

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

**Il Rischio di Esplosione da Polveri
nell'Industria Laniera**



Relatore

Prof. Luca Marmo

Correlatore

Dott. Enrico Danzi

Candidato

Dario Gaspare Sammartano

Dicembre 2018

SOMMARIO

1	INTRODUZIONE	1
1.1	Esplosioni da Polveri.....	1
1.2	Casi Studio	4
1.3	Scopo Del Lavoro.....	6
2	MATERIALI.....	7
2.1	Lavorazioni E Processi Dell'industria Laniera.....	9
2.1.1	Pretrattamenti	12
2.1.2	Cardatura e Pettinatura	14
2.1.3	Filatura.....	17
2.1.4	Tessitura	20
2.2	Problematiche Legate Alla Polverosità Nell'ambiente Di Lavoro	22
2.2.1	Sistemi di Abbattimento Polveri	23
3	METODI E STRUMENTI	25
3.1	Caratterizzazione chimico-fisica	25
3.1.1	Umidità.....	25
3.1.2	Setacciature	25
3.1.3	Granulometria.....	27
3.1.4	Stima del diametro con microscopio elettronico	28
3.2	Test di infiammabilità	30
3.2.1	Test in tubo Hartmann.....	30
3.2.2	Test in sfera Siwek per determinare il valore di Kst e Pmax	33
3.3	Test in cieco per la misura della disperdibilità.....	37
3.4	Sviluppo di metodi per la misura della disperdibilità.....	40
4	RISULTATI E DISCUSSIONE DEI RISULTATI.....	43
4.1	Caratterizzazione dei campioni	48
4.2	Risultati dei Test di innesco a temperatura ambiente	51
4.3	Determinazione dei parametri Kst e Pmax	53
4.4	Risultati del test in cieco per la dispersione di polveri fibrose	56
5	CONCLUSIONI.....	63
6	BIBLIOGRAFIA.....	65

1 INTRODUZIONE

1.1 ESPLOSIONI DA POLVERI

Una polvere accumulata in un determinato settore di un'industria può sembrare innocua; In generale, come insegna la storia recente, le polveri possono generare una esplosione, la quale provoca ingenti danni a persone ed apparecchiature circostanti.

La sua pericolosità è legata a vari parametri e fattori: di norma una polvere per poter esplodere deve rispettare il pentagono delle esplosioni di Figura 1.1. Rispetto al triangolo del fuoco per gas e liquidi, si aggiungono altre due variabili: il confinamento del fenomeno e la miscelazione tra combustibile e comburente.

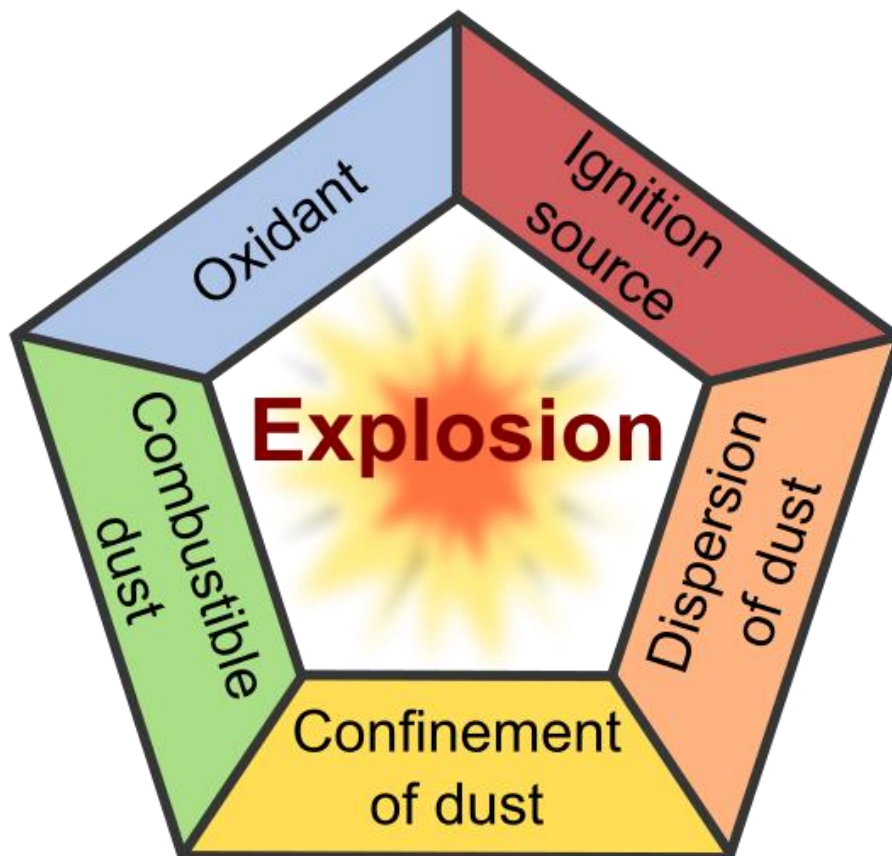


Figura 1.1: Pentagono delle esplosioni di polveri [1]

Per la miscelazione è necessario che la polvere venga dispersa, in genere le esplosioni da polvere sono considerate delle esplosioni secondarie, cioè avvengono a catena come in Figura 1.2, una prima esplosione crea l'onda di pressione necessaria a creare una nube di polvere, la quale in presenza di innesco può o non generare esplosione.

