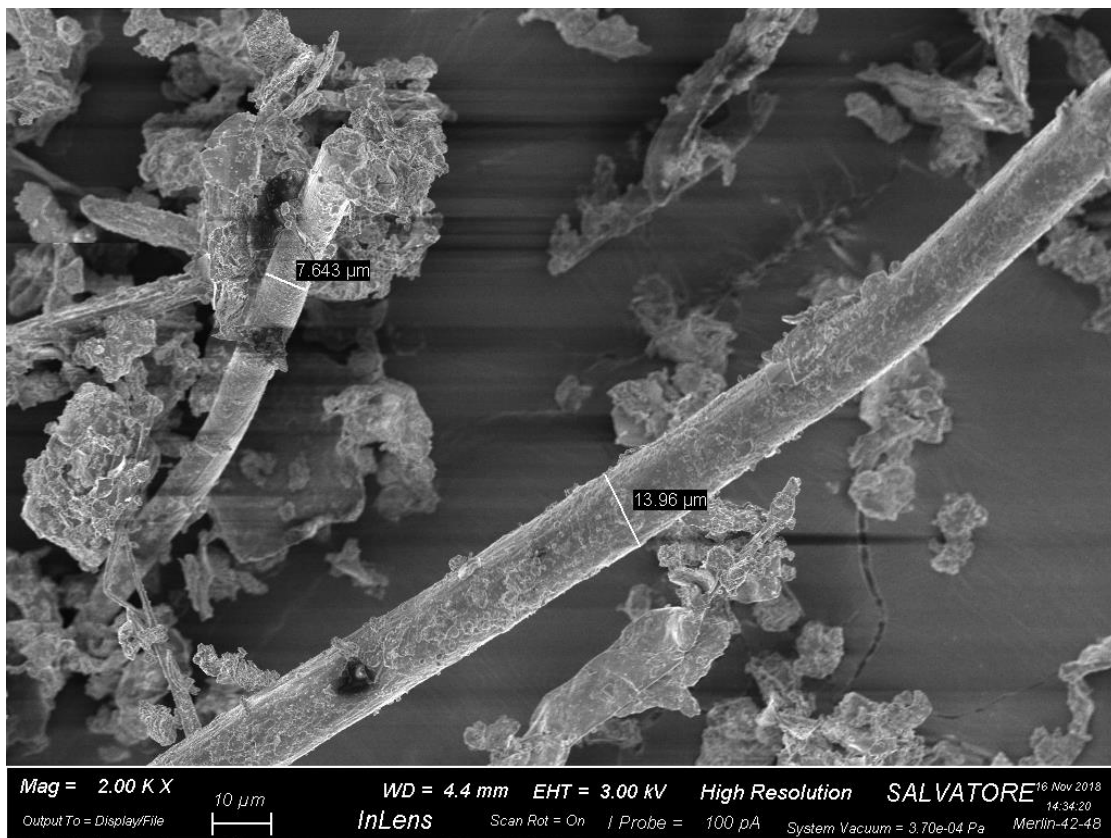


Figura 6.7 campione 182/15 SEM

Come si può notare dal colore della foto anche in questo caso è stato utilizzato un filtro per riuscire a visualizzare meglio le fibre, in questo campione si nota come vi sia una presenza abbastanza elevata di impurità incollate ad essa.

In questo caso la misura del diametro medio è 19,83 micron, come si evince anche dal grafico.

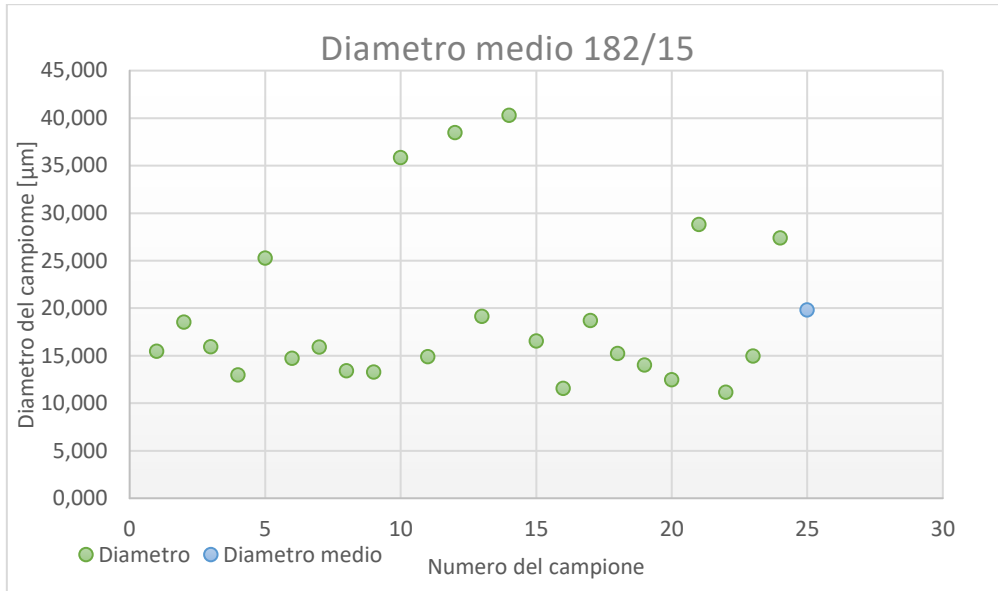


Figura 6.8 grafico per ricavare il diametro medio campione 164/15

6.1.3 CAMPIONE 297/17

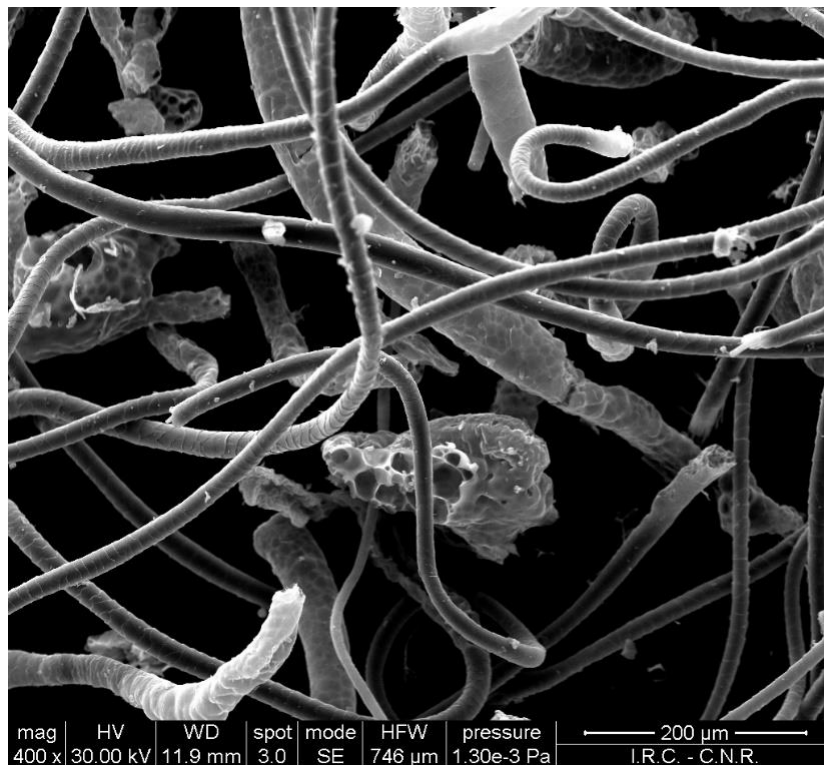


Figura 6.9 campione 297/17 SEM

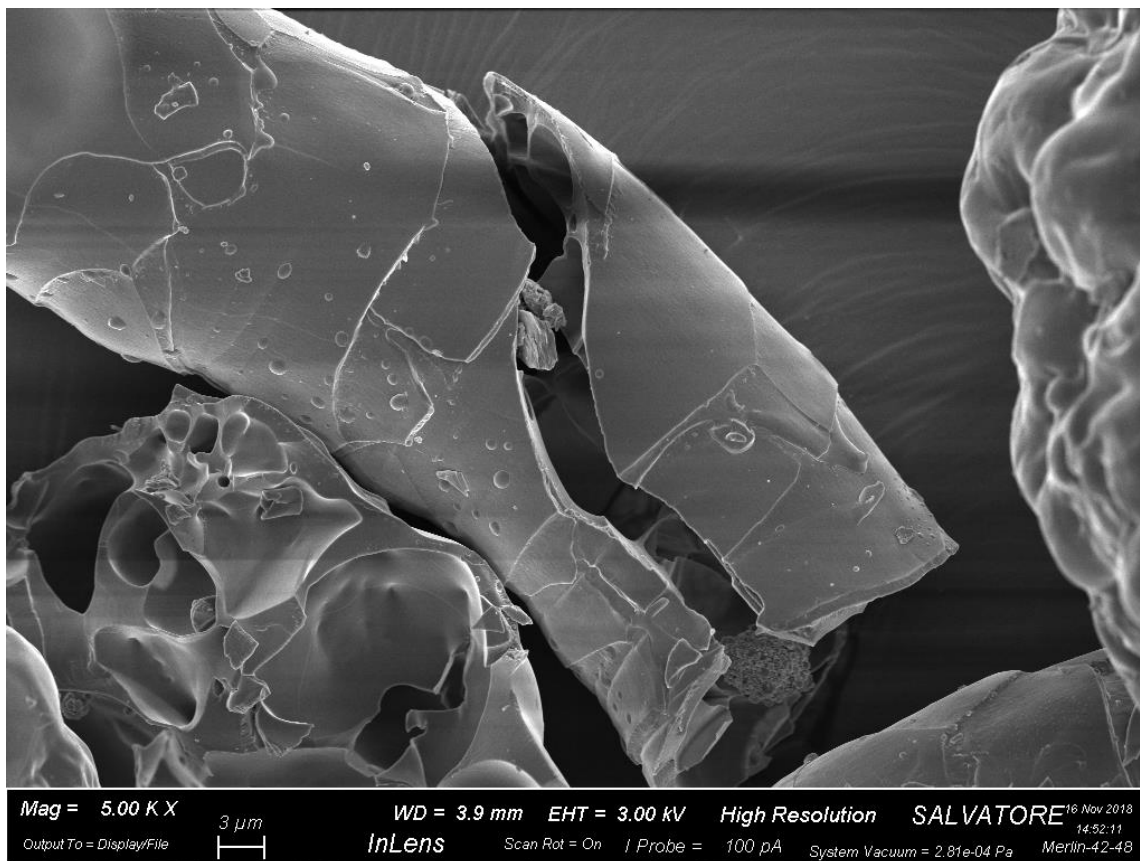


Figura 6.10 campione 297/17 SEM

Risulta subito chiaro che grazie a questo tipo di ingrandimento i bordi siano più chiari e nitidi e permettano una migliore stima del diametro medio. L'immagine mostra chiaramente che la natura di questo materiale è di origine animale (lana), riconoscibile per la struttura cheratinosa della fibra. Le misure del diametro medio ricavate dal microscopio ottico restituiscono un valore di 16,8 micron.

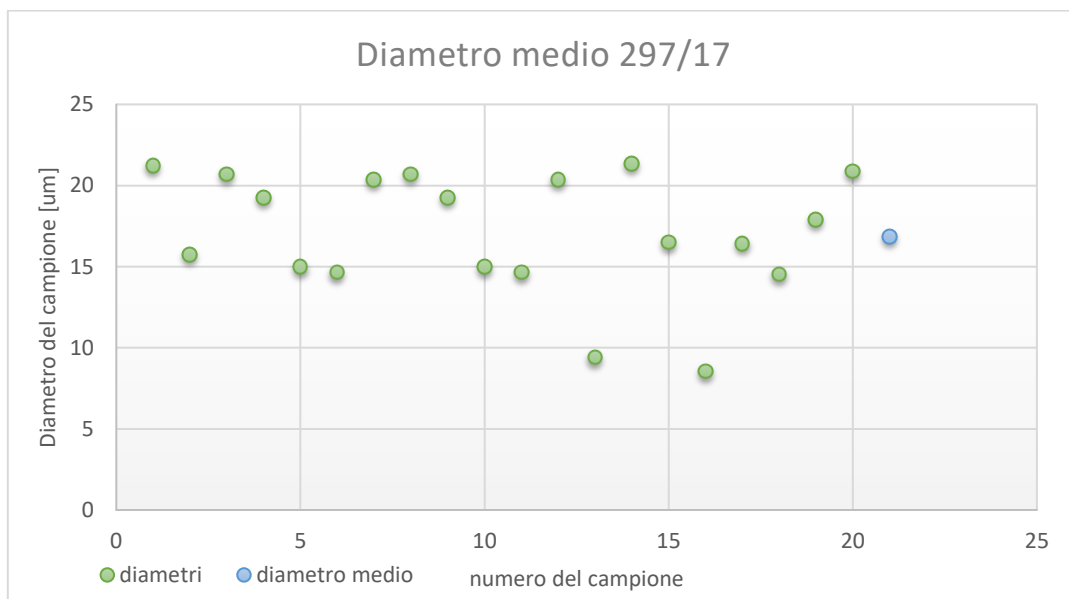


Figura 6.11 grafico per ricavare il diametro medio

6.1.4 CAMPIONE NYLON

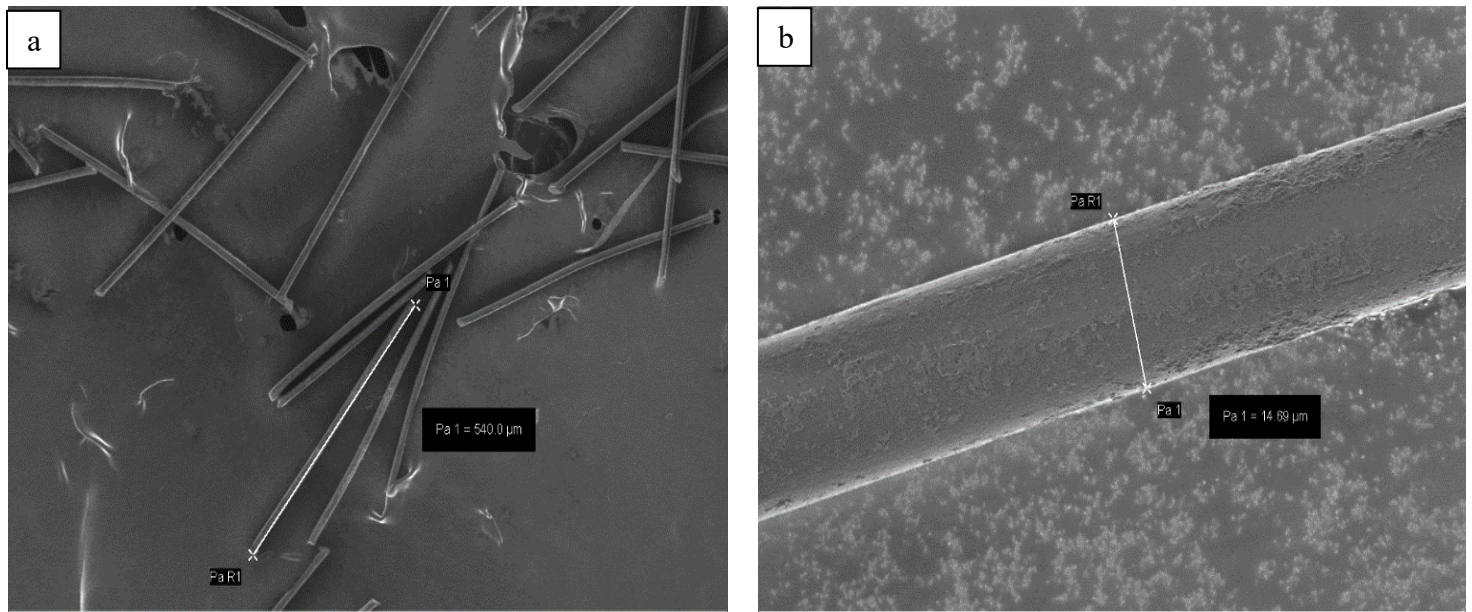


Figura 6.12 campione di nylon visto al SEM

Nel campione di Nylon grazie alla sua precisa geometria è stato possibile dalle fotografie al SEM stimare attraverso in software grafico sia la lunghezza media delle fibre che il suo diametro che sono risultati 540 micron e 14,42 micron.

6.2 FRAZIONE DI CAMPIONE CON DIMENSIONE INFERIORE AI 500 MICRON

Tutti i campioni utilizzati sono stati setacciati utilizzando il setacciatore elettrico Giuliani IT3/WET, utilizzando un vaglio da 500 micron e tenendo il campione al suo interno per un tempo di 10 min.

Per i campioni utilizzati la presenza di fibre ha fatto sì che anche alcune particelle con dimensioni maggiori di 500 micron passassero dalle maglie, orientandosi secondo la dimensione minore ovvero il diametro. Invece altre a causa della tendenza delle fibre tessili di formare degli aggregati non passassero.

6.3 ANGOLO DI RIPOSO

Questo tipo di misura permette di valutare in che modo un materiale si dispone quando viene depositato in un cumulo, l'angolo che viene a formarsi tra il campione e il piano orizzontale permette di valutare la scorrevolezza e la coesività.

L'apparato per la prova, conforme alla normativa ISO 902 [48] consiste in un vaglio conico con maglie da 500 micron posto al di sopra di una piastra circolare del diametro di 3,5 cm. Il vaglio

è collegato tramite un braccio al setacciatore che una volta messo in funzione fornirà la vibrazione necessaria per far cadere il campione sulla lastra circolare.

La procedura prevede di continuare ad aggiungere campione sul vaglio fino a quando il cumulo venutosi a formare non abbia la sua sommità ad una distanza inferiore a 1 mm, per ogni campione la misura è stata effettuata tre volte. Gli angoli di riposo sono stati poi ricavati grazie alla formula contenuta nella figura seguente.

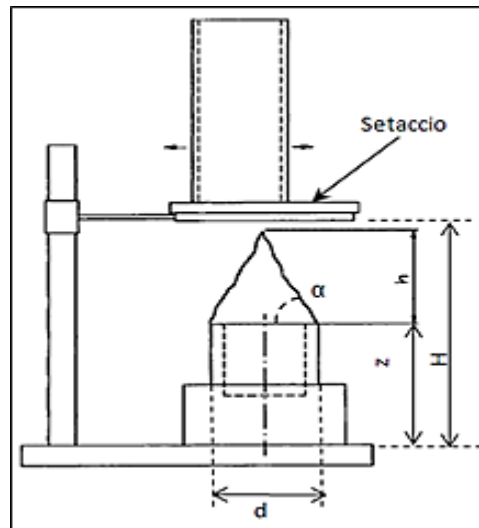


Figura 6.13 apparato per misurare l'angolo di riposo

$$\alpha = \arctg(2h/d)$$

(6.1)



Figura 6.14 esempio di cumulo per la misurazione dell'angolo di riposo

Per i campioni testati i risultati sono i seguenti:

Tabella 6.1 angoli di riposo

CAMPIONE	ANGOLO DI RIPOSO	MEDIA
164/15	67,41	66,18
	66,40	
	64,72	
	58,02	
297/17	61,36	60,73
	62,80	
	52,76	
182/15	54,49	54,10
	55,04	
	46,61	
NYLON	36,63	43,88
	48,41	

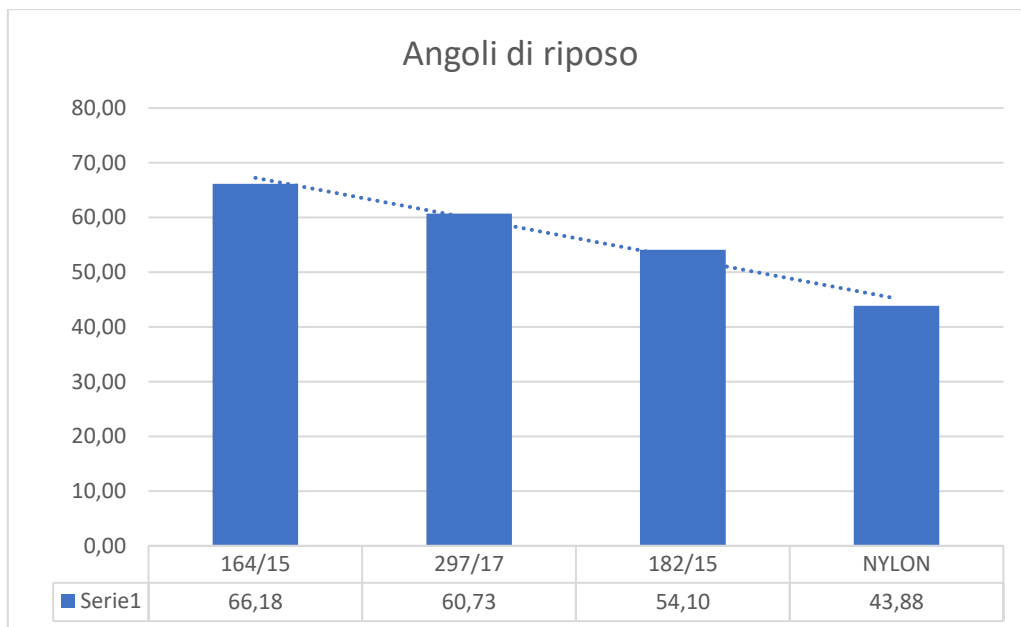


Figura 6.15 angoli di riposo

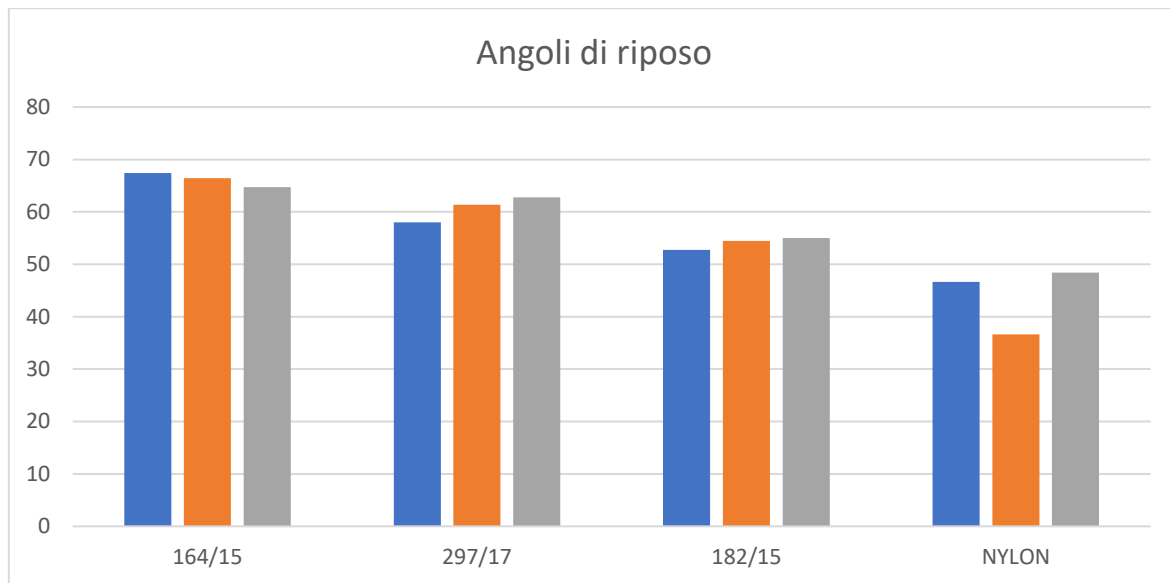


Figura 6.16 angoli di riposo

Risulta chiaro dalla sperimentazione effettuata che le polveri più flocculanti tendono a creare angoli di riposo con valori più elevati e che quindi le forze di adesione tra esse risultano maggiori in relazione anche al loro elevato rapporto diametro su lunghezza.

Il campione 164/15 conferma questa tendenza facendo registrare un valore di circa 66° , cosa ipotizzabile essendo il materiale più fibroso anche ad occhio nudo rispetto agli altri.

Allo stesso modo la morfologia delle fibre ha fatto sì che il nylon avendo una dimensione delle particelle molto definita, soprattutto per quanto riguarda la lunghezza, registrasse l'angolo di riposo più basso tra tutti i campioni (circa 44°) questo perché, per assurdo, una distribuzione delle particelle di questo tipo lo rende un materiale molto simile ad una polvere con particelle sferiche [49].

6.4 DENSITA' DI BULK

La densità di una polvere è un concetto non univocamente definibile, infatti a seconda di come una polvere va a formare uno strato possono essere registrate misure di densità molto differenti, per dare una visione più chiara del fenomeno possiamo pensare ad una polvere che occupi un determinato volume. Per effettuare il riempimento la si può far cadere in maniera libera e aspettare che si colmi il volume desiderato, oppure si potrebbe pensare di mettere in agitazione il contenitore così da dare alla polvere un grado di compattazione e nello stesso volume inserire una quantità notevolmente maggiore di materiale.

Quelle che sono appena state descritte sono i due tipi di densità che definiscono una polvere, la densità apparente o di bulk e la densità di tap, esse sono la minore e la maggiore misurabili per un dato campione di polvere.

Per la nostra sperimentazione quella più utile è quella di bulk perché nelle prove di dispersione la polvere è stata depositata su uno strato per caduta libera e quindi è la densità apparente quella che definisce la natura del nostro strato.

Per la misurazione si è fatto riferimento alla normativa ASTM B 329 – 98 [50], che prevede che essa venga misurata tramite un volume detto di Scott.

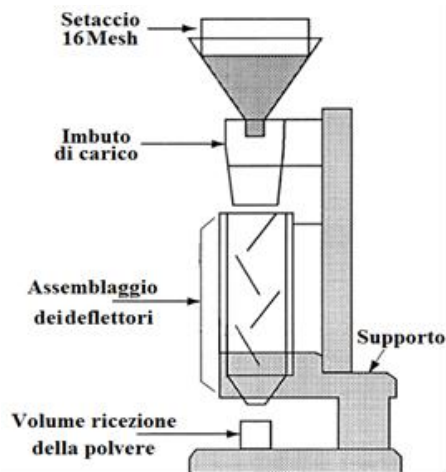


Figura 6.17 apparecchio per misurare la densità di bulk

Esso consiste in un imbuto con alla sua sommità un vaglio con le maglie da 1 mm collegato al setacciatore elettrico, esso fornirà la vibrazione necessaria per far cadere il campione nel volume di Scott, al suo interno sono presenti una serie di deflettori che creeranno un cammino ripetibile per ogni prova. Alla base è presente un cilindro graduato di 25 ml che verrà riempito completamente dal campione. Una volta ultimato il riempimento la sommità di quest'ultimo verrà livellata con una spatola evitando di comprimere il materiale.