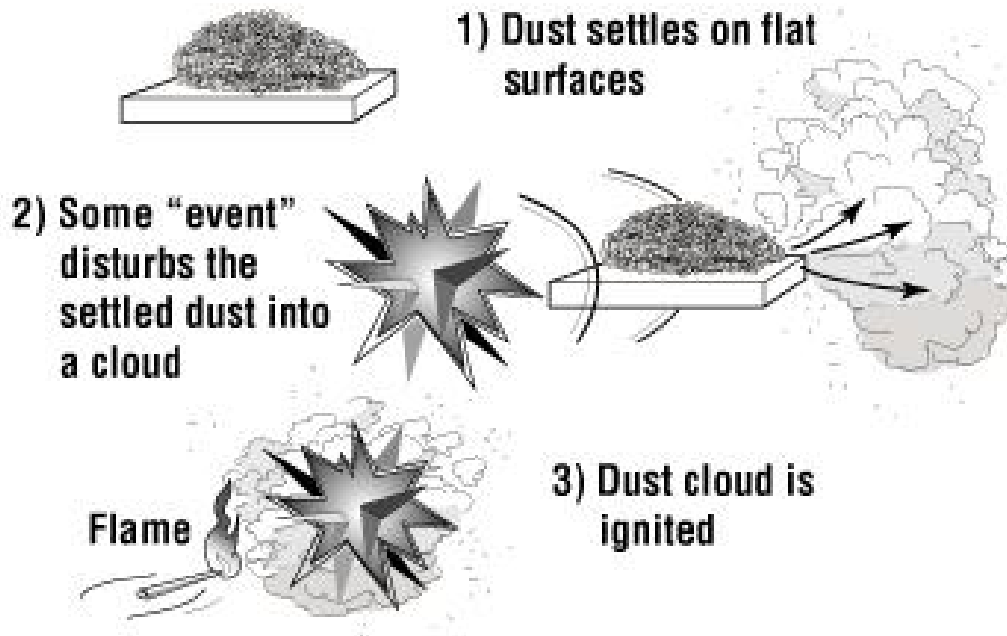


Figura 1.2: Processo di esplosione da polveri [2]

Il calore della prima esplosione può innescare la nube che si crea, per cui è importante individuare dove si formano strati di polvere e analizzare la natura stessa della polvere, prevedere la presenza di possibili inneschi (superfici calde, fili scoperti, ecc.), per poter fare le giuste valutazioni per la sicurezza dell'impianto e delle persone che lavorano sullo stesso.

L'esplosione da polveri è diversa da quella di un normale gas o di un liquido infiammabile, a differenza di questi ultimi la polvere ha necessità di essere dispersa nell'ambiente per favorire la miscelazione tra combustibile(polvere) e comburente(aria), quindi si crea una nube polverosa, tutto ciò per avere più superficie esposta disponibile alla combustione. La superficie è legata alla dimensione caratteristica della polvere, ovvero il diametro se si considerano particelle presunte sferiche; Nel caso di particelle di natura fibrosa, le quali hanno la lunghezza molto maggiore del diametro, lo studio è complicato dalla geometria di queste.

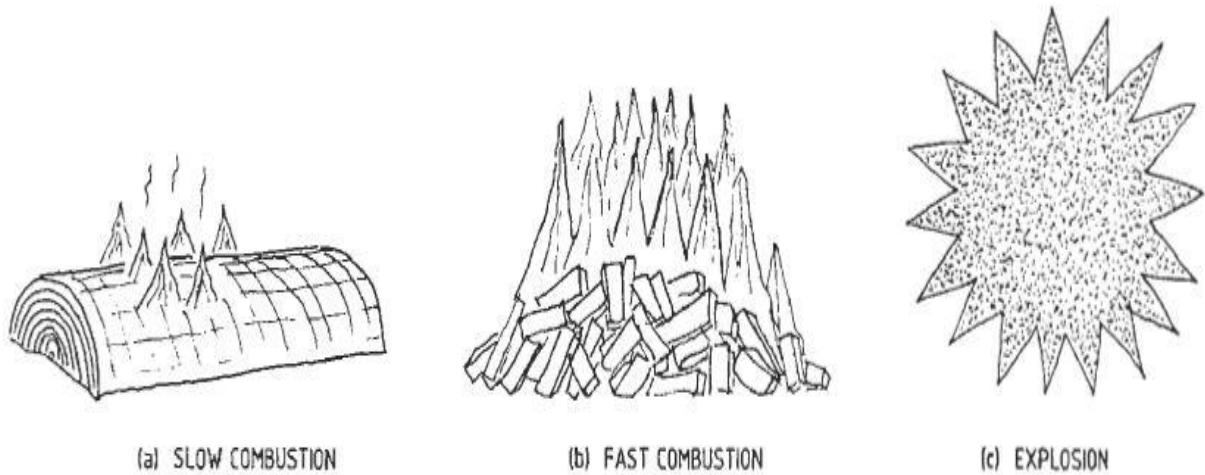


Figura 1.3: Velocità del fronte di fiamma in base alla pezzatura del materiale

Altra peculiarità nel processo di esplosione da polveri consiste nel fatto che il fenomeno inizia spesso dentro l'apparecchiatura (mulini, silos, cicloni, ecc.) per poi estendersi al di fuori di esso creando a volte effetti domino.

1.2 CASI STUDIO

Le fibre, a differenza delle particelle sferiche, hanno una maggior capacità di creare aggregati e una minor tendenza a disperdersi, per cui potrebbero essere ritenute meno pericolose, ma i vari incidenti avvenuti a causa di queste polveri, principalmente nell'industria tessile, hanno di fatto aperto nuovi scenari per lo studio della sicurezza dei processi in cui queste polveri sono prodotte.

Alcuni dei principali incidenti dell'industria tessile a causa delle polveri:

- Harbin (1987), Cina, esplosione di una fabbrica di lino: 58 i morti e 177 i feriti. Durante la notte ci sono state nove esplosioni, una dietro l'altra, con una durata di 8 secondi tra la prima e l'ultima, ciò ha danneggiato 14000 m² di fabbrica. Secondo Xu et al. [3] l'origine della catastrofe è avvenuta in uno dei nove collettori per la raccolta polveri, poi l'evento si è propagato nella zona della carderia, dove, a causa di strati di polvere accumulate e grazie all'onda di pressione, si sono generate delle esplosioni secondarie.