La densità sarà ricavata pesando la massa di campione presente nel cilindro e dividendola per il suo volume. Su ogni campione la prova viene ripetuta tre volte.



Figura 6.18 apparecchio per la misura della densità di bulk

Tabella 6.2 densità di bulk

CAMPIONE	DENSITA' BULK [Kg/m³]	MEDIA
164/15	158	158,13
	160	
	156,4	
297/17	110	114,40
	113,2	
	120	
182/15	108,8	108,53
	107,6	
	109,2	
NYLON	68	69,47
	69,6	
	70,8	

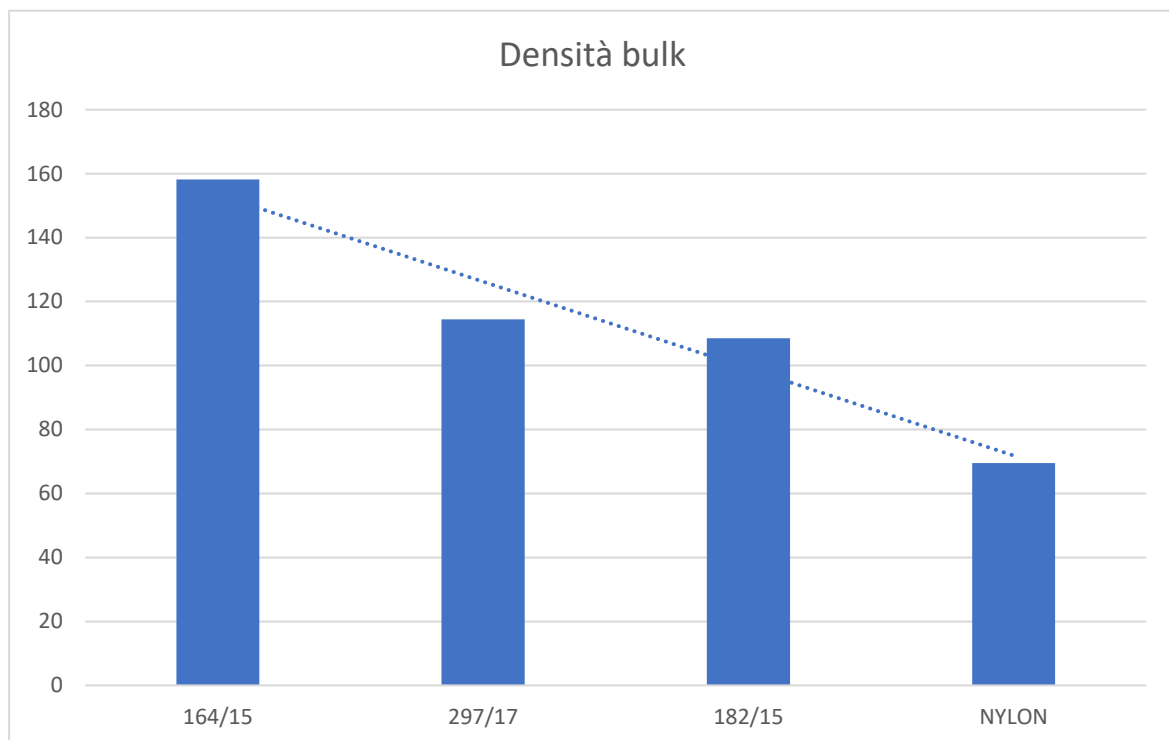


Figura 6.19 densità di bulk

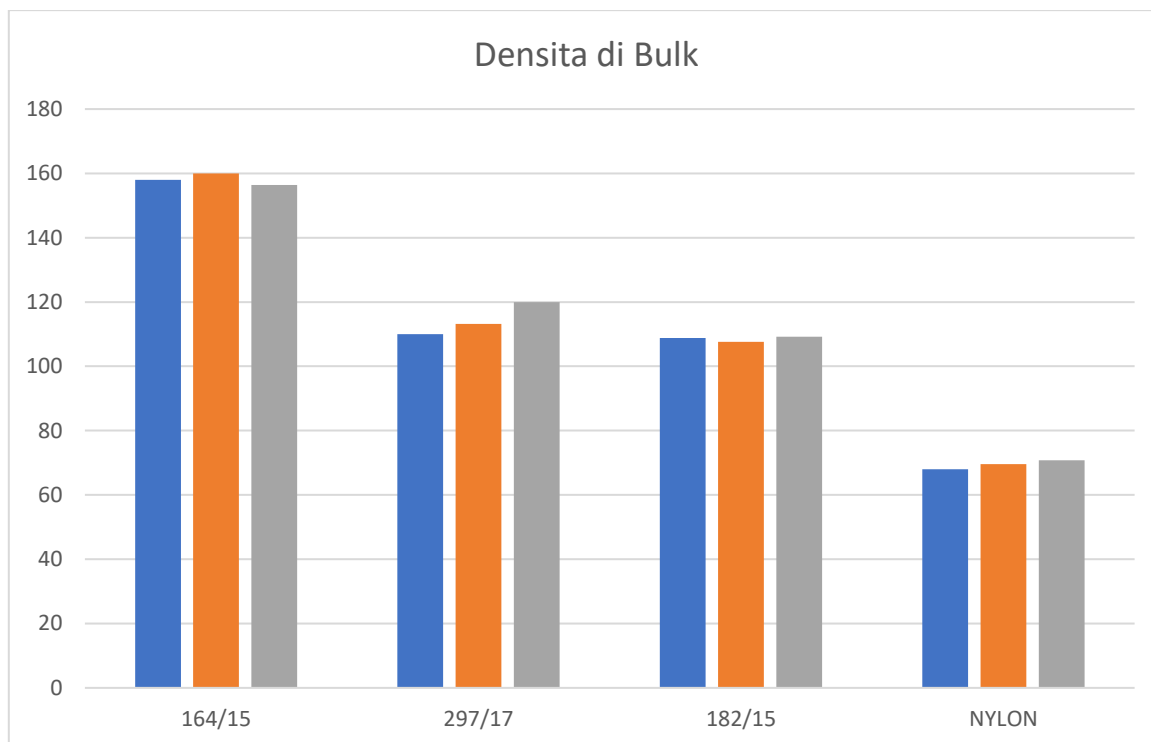


Figura 6.20 densità di bulk

In questo caso i campioni più fibrosi e che tendono quindi a formare più fiocchi risultano avere un valore maggiore della densità apparente, suggerendo quindi che una maggiore lunghezza delle fibre e quindi un maggiore aggrovigliamento delle stesse porti a generare una quantità di vuoto tra le particelle inferiore rispetto che ad un campione, come il nylon, che ha una morfologia ben precisa. Assieme a questi ragionamenti però non bisogna trascurare il fatto che a parità di volume occupato e parità di vuoto tra le particelle il peso specifico del materiale influisce in maniera preponderante sul valore della densità di bulk.

6.5 INDICE DI POLVEROSITA'

Come detto in precedenza è una misura qualitativa della tendenza di un materiale ad essere disperso, il test è stato sviluppato e definito presso il ecc.

I valori per i campioni usati in questa sperimentazione sono i seguenti:

Tabella 6.3 indice di polverosità

CAMPIONE	INDICE DI POLVEROSITA'
164/15	7
297/17	8
182/15	8
NYLON	9

Come si può notare i campioni più fibrosi presentano una tendenza alla dispersione scarsa, conferma del fatto che essi abbiano una tendenza ridotta a formare delle nubi e siano molto difficili da caratterizzare con i test attuali, ad esempio $DI=7$ significa che il campione ad esempio per quanto riguarda la dispersione ha questa definizione: “Il campione, se sollecitato da getto di aria in pressione viene sollevato verso l'alto, non si disgrega né si ha evidente adesione dello steso alle pareti dello strumento, la maggior parte ricade nel portacampione senza subire alterazioni”

Nella sperimentazione descritta nel capitolo seguente si cercherà di trovare delle correlazioni con le proprietà delle polveri descritte in questo capitolo, in particolare si cercherà di trovare delle conferme sugli indici di polverosità e ne attribuirebbe un carattere quantitativo rispetto al fenomeno di dispersione per le polveri tessili dati gli scarsi dati in letteratura e la difficoltà nel testarli nelle apparecchiature standardizzate.

7. SPERIMENTAZIONE

La procedura operativa per gli esperimenti è essenzialmente quella descritta nel capitolo 4.1, per valutare l'effetto dell'onda di pressione si è deciso di testare i campioni a varie distanze utilizzando sempre la stessa massa di materiale.

Quindi si è optato di utilizzare per ogni prova 2g di campione e ripetere 3 volte il test di disperdibilità ad ogni distanza (30 cm, 45 cm, 60 cm, 75 cm, 90 cm) mantenendo un'altezza rispetto alla base della camera di 11,5 cm, questo ha permesso di verificare la riproducibilità del fenomeno.

La pressione con la quale l'aria è utilizzata per la prova è stata di 3 bar, in relazione anche alla sperimentazione di Perera et al [46] i quali avevano calcolato che con questo valore di pressione, in un sistema di piccole dimensioni generava una pressione dinamica paragonabile a quella di una esplosione in una miniera di carbone.

Sono stati utilizzati anche dispositivi fotografici per l'osservazione del fenomeno di sollevamento dello strato e la creazione della nube di polvere che hanno fornito un'idea delle tempistiche del fenomeno di sollevamento.

I risultati ottenuti sono stati riportati nei seguenti grafici:

Tabella 7.1 percentuale di campione perso prima del test

CAMPIONI	PERCENTUALE PERSA
164/15	19%
297/17	6%
182/15	3%
350/18	14%

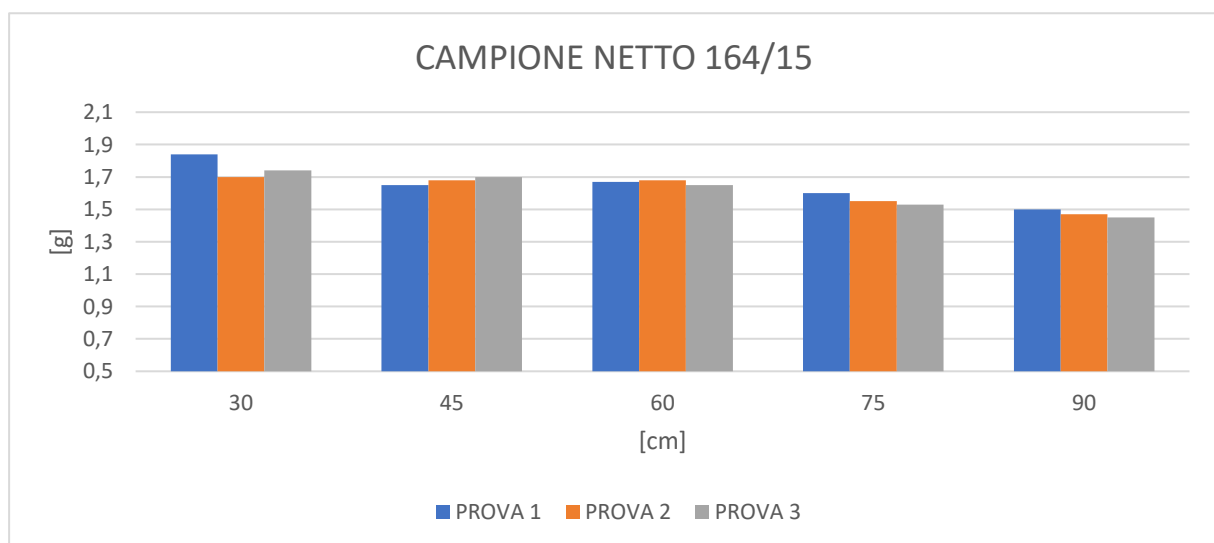


Figura 7.1 grafico campione 164/15

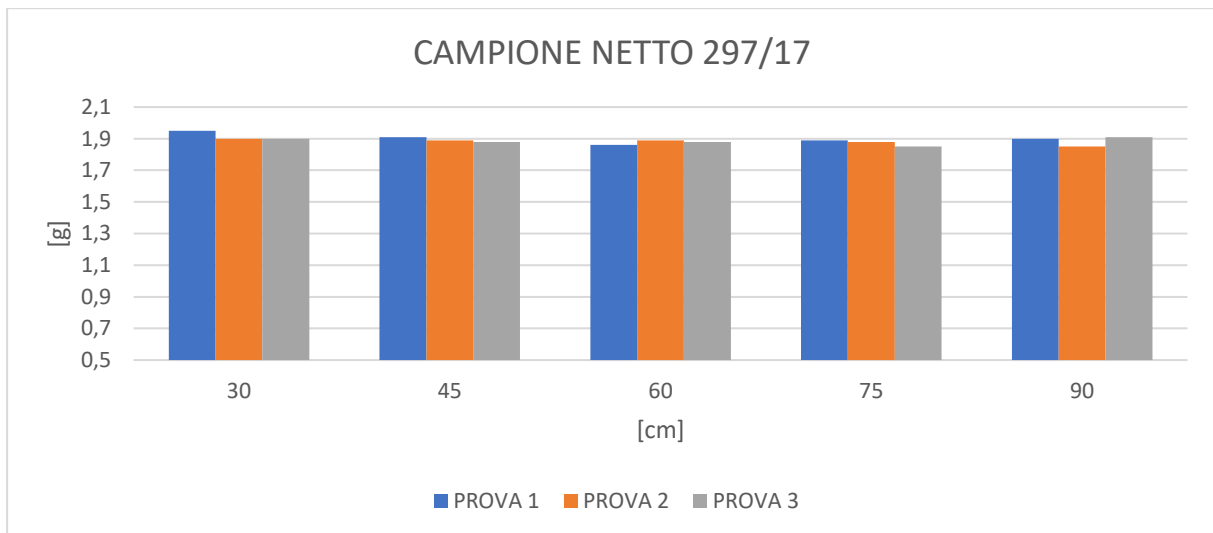


Figura 7.2 grafico campione 297/17

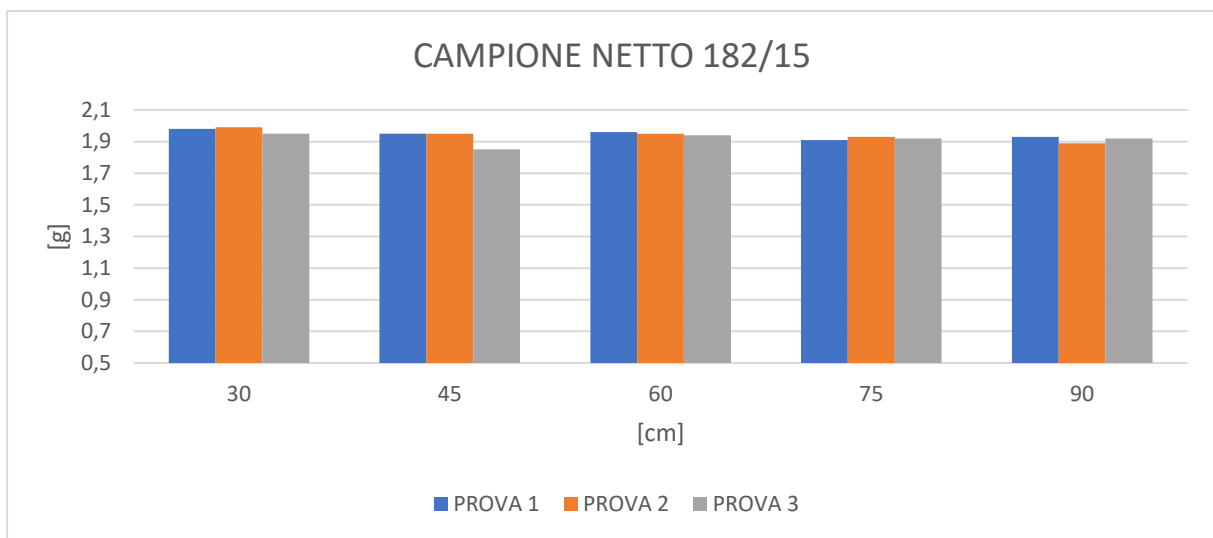


Figura 7.3 grafico campione 297/17

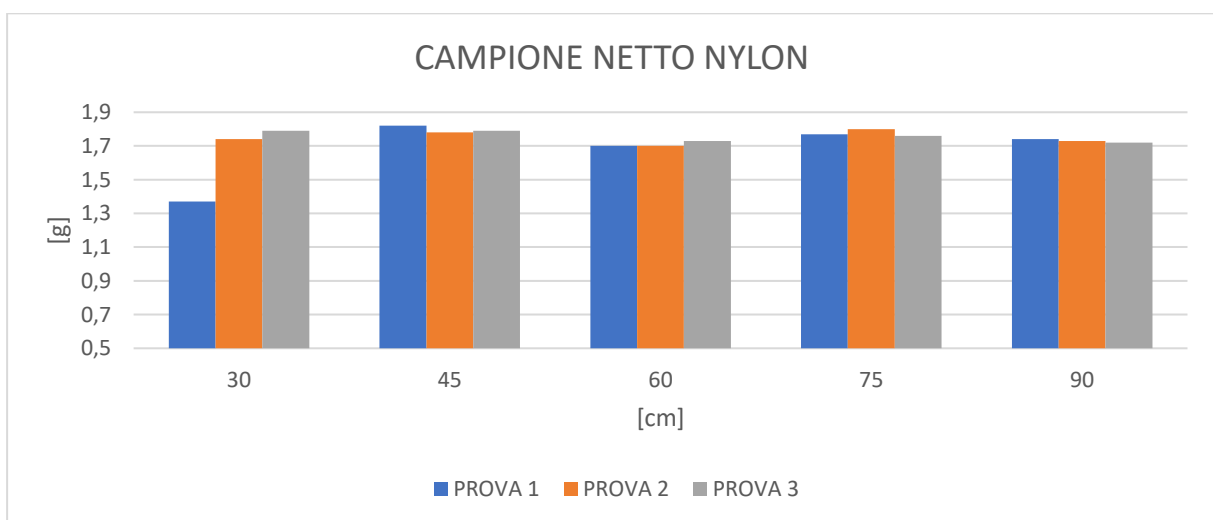


Figura 7.4 grafico campione nylon

Questi grafici mostrano la quantità di campione perso prima del test di deposizione per ogni prova, si può notare come per i campioni più fibrosi come il 164/15 si abbia una percentuale di campione perso molto elevata a causa del fatto che nella deposizione in strato esso tendeva ad aggregarsi e a formare dei fiocchi sulla superficie del vaglio con maglia di 1 mm. L'alta percentuale di campione perso per il nylon invece è a causa delle alte forze elettrostatiche presenti in questo materiale.

Per quanto riguarda la dispersione nella camera invece i risultati sono i seguenti:

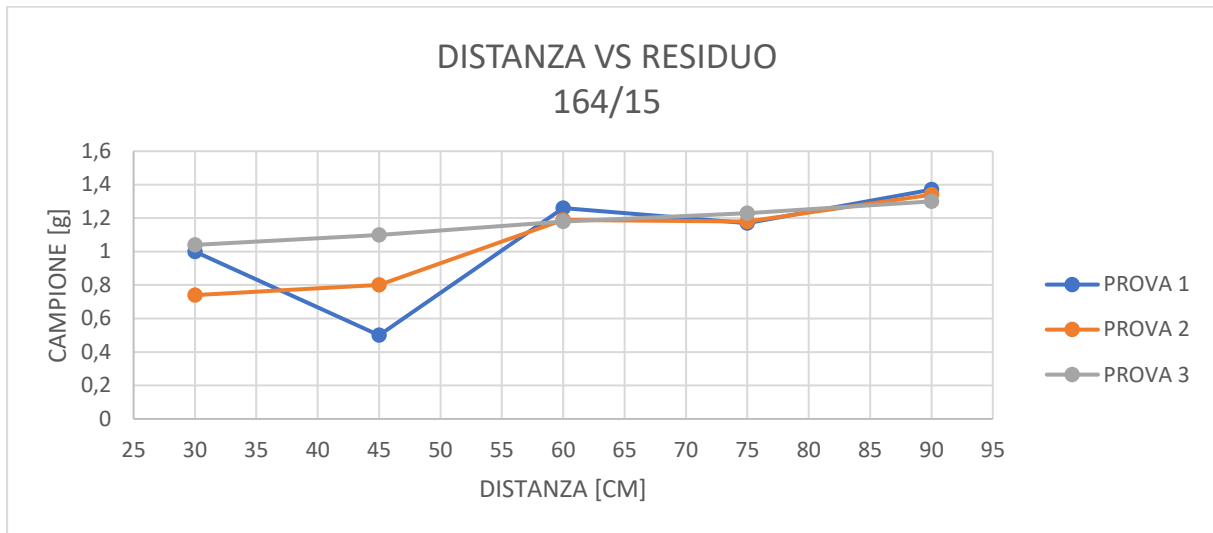


Figura 7.5 grafico campione 164/15

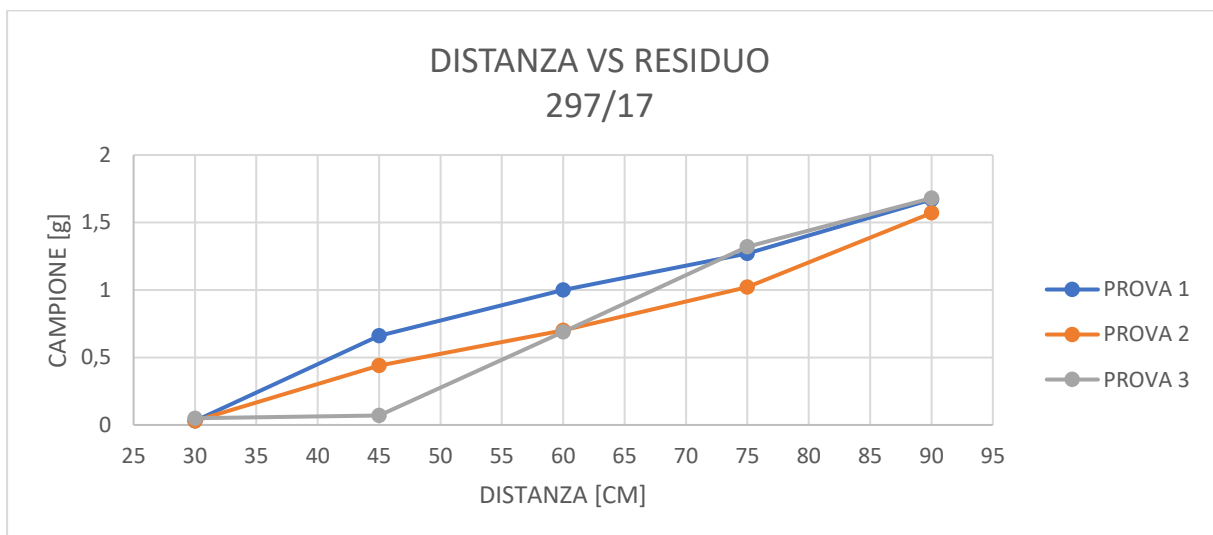


Figura 7.6 grafico campione 297/17

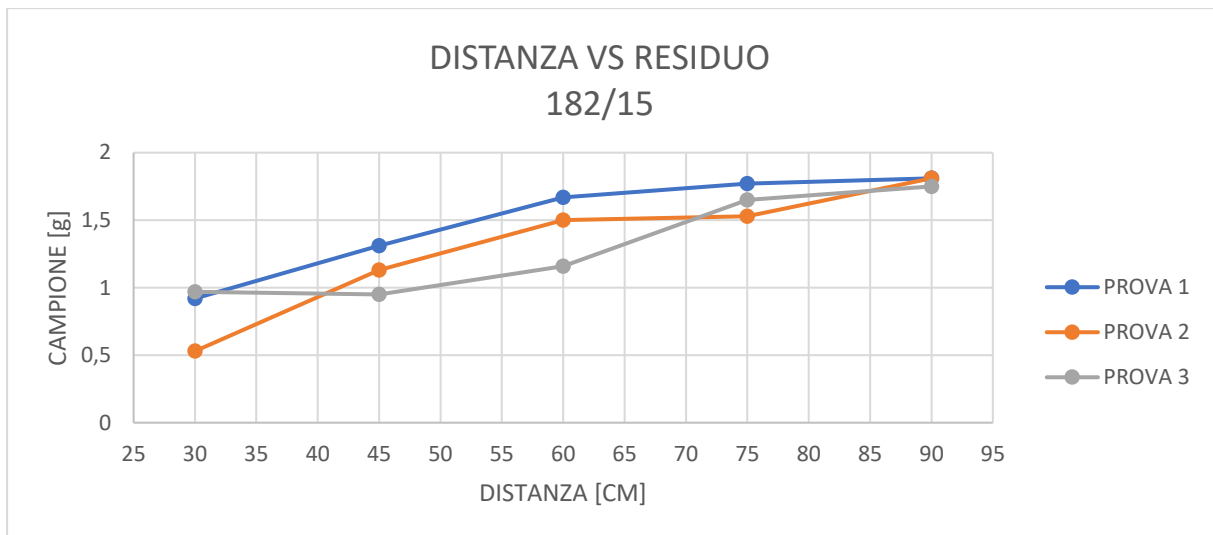


Figura 7.7 grafico campione 182/15

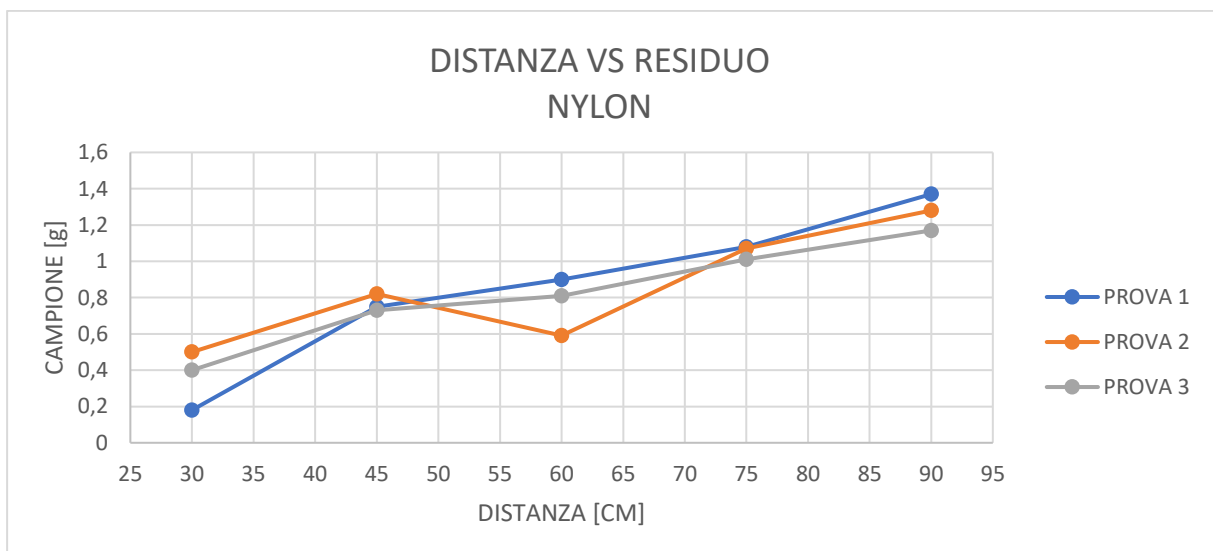


Figura 7.8 grafico campione nylon

La serie delle tre prove su ogni campione dimostra, a meno di alcuni casi, una buona riproducibilità del test. Dai grafici risulta chiaro che la maggiore incertezza nei risultati si ottiene ad una distanza di 45 cm, probabilmente a causa del fatto che essa è una distanza alla quale inizia a cambiare la forma della curva di pressione del getto di aria. Come ci si aspettava al variare della distanza dal getto la quantità di campione disperso/residuo diminuisce in maniera quasi lineare.