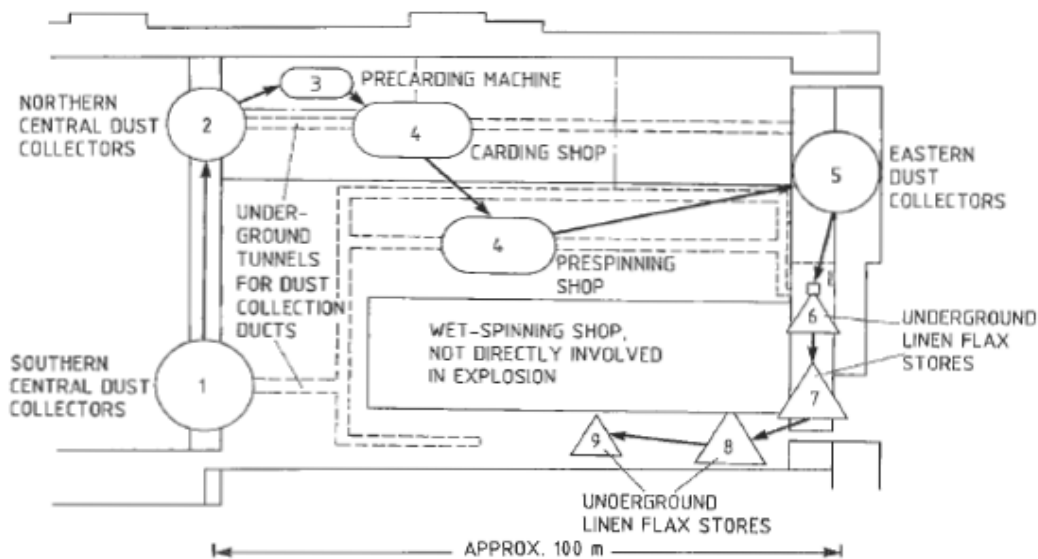


Figura 1.4: Schema degli eventi scatenanti il disastro di Harbin [3]

Xu et al.[4] hanno ipotizzato come innesco della prima esplosione o una scarica elettrostatica o un punto caldo localizzato, mentre Hailin et al [5] sostiene che l'innesco è stato causato dalla scarica elettrica di una lampada portatile collocata sopra uno strato di polvere di 6-8 cm.

- Biella (2001), Italia, esplosione in una pettinatura di lana: 3 morti e 8 feriti. Come riportato da Piccinini et al. [6] l'impianto effettuava il lavaggio, la cardatura e la pettinatura della lana, e le polveri che si formavano contenevano una parte vegetale non indifferente; essendo l'ambiente molto polveroso era stato previsto un sistema di ventilazione per evitare la sedimentazione (e la presenza di polvere sospesa) della stessa, il sistema comprendeva delle celle filtranti, al di sotto delle macchine cardatrici, per raccogliere le particelle più grossolane, da lì è iniziata una combustione senza fiamma, che ha portato ad una violenta esplosione con fiamme di 20-30 metri di altezza, alimentate anche dalle polveri degli altri settori, collegati dal sistema di ventilazione. Una delle cause di innesco può essere stata o una scintilla o un punto caldo causato dal sistema di illuminazione interno della cella di raccolta.



Figura 1.5: Pettinatura Italiana dopo l'esplosione avvenuta nel 2001[7]

- Biella (2001), Italia, esplosione di flock di nylon: 3 feriti gravi. Nell'impianto si effettuavano la tintura, l'essiccazione e la produzione di flock mediante il taglio di fibre sintetiche di poliammide. La deposizione dei flock veniva fatta attraverso un'unità elettrostatica dove si formava una nube di fibre, localizzata nei pressi del fascio di fili bagnati da una colla, la quale veniva essiccata in un forno a valle del processo. Una mattina uno degli operatori, avendo trovato dei fili spezzati, ha fermato l'impianto per qualche ora, incluso il sistema di ventilazione e le valvole di controllo del riscaldamento del forno; Al riavvio delle ventole si è verificata una esplosione interna al forno che poi si è propagata attraverso l'impianto di trattamento dei gas di scarico. Secondo la ricostruzione della dinamica dell'evento descritta da Marmo [8], durante il fermo dell'impianto, i flock si sono depositati sulle pareti del forno, che usava olio diatermico a 270 °C, i quali a causa del surriscaldamento hanno generato dei gas caldi all'interno dei flocks creando una combustione senza fiamma. L'avvio delle ventole ha poi provocato un fronte di fiamma, l'esplosione primaria infine ha sollevato delle polveri depositate in strato sulla superficie del forno, le quali hanno provocato altre esplosioni secondarie nelle condotte dell'aria, nei filtri a manica e in altri due forni essiccatori.

1.3 SCOPO DEL LAVORO

In questo lavoro di tesi sono stati studiati diversi campioni di polveri non convenzionali, provenienti principalmente dall'industria della lana. L'obiettivo dello studio consiste nel comprendere il comportamento di queste polveri, come effettivamente possono disperdersi nell'ambiente a seguito di un'onda di pressione, eseguendo vari test sulla loro disperdibilità in aria. Sono stati eseguiti test per valutare l'esplosibilità delle stesse in modo da poter identificare il livello di rischio e poter indicare le giuste precauzioni nei vari reparti dell'industria tessile.

Nel capitolo 2 verranno esposte le problematiche legate alla polverosità negli ambienti di lavoro, tutte le lavorazioni e i processi dell'industria tessile.

Nel capitolo 3 verranno trattati tutti gli strumenti e i metodi utilizzati per la caratterizzazione chimico-fisica delle polveri, per i test di infiammabilità e di disperdibilità.

Nel capitolo 4 verranno presentati e commentati i risultati dei test in laboratorio, dei campioni studiati in base alla lavorazione da cui provenivano e alla loro effettiva disperdibilità

2 MATERIALI

In questo capitolo verranno studiati, nello specifico, alcuni dei processi dell'industria tessile che generano come scarto di lavorazione dei flock di polvere fibrosa o delle polveri fini disperse in tutto l'ambiente di lavoro circostante. Questi processi sono abbastanza problematici, disperdono una quantità modesta di polvere, la maggior parte crea nubi aerodisperse con conseguente sedimentazione in zone a volte difficili da pulire, si formano strati di polvere sui macchinari e in tutto il reparto se non sono presenti impianti di aspirazione adeguati.



Figura 2.6: Polvere di cotone [9]

Ciò oltre a problemi di igiene crea problemi di sicurezza, essendo le polveri tessili potenzialmente esplosive, per cui è interessante capire come si disperdono per creare una nube pericolosa. Studiarne le caratteristiche esplosive, in modo da poter determinare il livello di rischio e le contro misure protettive e mitigative necessarie.

L'aspirazione dai reparti crea anch'essa, nella movimentazione della polvere, una nube quindi devono essere previsti dei sistemi per l'abbattimento delle polveri, come filtri a maniche e cicloni nell'impianto di aspirazione.



Figura 2.7: Filtro a maniche e ciclone nell'impianto di aspirazione [10]

2.1 LAVORAZIONI E PROCESSI DELL'INDUSTRIA LANIERA

La lana è una fibra di origine animale, ricavata dal manto di alcuni animali come le pecore, gli alpaca, i cammelli ecc. Molto importante per le sue proprietà isolanti sia in estate che in inverno, è trattata per poter creare vestiti e tessuti per vari utilizzi.



Figura 2.8: Tosatura delle pecore [11]

Dopo la tosatura dell'animale e la raccolta di blocchi di lana grezza, è l'industria laniera che in genere effettua le restanti operazioni, dalle classiche alle più innovative, per trattare la fibra in modo da poterne trarre dei filati o dei tessuti.

Importante per il susseguirsi delle operazioni è poter dare una stima dell'ordine di grandezza delle fibre, in genere si hanno due processi differenti per la lana grezza a fibre corte e per quella a fibre lunghe, il limite che separa questa distinzione è di una lunghezza di 40 mm.

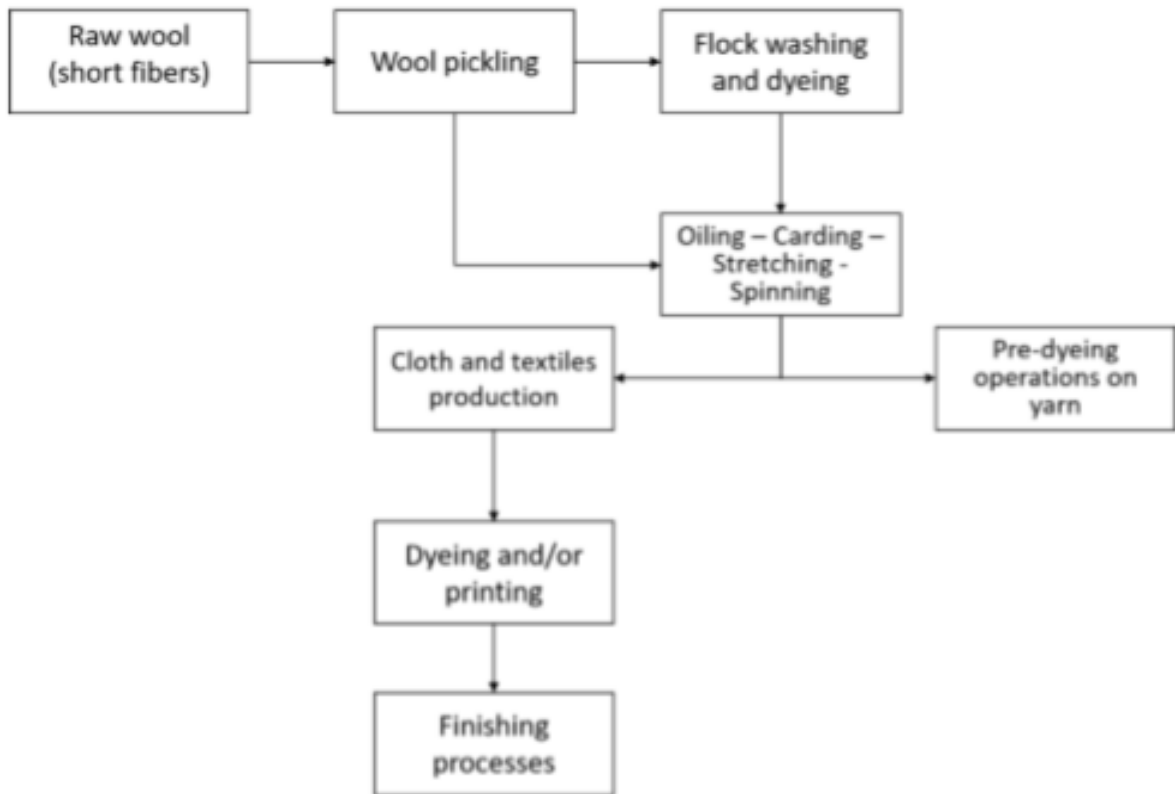


Figura 2.9: Ciclo di lavorazione della lana grezza a fibra corta [12]