Dai grafici viene anche evidenziato come a seconda della fibrosità del campione le rette tendano ad assumere un'inclinazione quasi orizzontale, infatti ad esempio per il campione 164/15 l'influenza della distanza risulta essere molto contenuta avendo che alle due distanze limite (30 e 45 cm) la differenza di campione residuo è solo di 0,38 g.

Invece per campioni che anche solo all'occhio nudo presentano una maggiore polverosità l'influenza della distanza risulta essere molto forte, ad esempio il campione 297/17 mostra una tendenza alla dispersione molto rimarcata avendo una differenza di residuo alle due distanze estreme di 1,61 g.

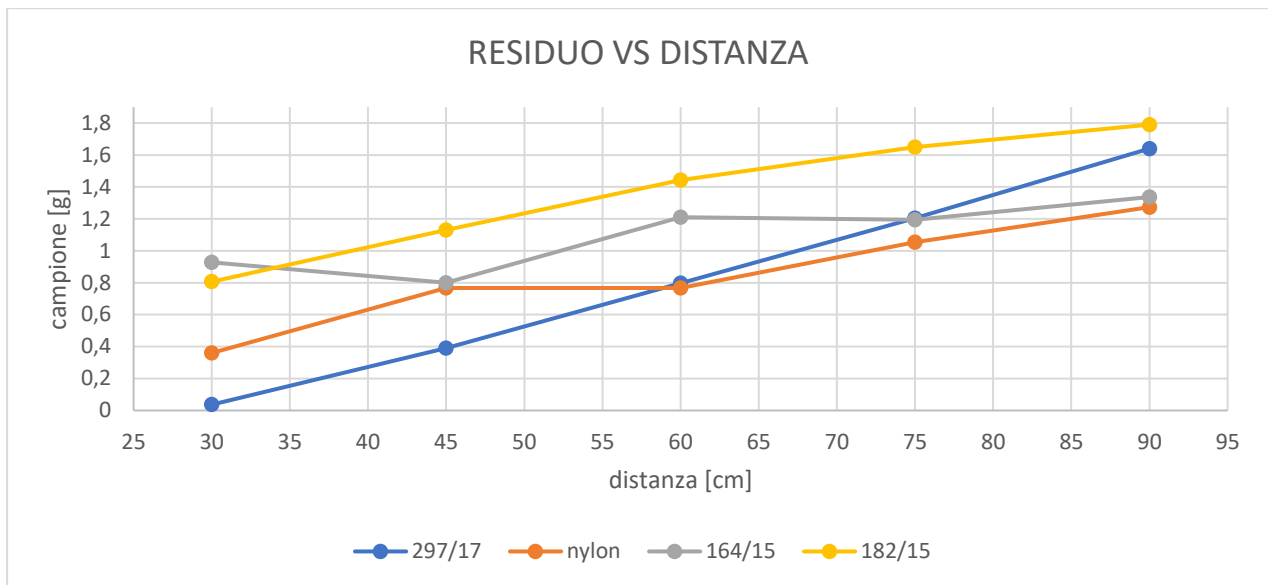


Figura 7.9 Confronto dei residui dei campioni in funzione della distanza

Nel grafico 7.9 sono messi a paragone i residui di campione dopo la dispersione alle varie distanze, anche qui risulta chiaro che i campioni più assimilabili a polveri come il nylon e il 297/17 abbiano una maggiore tendenza ad essere dispersi in nube collocandosi nella parte bassa del grafico. Cosa che conferma i loro indici di polverosità abbastanza alti 8 per il 297/17 e 9 per il nylon.

Allo stesso modo il 182/15 posizionandosi nella parte alta del grafico rivela una bassa tendenza alla dispersione, in tendenza opposta rispetto al suo indice di polverosità che da una scala da 3 a 9 ha riportato un punteggio di 8.

Altro comportamento anomalo è stato sottolineato nel campione 164/15 che a distanze contenute dal getto presenta una bassa disperdibilità, mentre dai 75 cm in poi presenta una tendenza a formare una nube caratterizzata da flussi in massa simili a quella ottenuta dalla dispersione del nylon. È comunque da sottolineare che il suo indice di polverosità (7) prevede abbastanza bene questo tipo di comportamento.

Al fine di confrontare i dati ottenuti con i modelli matematici presenti si è cercato di valutare il flusso in massa generato dal test di disperdibilità e da esso ricavare il campo di velocità all'interno della camera in funzione della distanza dal getto d'aria con la relazione seguente 7.1 [26]:

$$\Phi = 0,004 h^{0,216} U^{1,743} D^{-0,054} \rho_p^{-0,159} A_p^{0,957} \quad (7.1)$$

Dove si è trascurato la costante A e si è utilizzato il diametro medio delle particelle.

Allo stesso modo per la valutazione del flusso in massa si è diviso la quantità di materiale disperso per l'area del portacampione e per una costante di tempo caratteristica ricavata dalle indagini fotografiche effettuate su ogni prova. È stata determinata una costante per ogni distanza indagata, osservando le registrazioni rallentate della dispersione e misurando ad occhio nudo il tempo caratteristico del fenomeno, ovvero in quanto tempo avveniva il completo sollevamento delle particelle.

Sono stati ricavati così i flussi in massa caratteristici per ogni campione in funzione della distanza dal getto d'aria riportati nei grafici e nelle tabelle seguenti:

Tabella 7.2 flussi in massa in funzione della distanza

<i>CAMPIONI</i>	nylon	182/15	164/15	297/17
<i>distanza [cm]</i>	[Kg/m ² s]	[Kg/m ² s]	[Kg/m ² s]	[Kg/m ² s]
30	0,25	0,23	0,16	0,37
45	0,20	0,15	0,17	0,29
60	0,19	0,10	0,09	0,21
75	0,14	0,05	0,07	0,13
90	0,09	0,02	0,023	0,05

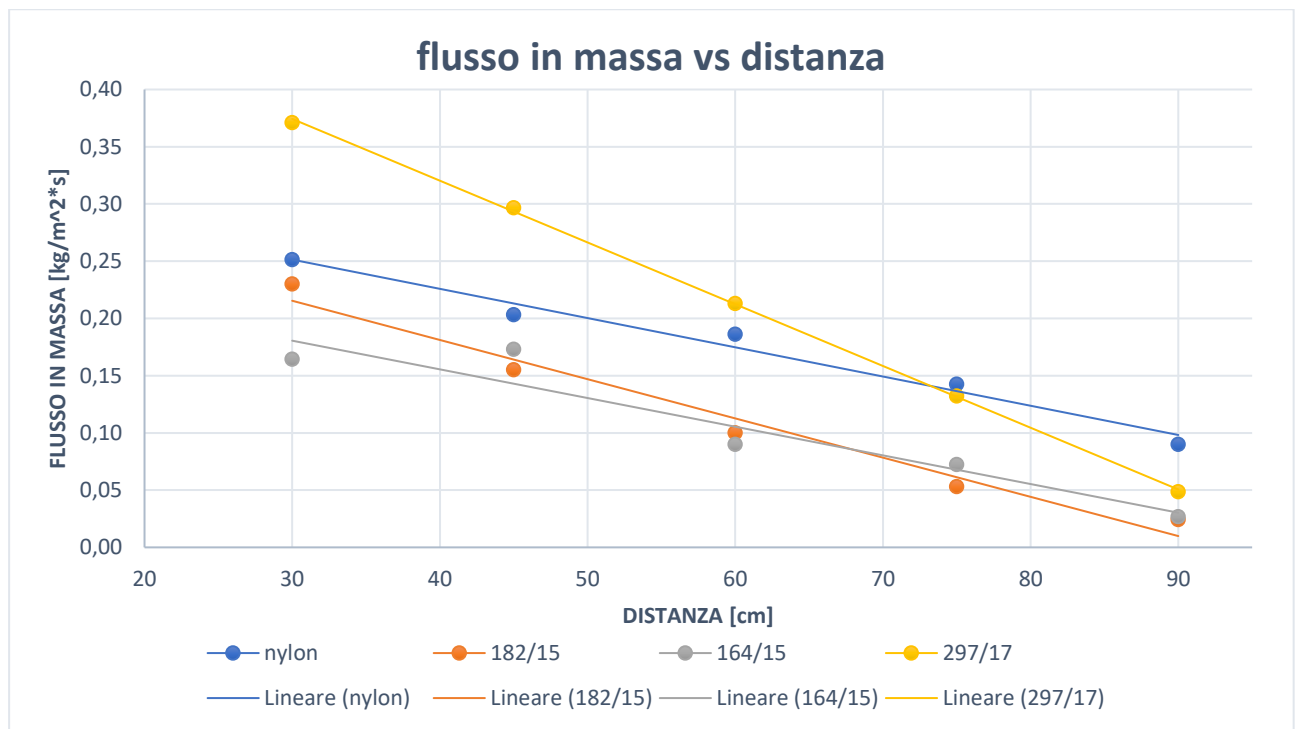


Figura 7.10 flussi in massa in funzione della distanza

Anche in questo caso risulta chiaro come il flusso decresca in maniera lineare in funzione della distanza per tutti i campioni, ma ci sia sempre una dipendenza dalla polverosità degli stessi, infatti l'ordine di disperdibilità risulta rimanere il medesimo anche per questo tipo di misura.

Per riuscire ad utilizzare la relazione (7.1) a meno della velocità del getto serve ricavare l'altezza dello strato prima della dispersione, la quale è stata ricavata in funzione della densità di bulk, dell'area del portacampione e della quantità di materiale netto dopo la deposizione in strato:

$$h = m / (\rho \times S) \tag{7.2}$$

Una volta ricavate le altezze dello strato utilizzando la formula inversa si è riuscito a ricavare il campo di velocità all'interno della camera in funzione della distanza:

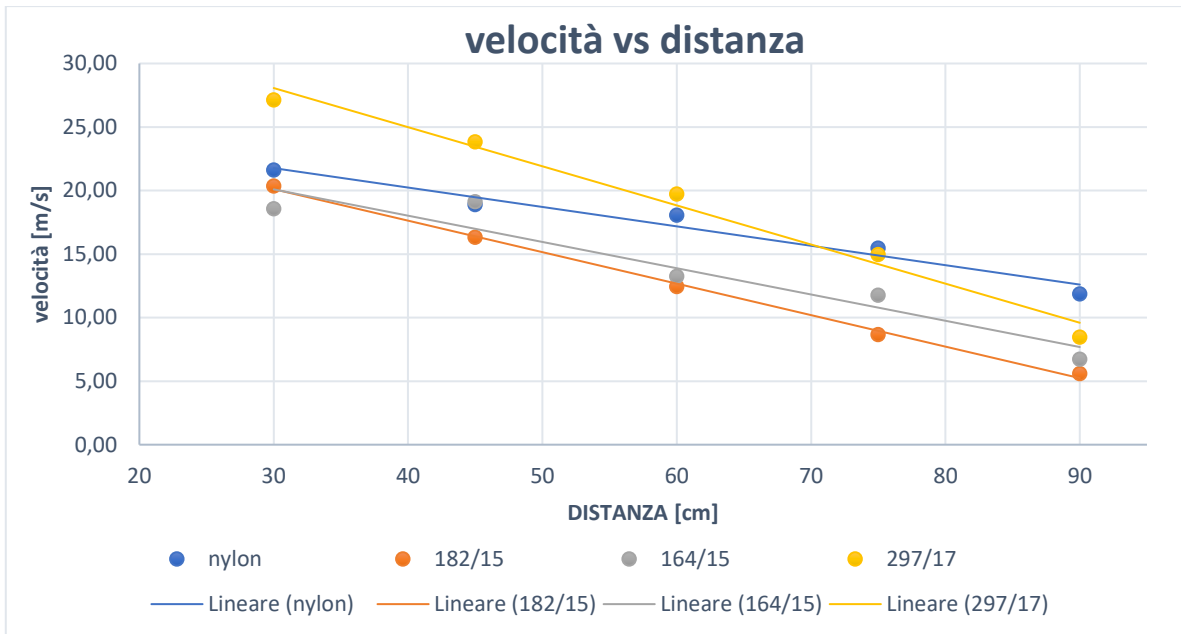


Figura 7.11 profili di velocità calcolati per ogni campione

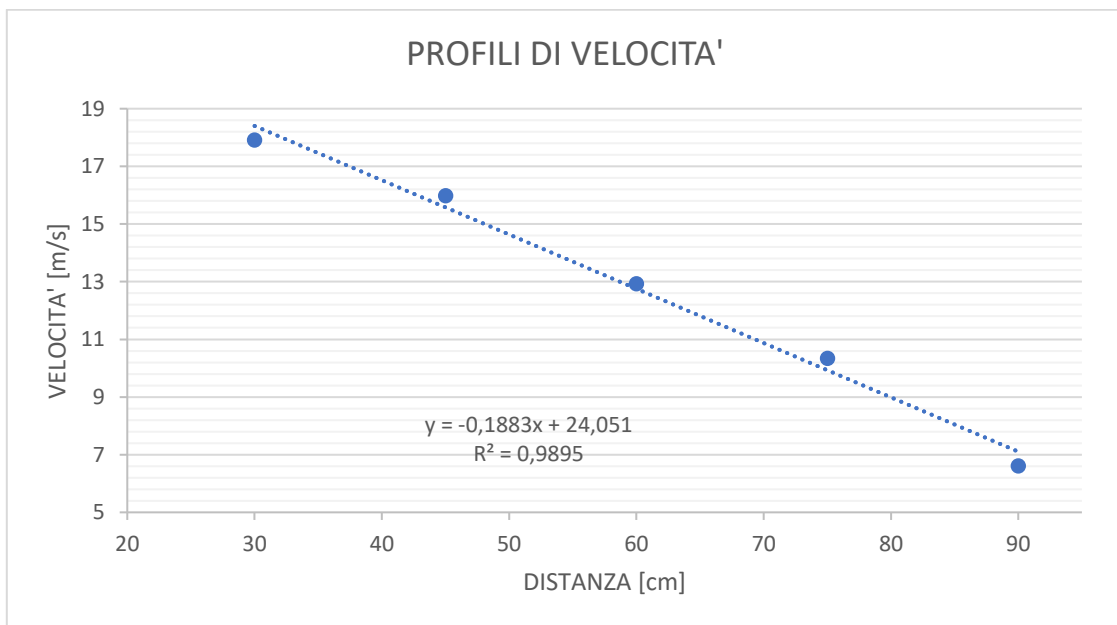


Figura 7.12 profilo di velocità complessivo calcolato

Il grafico 7.12 mostra il profilo di velocità effettivo calcolato in funzione della distanza, computato come media dal grafico 7.11, l'andamento risulta anche in questo caso lineare in funzione della distanza.

Al fine di capire se i risultati ricavati sia sperimentalmente, sia dalla formula 7.1 possano essere ritenuti affidabili si è deciso di usare anche le correlazioni proposte da Ural [27] per calcolare le velocità di soglia e i flussi in massa.

$$U_t = 0,46 \rho_p^{1/3} \quad (7.3)$$

$$\Phi = (0,002)\rho U(U^{0,5} - \frac{U_t^2}{U^{1,5}}) \quad (7.4)$$

Le velocità di soglia sono state calcolate sostituendo alla densità della particella quella di bulk e sono le seguenti:

Tabella 7.3 velocità di soglia campioni

<i>CAMPIONE</i>	<i>velocità di soglia [m/s]</i>
164/15	2,49
297/17	2,23
182/15	2,19
NYLON	1,89

Dati i flussi in massa calcolati precedentemente sono state ricavate le velocità dalla formula inversa della 7.4 e sono state comparate con le velocità ricavate dalla formula 7.1.

i risultati sono riportati in Tabella 7.4.:

Tabella 7.4 Confronto velocità campione di nylon

	distanza [cm]	flusso in massa [Kg/m²s]	velocità [m/s] FORMULA 7.4	velocità [m/s] FORMULA 7.1
nylon	30	0,38	28,22	27,29
	45	0,27	22,47	22,03
	60	0,22	19,63	19,61
	75	0,14	15,15	15,47
	90	0,08	10,78	11,25

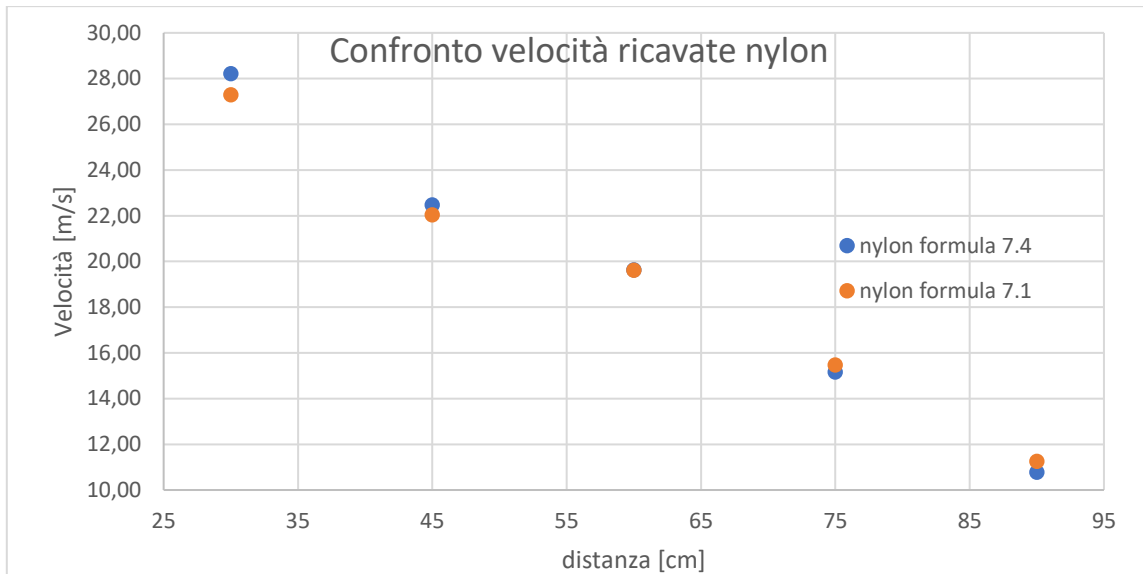


Figura 7.13 Confronto velocità campione di nylon

Tabella 7.5 Confronto velocità campione 182/15

	distanza [cm]	flusso in massa [Kg/m ² s]	velocità [m/s] FORMULA 7.4	velocità [m/s] FORMULA 7.1
182/15	30	0,35	26,82	25,70
	45	0,20	19,09	19,02
	60	0,12	13,50	13,51
	75	0,05	8,66	8,68
	90	0,02	5,64	5,29

Graficando i risultati si ottiene:

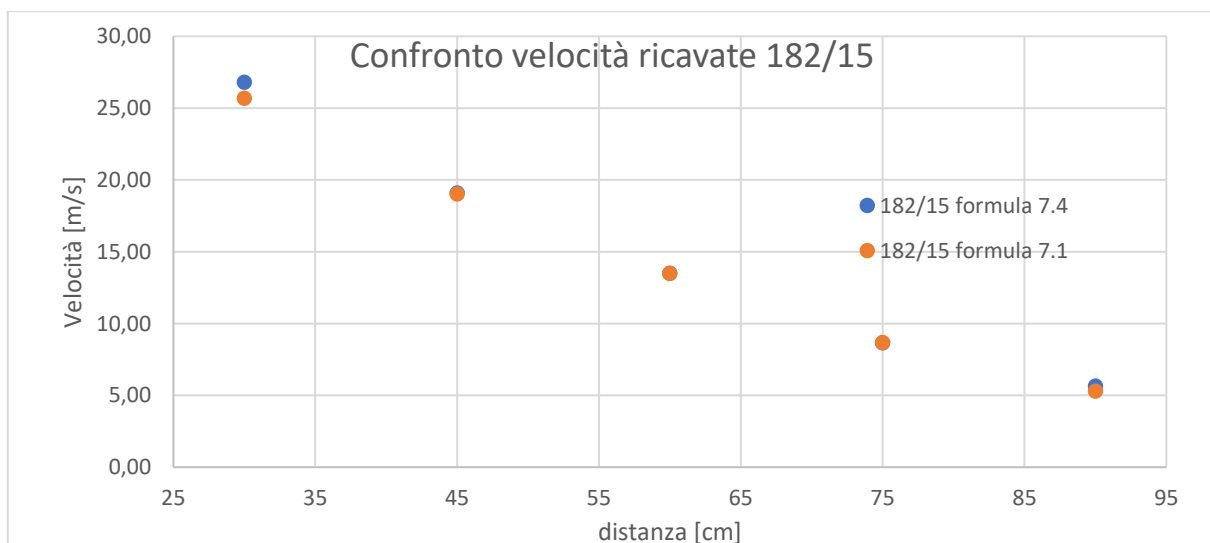


Figura 7.14 Confronto velocità campione 182/15

Tabella 7.6 Confronto velocità campione 164/15

164/15	distanza [cm]	flusso in massa [Kg/m ² s]	velocità [m/s] FORMULA 7.4	velocità [m/s] FORMULA 7.1
	30	0,25	21,82	23,45
	45	0,23	20,64	22,27
	60	0,10	12,94	14,40
	75	0,07	10,55	11,77
	90	0,02	6,27	6,38

Da cui si ottiene in seguente grafico:

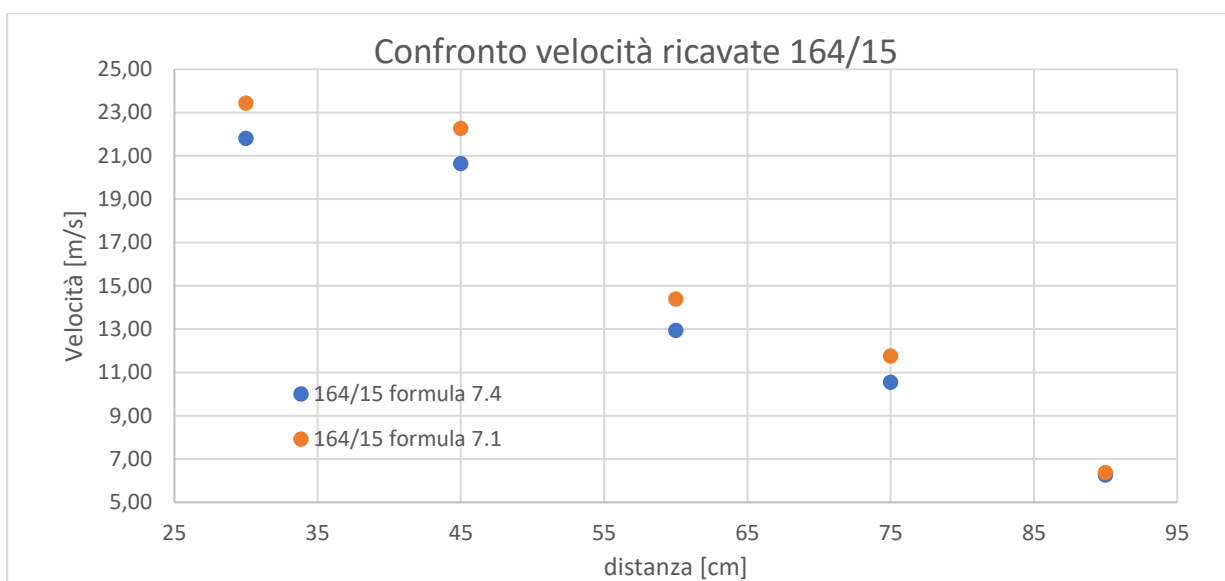


Figura 7.15 Confronto velocità campione 164/15

Tabella 7.7 Confronto velocità campione 297/17

297/17	distanza [cm]	flusso in massa [Kg/m ² s]	velocità [m/s] FORMULA 7.4	velocità [m/s] FORMULA 7.4
	30	0,56	36,55	34,26
	45	0,39	28,88	27,78
	60	0,25	21,61	21,44
	75	0,13	14,69	14,98
	90	0,04	7,89	8,02

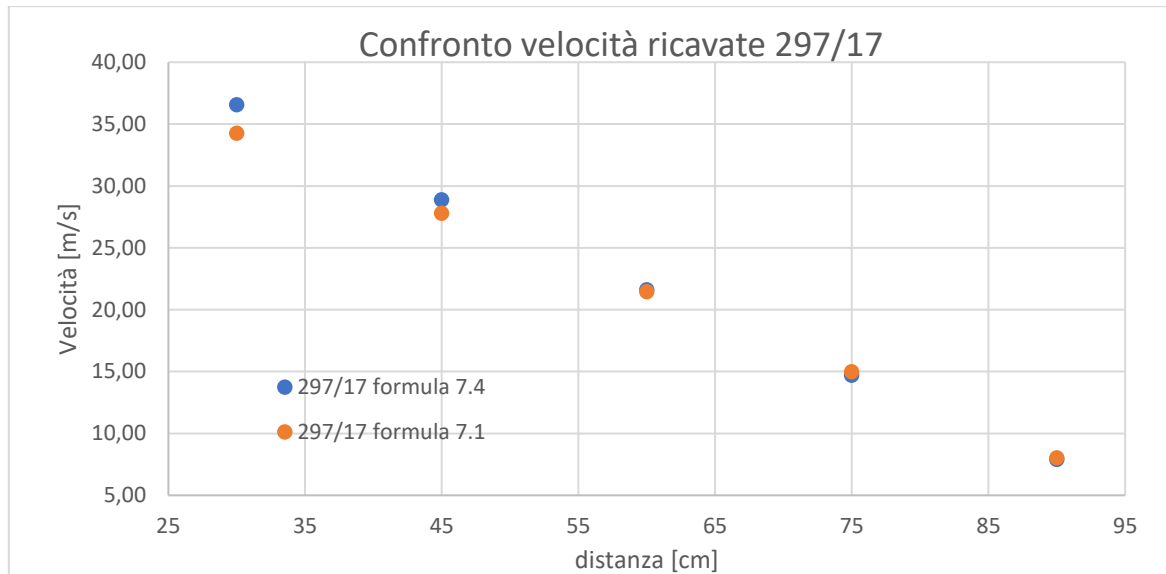


Figura 7.16 Confronto velocità campione 297/17

Come si può notare dai grafici entrambe le formule restituiscono risultati molto simili nonostante siano significativamente diverse, confermando una medesima dipendenza della velocità rispetto ai flussi in massa.