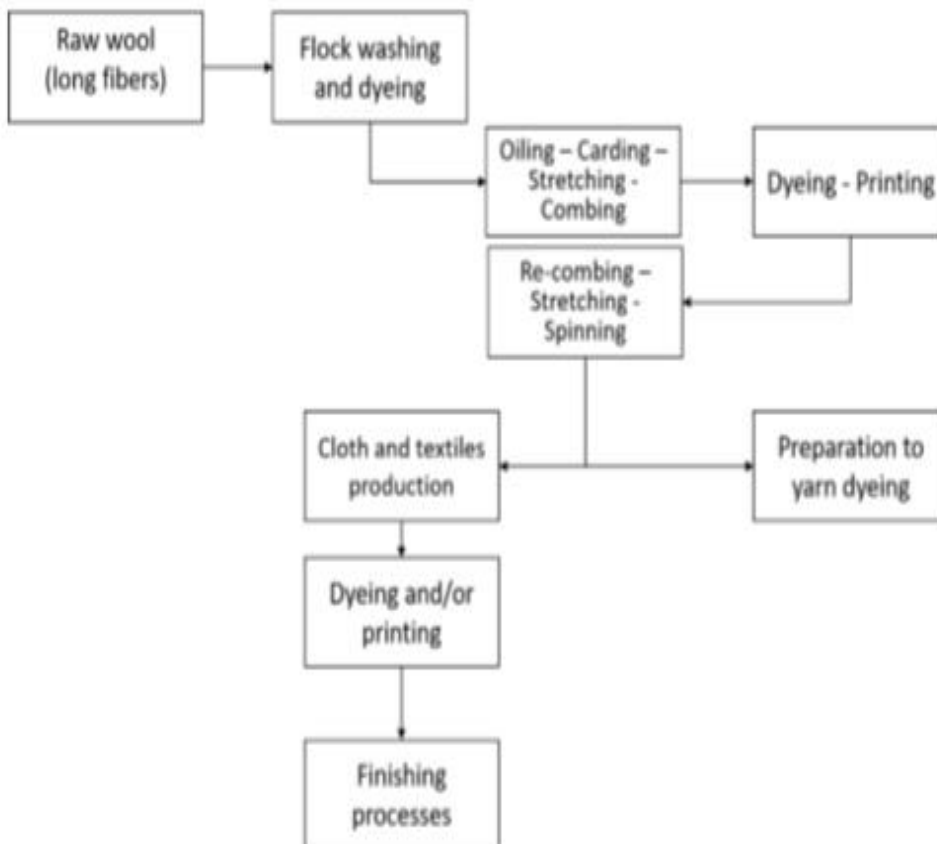


Figura 2.10: ciclo di lavorazione della lana a fibra lunga o sucida [12]

I blocchi prima di tutto devono essere aperti (è il caso della lana grezza a fibra corta), lavati e asciugati per togliere un po' di impurità idrosolubili e oleati per diminuire l'attrito tra la lana stessa e i macchinari.

Dopo queste operazioni preliminari la lana a fibra corta viene cardata per togliere le impurità tra le fibre e per allineare le fibre, viene allungata e alla fine filata per ottenere dei filati di sezione irregolare da vendere o utilizzati per creare tessuti; La lana a fibra lunga invece dopo l'allungamento subisce una pettinatura e una re-pettinatura post asciugatura che ordina le fibre in base alla lunghezza permettendo di eliminare fibre corte e residui vegetali, segue poi la filatura. Il processo di filatura pettinata permette di ottenere dei filati molto migliori rispetto a quelli ottenuti nel processo di filatura cardata usato per la lana a fibra corta.

Da qui in avanti verranno analizzate passo dopo passo i più importanti processi dell'industria della lana.

2.1.1 Pretrattamenti

Post tosatura la lana viene raccolta e ammassata in delle balle (simili a quelle del fieno) per agevolarne il trasporto, tuttavia all'arrivo nello stabilimento, che si occuperà di trarne un filato, non arriva alle caratteristiche volute perché essendo pressata, molto compatta, la lana non assume più la forma di fiocco per cui deve venire aperta da delle macchine e poi lasciata a riposare a temperatura ambiente per qualche giorno o in apposite camere a 60°C per 8-10 ore.



Figura 2.11: Balle di lana grezza [13]

Una volta che, grazie a temperatura e umidità, si è ristabilito il volume naturale della lana si può proseguire agli altri pretrattamenti. Spesso la lana contiene al suo interno vari corpuscoli inquinanti come sostanze vegetali, fango ecc. per cui uno dei pretrattamenti che subisce è la battitura per cercare di togliere le impurità più grossolane.

La battitrice è un'apparecchiatura che sfruttando un tamburo rotante, costituito da protuberanze di acciaio disposti in maniera elicoidale, apre, martella e movimentata la lana dall'entrata all'uscita. Sotto il tamburo staziona una griglia che trattiene la lana, che verrà sempre movimentata, mentre le impurità entrano nei vagli della griglia, per cui il sottovaglio andrà a finire in una tramoggia di raccolta sottostante. L'apparecchiatura è sempre sotto ventilazione, l'aria aspirata in genere va a finire in dei filtri a maniche perché contiene molte impurità.

La prima apertura serviva per sgrossare le impurità, successivamente la lana deve essere ancora aperta, ovvero non deve più presentare la sua natura di fiocco. Le fibre devono essere sfilacciate per cui si utilizzano dei macchinari appositi (Figura 2.12), il processo che avviene è molto polveroso, libera tutte le impurità e le fibre piccole intrappolate nel fiocco.

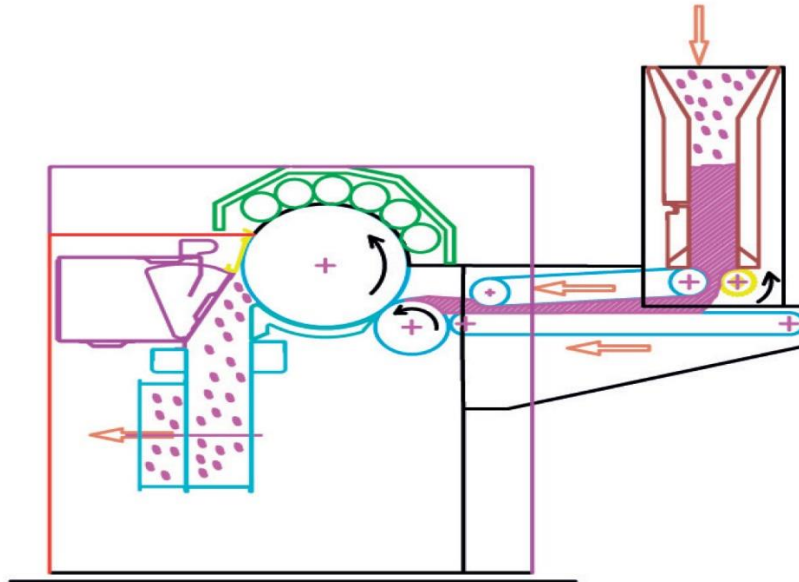


Figura 2.12: Apritore di fibre simile alla carda lupo[14]

Se le fibre che stiamo trattando sono delle fibre corte, ovvero sotto i 40 mm di lunghezza, utilizziamo per questo pretrattamento il lupo apritore mentre per le fibre lunghe si utilizza la carda lupo. Nel lupo apritore due cilindri movimentano la lana in entrata e la bloccano mentre un tamburo rotante con le punte sfilaccia la lana, nella carda lupo invece la lana in entrata viene avvolta in un tamburo dentato rotante e altri piccoli tamburi vicini invece sfilacciano lo strato sul tamburo centrale.

Successivamente le fibre vengono lavate, con l'ausilio di detergenti, per togliere i grassi che ricoprono la fibra stessa della lana e infine asciugate tramite essiccazione. Appena è asciutta viene sottoposta ad oliatura perché senza l'untume che le copre c'è rischio di accumulo di cariche elettrostatiche durante lo sfregamento della lana stessa con i macchinari. L'oliatura ha lo scopo di lubrificare le fibre, l'olio usato è una miscela di acidi grassi naturali e di poliossietilene, il quale garantisce alto potere lubrificante ed è facilmente solubile in acqua fredda. In quest'ultimo processo spesso viene aggiunto anche un antistatico.

2.1.2 Cardatura e Pettinatura

Uno dei processi cardine di tutta l'industria tessile è la cardatura, essa serve per eliminare le impurità rimaste tra le fibre aprendo ancor di più i fiocchi, migliora la miscelazione tra esse e le parallelizza parzialmente grazie alle setole della carda. Infine produce un velo di fibre, chiamato nastro cardato, che deve essere stirato.

L'apparecchiatura che svolge la cardatura si chiama carda ed è costituita da vari cilindri di diametro diverso avvolti da delle guarnizioni dentate. I denti della carda possono essere di vario tipo e con varia inclinazione, generalmente si differiscono in guarnizioni elastiche e guarnizioni rigide.

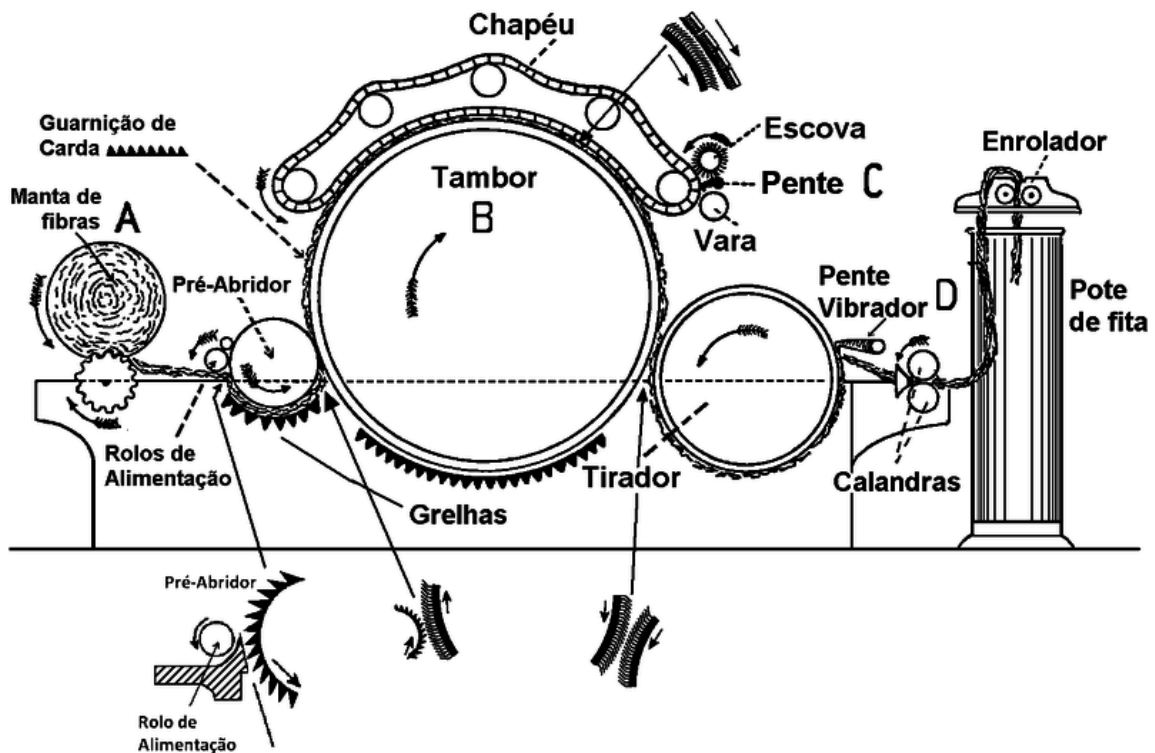


Figura 2.13: Processo di cardatura [15]

Le guarnizioni elastiche sono formate da un supporto elastico o da un nastro di feltro in cui vengono conficcate le punte, quelle rigide invece sono costituite da un filo di acciaio dentato, queste presentano una migliore resistenza all'usura.

Man mano che si va avanti nel processo di cardatura la densità di punte sui cilindri diminuisce e i cilindri ruotano a velocità diverse, ciò consente di effettuare le operazioni di cardatura, spogliatura e sollevamento velocemente in modo da non sovraccaricare i denti e rendere più efficace la lavorazione.

Lo stiro ha il compito di distendere le fibre ripiegate su loro stesse, per quanto riguarda la lana a fibra corta dopo si passa alla produzione di stoppini da mandare al filatoio. mentre per la lana sucida che presenta sia fibre corte e lunghe lo stiro serve anche per evitare che le fibre lunghe vengano viste come corte e scartate dalla macchina che svolge la pettinatura.

La stiratura avviene tramite un macchinario costituito da tanti aghi di acciaio che si conficcano nel nastro cardato e lo trasportano ai cilindri di stiro.

La pettinatura (usata solo per la lana a fibra lunga) ha il compito di eliminare le ultime tracce di materiale vegetale ancora presente, scartare le fibre corte e parallelizzare di nuovo le fibre. Si produce così il nastro pettinato, il quale rispetto al nastro cardato presenta un minor volume e una minor pelosità, grazie al parallelismo delle fibre e alla riduzione di fibre corte, quindi negli step successivi si otterrà un filato molto più regolare.