Quindi al fine di verificare come i flussi in massa siano predetti dalla formula 7.4 si sono inserite le velocità calcolate tramite la formula 7.1 nella 7.4 e si sono calcolati i rapporti per due campioni diversi alla medesima distanza. La medesima procedura è stata adottata per i flussi in massa sperimentali,

Un valore maggiore di uno del rapporto di questi ultimi indicherà che a quella distanza il campione a numeratore avrà una tendenza maggiore ad essere disperso viceversa se verrà minore di uno ne avrà una minore.

Allo stesso modo i rapporti delle formule analitiche, confrontati con i rapporti ottenuti sperimentalmente potranno dare una indicazione sull'efficacia o meno dei modelli a descrivere il risultato ottenuto in laboratorio (a seconda della posizione rispetto alla bisettrice del grafico di Figura 7.17).

Le formule 7.5 e 7.6 indicano i rapporti calcolati:

$$\Phi_1/\Phi_i \quad i=2,3,4 \quad (7.5)$$

$$\frac{U_1^{1,5} - U_{t1}^2}{U_i^{1,5} - U_{ti}^2} \quad i=2,3,4 \quad (7.6)$$

Dove U_t sono le velocità di soglia, i rapporti calcolati sono riportati nelle seguenti tabelle:

Tabella 7.8 Rapporti effettuati con la formula 7.6

DISTANZA [CM]	$\frac{nylon}{182/15}$	$\frac{nylon}{164/15}$	$\frac{nylon}{297/17}$
30	1,11	1,29	0,71
45	1,28	1,01	0,71
60	1,86	1,72	0,88
75	2,76	1,68	1,08
90	4,64	3,44	1,93

Tabella 7.8 Rapporti effettuati con la formula 7.5

DISTANZA [CM]	$\frac{nylon}{182/15}$	$\frac{nylon}{164/15}$	$\frac{nylon}{297/17}$
30	1,09	1,53	0,68
45	1,31	1,17	0,69
60	1,86	2,07	0,87
75	2,68	1,97	1,08
90	3,70	3,34	1,85

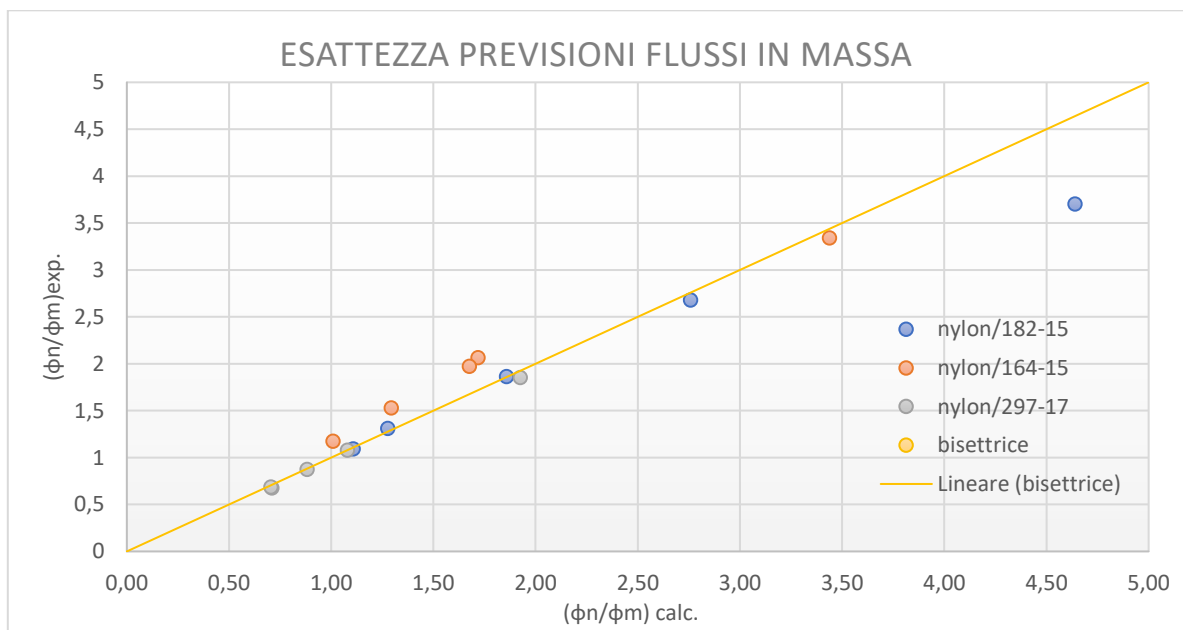


Figura 7.17 Confronto tra i dati sperimentali e le previsioni delle formule

Dal grafico risulta subito chiaro che, a meno di alcuni scostamenti probabilmente dovuti al fatto che queste relazioni non sono state pensate per le polveri non tradizionali, esse approssimano bene i dati sperimentali.

Infatti la maggior parte dei punti va a posizionarsi sulla bisettrice, indice del fatto che i rapporti sperimentali sono simili ai rapporti calcolati con le formule. Allo stesso modo il grafico ci mostra come, a meno del campione 297/17, il nylon abbia una tendenza alla dispersione maggiore rispetto agli altri due campioni. Questo comportamento era stato ipotizzato ed è stato confermato sia dagli esperimenti che dalle formule. Dal grafico risulta anche come i rapporti che più si discostano da posizionarsi sulla bisettrice sono quelli effettuati con il campione 164/15, ovvero con il materiale più fibroso tra tutti quelli testati. In aggiunta spostandosi a distanze più elevate dal getto i dati non vanno più a posizionarsi sulla diagonale, il che potrebbe essere dovuto alla perdita d'intensità dell'onda di pressione con la distanza e quindi al fatto che non possa più essere approssimata in modo adeguato con una forma impulsiva.

I rapporti sono in linea con gli indici di polverosità calcolati per i campioni, ulteriore conferma che i dati qualitativi precedentemente acquisiti possono fornire una prima approssimazione dei dati quantitativi ottenuti tramite l'applicazione della camera di dispersione.

8. CONCLUSIONI

Il lavoro svolto ha permesso di studiare e caratterizzare il comportamento di strati di polveri non tradizionali a seguito di un impulso aeraulico. La pericolosità derivante dalla dispersione di questo tipo di polveri è tuttora sottovalutata a causa della poca letteratura disponibile e della convinzione che questi materiali, come ad esempio la lana, siano dei soppressori di fiamma in tutte le loro forme e dimensioni.

Ad oggi non vi sono test standardizzati in grado di valutare la tendenza alla dispersione delle polveri non tradizionali, perché a causa della loro morfologia causerebbero l'intasamento delle valvole e degli ugelli di dispersione.

L'oggetto principale dell'indagine di questa Tesi, quindi, è consistito nello sviluppo di una camera di dispersione che ha permesso di fornire dati aggiuntivi per la caratterizzazione del comportamento di questo tipo di materiali, infatti oltre ai test di disperdibilità, sono state effettuate prove preliminari che hanno consentito la stima della densità di bulk, dell'angolo di riposo e degli indici di polverosità dei campioni analizzati.

La caratterizzazione preliminare dei campioni ha permesso di indagare proprietà fondamentali per una dispersione in strato. Infatti la misura dell'angolo di riposo dà un'idea della coesività e del grado di scorrimento di un campione, invece tramite la densità di bulk si ha una misura di come il materiale si deposita e del grado di vuoto presente tra le particelle. Infine con gli indici di polverosità si ricava la tendenza dei campioni alla dispersione.

I risultati delle prove preliminari sono che i campioni più fibrosi, come il 164/15 e il 182/15 hanno riportato le densità di bulk più alte nel range di 110-160 [Kg/m³] a causa del loro grado elevato di impaccamento. Il nylon invece ha riportato una densità di circa 70 [Kg/m³]. Un comportamento anomalo invece si è osservato per il 297/17 con una densità di 114 [Kg/m³]: il campione ad occhio nudo è molto simile ad una polvere tradizionale, ma da analisi al SEM si è osservato una struttura compatta, dovuta all'aggrovigliamento esteso delle fibre che lo compongono ed alte forze di coesione.

La principale criticità nella misura della densità con il volume di Scott è stata che a causa delle elevate forze di coesione presenti nei campioni fibrosi, unite alla morfologia di questi campioni si verifica l'intasamento del volume e la mancata uscita del campione da quest'ultimo. Aspetto riscontrato soprattutto con il campione 297/17 per il quale è stato necessario un numero elevato di prove per avere un risultato attendibile.

La valutazione degli angoli di riposo ha permesso di osservare un andamento analogo, con una progressiva diminuzione del valore dell'angolo, mano a mano che si testavano campioni più "tradizionali" (meno fibrosi). Infatti il 164/15 ha fatto registrare la misura di angolo più elevato con 69° e il nylon la più bassa con 48° confermando che i campioni più fibrosi avendo forze di coesione più elevate tendono a formare cumuli più alti. Le forze sono da attribuirsi oltre che ai diametri medi delle fibre anche alla loro lunghezza che offre una superficie di contatto più ampia.

In questo caso l'incertezza sull'affidabilità dei risultati è legata alla difficoltà di misura dell'altezza del cumulo, in quanto ogni minimo spostamento potrebbe causare il crollo di quest'ultimo.

Come già descritto gli indici di polverosità danno un'idea quantitativa del fenomeno di dispersione, ma anch'essi se pur in parte minore hanno confermato che i campioni 164/15 e 182/15 hanno una tendenza minore a formare una nube.

Passando infine ai test di dispersione nella camera, essi si sono dimostrati coerenti con le misure di caratterizzazione preliminare (e con il test di misura del DI) e riproducibili, indicando come all'aumentare di densità di bulk e angolo di riposo la tendenza di un campione alla dispersione diminuisca drasticamente.

La deposizione in strato eseguita secondo la procedura descritta al paragrafo 5.1 ha permesso una elevata riproducibilità dei test e della geometria degli strati da disperdere. Un ragionamento a parte va fatto per il 297/17 che nonostante i valori elevati di densità ed angolo risulta il campione più incline alla dispersione. Probabilmente il diametro medio delle fibre ridotto (circa 16,8 micron), unico campione con un diametro più piccolo è il nylon con 14,9 micron, insieme ad una lunghezza delle fibre non molto elevata ha permesso a questo materiale di avere un grado di dispersione molto elevato. Oppure un'altra ipotesi è legata alla figura 8.1 infatti da analisi al SEM si è osservato come queste fibre presentino un grado di vuoto elevato al loro interno, morfologia che in qualche modo potrebbe aver influenzato in maniera significativa la dispersione.

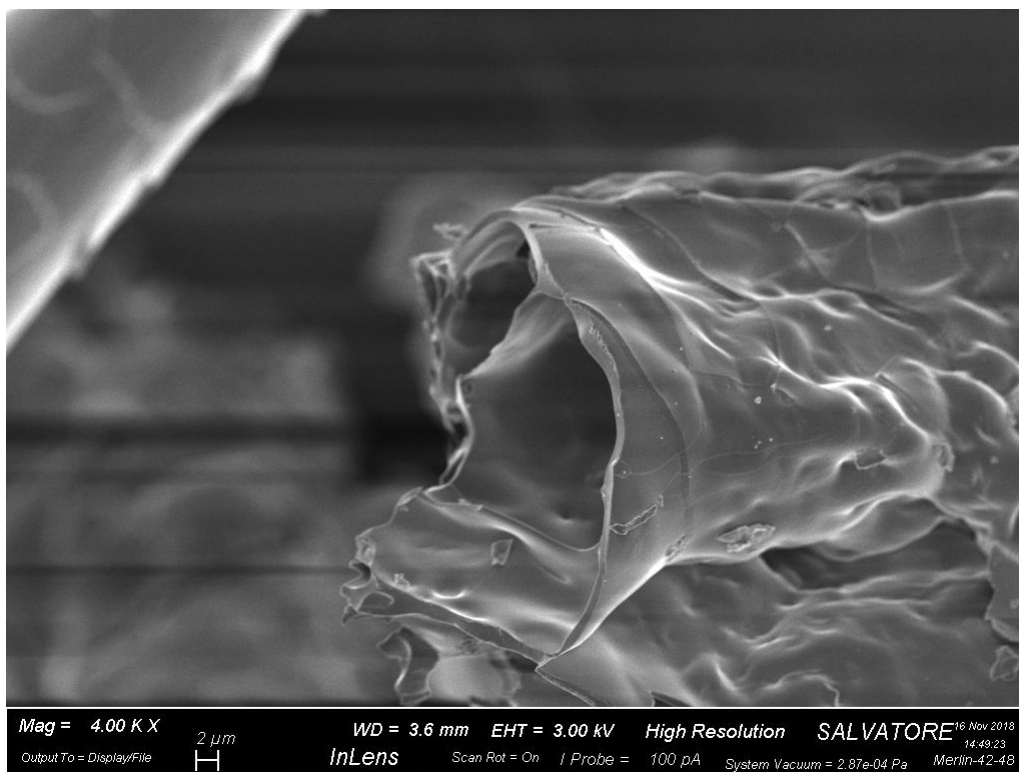


Figura 8.1 campione 297/17 SEM

Le principali criticità riscontrate nei test sono state: la perdita di materiale durante la deposizione in strato che non ha permesso di aver in camera sempre una quantità di campione costante da testare e una non perfetta assialità del getto d'aria rispetto alla camera che potrebbe aver influenzato le misure.