L'apparecchiatura che consente questo processo è formato da organi di presa (pinze) e da pettini. Il nastro cardato viene pinzato passo dopo passo, pinzandolo si ha una ciocca di fibre, che viene attraversata da dei pettini in modo da togliere le fibre corte e stendere le lunghe rimaste in presa. Successivamente le ciocche vengono disposte una dietro l'altra (testa-coda), ciò forma un nastro di fibre parallele che è il così detto nastro pettinato. Questo nastro viene stabilizzato nel processo di post pettinatura, che consiste in operazioni di stiratura.



Figura 2.14: Nastro pettinato [16]

Post cardatura per le fibre corte e post pettinatura per le fibre lunghe, il nastro deve essere diviso in un certo numero di stoppini. Il divisore è formato da diverse cinghie di cuoio che incrociandosi effettuano un taglio al nastro, la parte tagliata è avvolta in appositi cilindri in modo da conferire la forma tondeggiante allo stoppino. Lo stoppino è infine diretto al filatoio.



Figura 2.15: Apparecchiatura per la suddivisione del nastro in stoppini [16]

2.1.3 Filatura

Gli stoppini prodotti nel ciclo pettinato e cardato sono diretti al filatoio, dove verranno lavorati per produrre il filato. Il processo comprende stiro, torsione e incannatura del filato, ovvero l'avvolgimento dello stesso su apposite bobine chiamate spole o fusi.

In base al filato che si vuole produrre e al tipo di fibra che viene trattata esistono dei filatoi appositi, per quanto riguarda la lana se ne usano di 4 tipi [17]:

- Filatoio self-acting o intermittente: Macchinario più datato, usato per la produzione di filati cardati, ovvero usano gli stoppini meno pregiati prodotte da fibre corte. Lo stiro avviene tramite un carro alimentatore che preleva lo stoppino dalle bobine, a un quarto della corsa l'alimentazione è interrotta e il carro esercita una trazione sullo stoppino, in modo da assottigliarlo. Il filo poi arriva al banco a fusi dove avviene la torsione e l'avvolgimento sulle spole



Figura 2.16: Filatoio self-acting [16]

- Filatoio ad anello: Questo filatoio è il più diffuso tra i filatoi continui, riesce a compiere contemporaneamente tutte e tre le azioni ad altissima velocità (20000 gpm), ed è impiegato per produrre filati pettinati di lana e di altre fibre. La macchina è composta da due fronti simmetrici aventi dai 200 ai 300 fusi, con comandi diversi in modo di avere due tipologie di filato; da una rastrelliera porta bobine per alimentare gli stoppini, dalla cilindraia per lo stiro e del banco a fusi per le altre due operazioni. Per ogni stoppino da filare ci sono tre coppie di cilindri con differente velocità di rotazione, la prima coppia che prende dalla bobina ha delle scanalature sottili per uniformare lo stoppino, le altre coppie sono ricoperte da gomma o feltro. La diversa velocità nei cilindri determina lo stiro dello stoppino che arriva al banco a fusi allo spessore richiesto, la torsione del filo sul banco è svolta da un cursore formato da un anellino in acciaio che ruota intorno al fuso ad elevate velocità. Il moto rotatorio produce la torsione del filato mentre si avvolge sulla bobina.

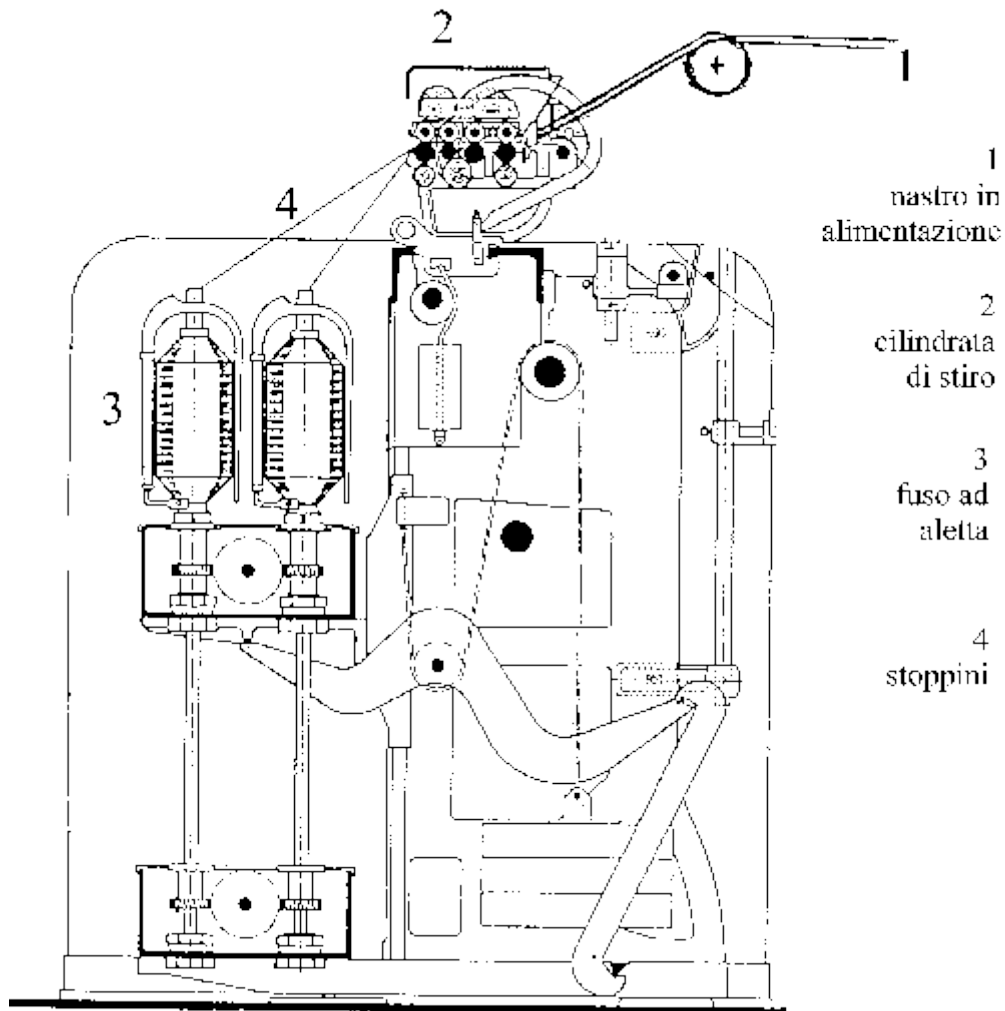


Figura 2.17: Banco a fusi [18]

- Filatoio open-end: Molto diffusi in Giappone, più veloci dei filatoi ad anello. Il nastro dopo lo stiro viene scomposto da un battitore che ruota, le fibre vengono inviate da un getto d'aria dentro la scanalatura a V del bordo di un rotore e contraendosi si uniscono per formare un filo continuo e ritorto, il quale fuoriuscendo da un condotto coassiale al rotore viene avvolto su delle bobine.