Passando ai flussi in massa, un certo grado di incertezza è stato introdotto stimando il tempo caratteristico del fenomeno di sollevamento, infatti la videocamera utilizzata ha un campo di

acquisizione dei frame di 30 [frame/s] numero abbastanza modesto per l'osservazione del fenomeno, oltre al non avere dati sul campo di velocità dell'aria all'interno della camera.

Nonostante ciò le correlazioni utilizzate sono state in grado di prevedere con una buona affidabilità i flussi a distanze contenute dal getto. Va notato infatti che i risultati a 90 cm per alcuni campioni non sono stati del tutto previsti, probabilmente per il fatto che a tale distanza il getto non era più descrivibile come un impulso.

Concludendo la sperimentazione ha confermato come campioni già all'apparenza più fibrosi abbiano una tendenza minore al sollevamento, in termini di flusso massico di campione asportato dal portacampione causato dal getto d'aria durante le prove in camera.

Dato il numero esiguo di campioni testati non si è riusciti a ricavare un fattore correttivo per le correlazioni utilizzate che tenesse in conto la lunghezza e la diversa morfologia dei campioni utilizzati.

Sviluppi futuri prevedono, oltre alla determinazione di un fattore correttivo e ad un metodo efficace per valutare la lunghezza delle fibre, la possibilità di introdurre nella camera sensori a infrarossi per misurare la concentrazione della nube e sensori atti a misurare la velocità del getto d'aria. Vi è anche la possibilità di inserire degli inneschi per valutare la tendenza all'esplosione dei campioni dispersi, oltre allo sviluppo di un modello fluidodinamico per le simulazioni in collaborazione con l'Università Federico secondo di Napoli.

9. RINGRAZIAMENTI

Vorrei ringraziare innanzitutto la mia famiglia per avermi supportato e sopportato in questi anni di studio e non avermi mai fatto mancare il loro appoggio sia morale che economico.

Un grazie speciale va a Marialinda che, giorno dopo giorno, è riuscita a spronarmi e capire i miei alti e bassi consapevole che senza di lei non avrei mai raggiunto questo traguardo fondamentale, un grazie speciale va anche alla sua famiglia.

Grazie a Davide compagno di studio e amico, con cui ho condiviso infinite giornate in biblioteca e momenti indimenticabili sia nel bene che nel male. Grazie a Simone che è la dimostrazione che un'amicizia può essere importante anche se nata da poco.

Infine vorrei ringraziare tutti i miei amici con i quali ho condiviso momenti importanti e che hanno condiviso con me questi anni in un modo o nell'altro.

10. BIBLIOGRAFIA

- [1] Eckhoff R. K., *Dust Explosions in the Process Industries*, Gulf Professional, Publishing, 1997
- [2] Glor, M. (June 2001a) “Review of recent results, trends and regulations affecting the assessment of electrostatic ignition hazards in industry.” *Proceedings of the 10th International Symposium on Loss Prevention and Safety Promotion in the Process Industry*, Stockholm, Sweden, eds. H. J. Pasman, O. Fredholm, and A. Jacobsson. Amsterdam: Elsevier, pp. 799-808.
- [3] Glor, M. (1985) “Hazards due to Electrostatic Charging of Powders.” *Journal of Electrostatics* 16pp. 175-191.
- [4] Glor, M. (1988) *Electrostatic Hazards in Powder Handling*. Letchworth, Hertfordshire, UK: Research Studies Press Ltd.; New York: John Wiley and Sons
- [5] Krause, U., & Schmidt, M. (2000). “Propagation of smouldering in dust deposits caused by glowing nests or embedded hot bodies” *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 13(3–5), pp 319–326.
- [6] UNI CEI EN ISO/IEC 800-79-34:2012 “Atmosfere esplosive- Parte 34: Applicazione dei sistemi di gestione per la qualità e la fabbricazione degli apparecchi”
- [7] Marmo, L., Sanchirico, R., Di Benedetto, A., Di Sarli, V., Riccio, D., & Danzi, E. (2018). Study of the explosible properties of textile dusts. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 54. <https://doi.org/10.1016/j.jlp.2018.03.003>
- [8] REGOLAMENTO (UE) N. 1007/2011 DEL PARLAMENTO EUROPEO E DEL CONSIGLIO del 27 settembre 2011
- [9] Marmo L., D Cavallero (2008) Minimum ignition energy of nylon fibres *Journal of Loss Prevention in the Process Industries* 21 (5), 512-517 21
- [10] Febo H.L., (2009) Combustible Dust Hazard Recognition – an Insurer’s View *Fire Protection Research Foundation Seminar on Dust Hazards*
- [11] Amyotte, P, Khan, F, Boilard, S., Iarossi, I., Cloney, C., Dastidar, A., Eckhoff, R., Marmo, L., Ripley, R. (2012), Explosibility of nontraditional dusts: Experimental and modeling challenges, 23rd Institution of Chemical Engineers Symposium on Hazards, HAZARDS 2012, (158) pp. 83-90
- [12] Iarossi I., PR Amyotte, FI Khan, L Marmo, AG Dastidar, RK Eckhoff (2013) Explosibility of polyamide and polyester fibers *Journal of Loss Prevention in the Process Industries* 26 (6), 1627-1633 9
- [13] Abbasi, T., Abbasi, S. A. (2007) Review: Dust explosions – Cases, causes, consequences, and control. *J. Hazard. Mater.*, 140, 7. U.S. Chemical Safety and Hazard Investigation Board, Investigation report no. 2006-h-1, Combustible dust hazard study, november 2006.
- [14] Yuan Z., Nima Khakzada, Faisal Khan, Paul Amyotte, (2015) Dust explosions: A threat to the process industries, *Process Safety and Environmental Protection* 98 (2015) 57–71.
- [15] Frank, W.L., (2004), Dust explosion prevention and the critical importance of housekeeping, *Process Safety Progress* 175-184
- [16] Piccinini, N. (2008). Dust explosion in a wool factory: Origin, dynamics and consequences. *Fire Safety Journal*, 43(3), 189–204. <http://doi.org/10.1016/j.firesaf.2007.06.008>

- [17] Salatino, P., Di Benedetto, A., Chirone, R., Salzano, E., & Sanchirico, R. (2012). Analysis of an Explosion in a Wool-Processing Plant. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 51(22), 7713–7718. <http://doi.org/10.1021/ie2023614>
- [18] NFPA 652 (2016). *Standard on the fundamentals of combustible dust*. National Fire Protection Association, Batterymarch Park, Quincy, MA
- [19] Taveau J., (2012) Secondary Dust Explosions: How to Prevent them or Mitigate their Effects, *Process Safety Progress* (Vol.31, No.1).
- [20] Marmo, L. (2010). Case study of a nylon fiber explosion: An example of explosion risk in a textile plant. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 23(1), 106–111.
- [21] Yoshida, T., Kousaka, Y. and Okuyarna, K. (1979), *Aerosol Science for Engineers*, Power Co. Ltd., Tokyo.
- [22] Clift, R. (1978), *Bubbles, Drops, and Particles*, Academic Press, New York
- [23] Herdan, G. (1960) *Small Particle Statistics*. London: Butterworths.
- [24] Rubinow, S.I. and Keller, J.B. (1961), “The Transverse Force on a Spinning Sphere Moving in a Viscous Fluid,” *J. Fluid Mech.*, v. 11, pp. 447-459.
- [25] Saffman, P.G. (1965), “The Lift on a Small Sphere in a Slow Shear Flow,” originally published in *J. Fluid Mech.*, v. 22, Part 2, pp. 385-400, and amended in v. 31, p. 624.
- [26] Okamoto, S. (1979), “Turbulent Shear Flow Behind Sphere Placed on Plane Boundary,” *Proc. 2nd Symp. on Turbulent Shear Flows*, London, pp. 16.1-16.6
- [27] Yaping Shao, Yan Yang (2005), “A scheme for drag partition over rough surfaces,” *Atmospheric Environment*, 39, pp. 7351–7361
- [28] Ural (2011), “Towards Estimating Entrainment Fraction For Dust Layers” *Loss prevention science and technologies Inc (LPSTI)*.
- [29] Bagnold, R A. (1941), *The Physics of Blown Sands and Desert Dunes*, Methuen and Co., London.
- [30] Corn, M. and Stein, F. (1965), “Re-entrainment of Particles from a Plane Surface,” *American Industrial Hygiene Association Journal*, July-August, pp. 325-336.
- [31] Singer, J.M., Greninger, N.B. and Grumer, J. (1969), “Some Aspects of the Aerodynamics of Formation of Float Coal Dust Clouds,” *U.S. Bureau of Mines*, RI 7252
- [32] Bagnold, R. A. (1960) “The Re-Entrainment of Settled Dusts.” *International Journal of Air Pollution* 2, pp. 357-363.
- [33] Gutterman, A. M., and W. E. Ranz. (1959, July) “Dust Properties and Dust Collection.” *Journal of the Sanitary Engineering Division, Proceedings of the American Society of Civil Engineers* SA4, pp. 2549.
- [34] Zimon, A. D. (1982), *Adhesion of Dust and Powder*, Second Edition, Consultants Bureau, New York.
- [35] Ural, E.A. (1989), “Dispersibility of Dusts Pertaining to their Explosion Hazard,” *FMRC Technical Report J.I. 0Q2E3.RK*.
- [36] Kalman, Haim, Andrei Satran, Dikla Meir, Evgeny Rabinovich (2005), “Pickup (Critical Velocity Of Particles,” *Powder Technology*, 160, pp. 103-113.
- [37] Hartenbaum, Bruce (1971), “Lofting of Particulates by a High Speed Wind,” *Defense Nuclear Agency Technical Report DNA-2737 ATR-71-25*, September.

- [38] Batt, R. G. and A. A. Peabody (1995), "Dust Sweep-up Experiments," Defense Nuclear Agency Technical Report DNA-TR-94-117, November.
- [39] Zydak, P., R. Klemens (2009), "Experimental Investigation into Coal Dust Lifting Process Behind Shock Wave for Different Dust Layer Thicknesses," 5th ISFEH.
- [40] Catalin G. Ilea, Pawel Kosinski, Alex C. Hoffmann (2009), "The effect of polydispersity on dust lifting behind shock waves" Powder Technology 196, pp 194–201.
- [41] Amira Chowdhury, H. Greg Johnston, Chad V. Mashuga, M. Sam Mannan, Eric L. Petersen (2018), "Effect of particle size and polydispersity on dust entrainment behind a moving shock wave" Experimental Thermal and Fluid Science 9, pp 1–10.
- [42] Shuyue Lai, Ryan W. Houim & Elaine S. Oran (2018), "Effect of Particle Size on Dispersion of Stratified Dust Layers" 12th International Symposium on Hazards, Prevention and Mitigation of Industrial Explosions, Kansas City.
- [43] Kei Shimura, Akiko Matsuo (2018) "Numerical simulation of layered coal-dust explosions behind propagating shock wave" 12th International Symposium on Hazards, Prevention and Mitigation of Industrial Explosions, Kansas City.
- [44] Andreasen, A. (1939), Op. Cit. Fuchs (1964), Ref. 559.
- [45] Carr, R.L., Jr. (1965a), "Evaluating Flow Properties of Solids," Chemical Engineering, Jan. 18, pp. 163-16.
- [46] Alexander Klippel, Marc Scheid, Ulrich Krause (2013), "Investigations into the influence of dustiness on dust explosions" Journal of Loss Prevention in the Process Industries 26, pp 1616-1626.
- [47] Inoka E. Perera, Michael J. Sapko, Marcia L. Harris, Isaac A. Zlochower, Eric S. Weiss (2016) "Design and development of a dust dispersion chamber to quantify the dispersibility of rock dust" Journal of Loss Prevention in the Process Industries 39, pp 7-16.
- [48] ISO 902 (1976) - Aluminium oxide primarily used for the production of aluminum - Measurement of the angle of repose, 1 ed., International Organization for Standardization, Geneva
- [49] G. Lumay, F. Boschini, K. Traina, S. Bontempi, J.-C. Remy, R. Cloots, N. Vandewalle, (2012) "Measuring the flowing properties of powders and grains" Powder Technology 224, pp 19–27
- [50] ASTM B 329 – 98 – Standard Test Method for Apparent Density of Metal Powders and Compound using Scott Volumeter