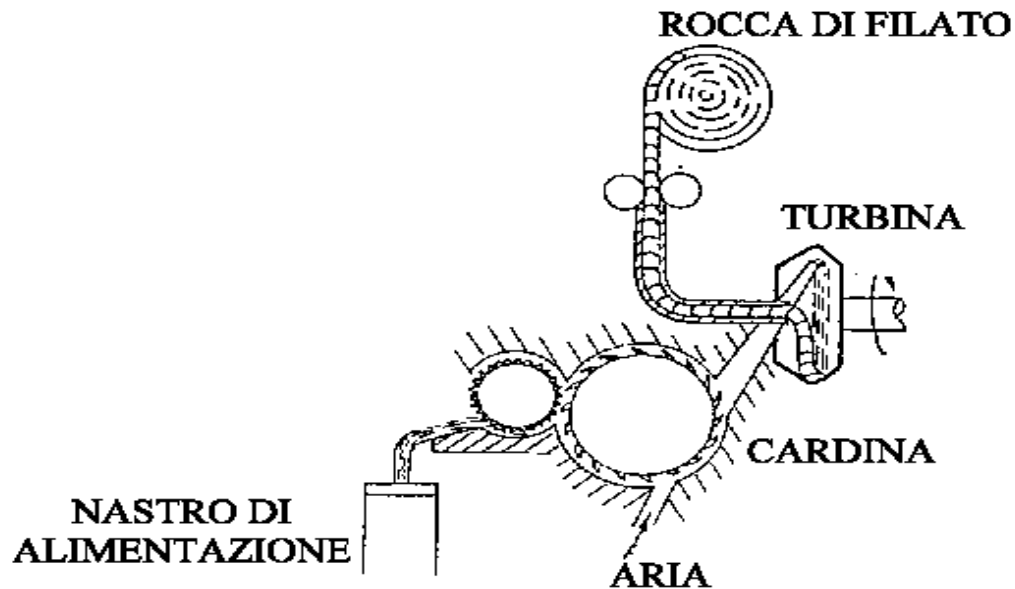


Figura 2.18: Filatoio Open-End [18]

- Filatoio ad autotorcitura: Sono molto diffusi in Australia e si distinguono per l'elevata velocità di formazione del filo ed eliminano l'operazione di accoppiamento che precede la tessitura. Gli stoppini entrano a due a due verso una coppia di cilindri che effettuano due moti diversi, uno di rotazione e uno alternato rispetto al proprio asse, in uscita da questi i filati si attorcigliano reciprocamente fornendo un filato a due capi molto compatto.

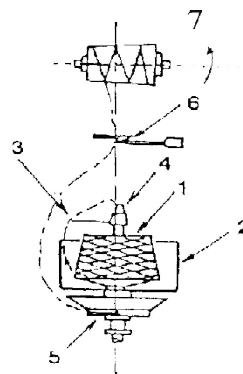


Figura 2.19: Schema della ritorcitura per creare filati a due capi [18]

Il filato prodotto avvolto in rocche nel reparto di roccatura, oltre ad essere venduto tal quale, è destinato al reparto di tessitura per la produzione di tessuti.

2.1.4 Tessitura

Il reparto racchiude diversi processi, si inizia con la roccatura [19] in cui il filato viene avvolto in dei tubetti chiamate rocche. Le rocche si differenziano nella forma in base alla destinazione, quelle per l'ordito sono di forma cilindrica mentre quelle per la trama sono di forma conica, in modo da facilitarne lo scorrimento a telaio.

Successivamente si esegue l'orditura [19] ovvero la preparazione alla tessitura, i fili verticali che comporranno il tessuto sono posti uno vicino all'altro in modo da rispettare il disegno elaborato in progettazione. Le rocche sono posizionate sulla cantra e i fili avvolti sull'aspo (cilindro in acciaio) per passare al subbio, ovvero un cilindretto che sarà caricato a telaio.

Dopo questa fase per i filati unici avviene il processo di imbozzimatura [19], serve per irrobustire il filato essendo molto più delicato rispetto a quello ritorto che presenta due o più fili avvolti. L'ordito viene immerso in una vasca piena di bozzima che irrigidisce il filato, che una volta essiccato viene diviso tramite grosse barre in modo da non creare problemi per la tessitura.

Ultimo step rimasto è la tessitura dove il filo di trama incontra in filo di ordito per dar vita ad un tessuto. Lo strumento da sempre utilizzato per tessere è il telaio, ne esistono di vari tipi nell'industria moderna, ognuno con diversi intrecci per creare diversi tipi di tessuto. L'intreccio più semplice da realizzare è la tela (è anche la più diffusa) [19]: I fili dell'ordito collocati sul subbio posteriore vengono divisi in serie alternate pari e dispari, ogni filo passa in un liccio. I licci sono l'organo di movimentazione dei fili, vengono azionati da due pedali, uno per muovere la serie pari e uno per la serie dispari. I licci azionati si sollevano creando un passaggio per la trama trasportata dalla navetta, la quale con il passaggio trasversale da una parte all'altra del telaio srotola il filo. Un pettine infine avvicina l'ultimo passaggio di trama al passaggio precedente, incrocio dopo incrocio e si ha la tessitura.

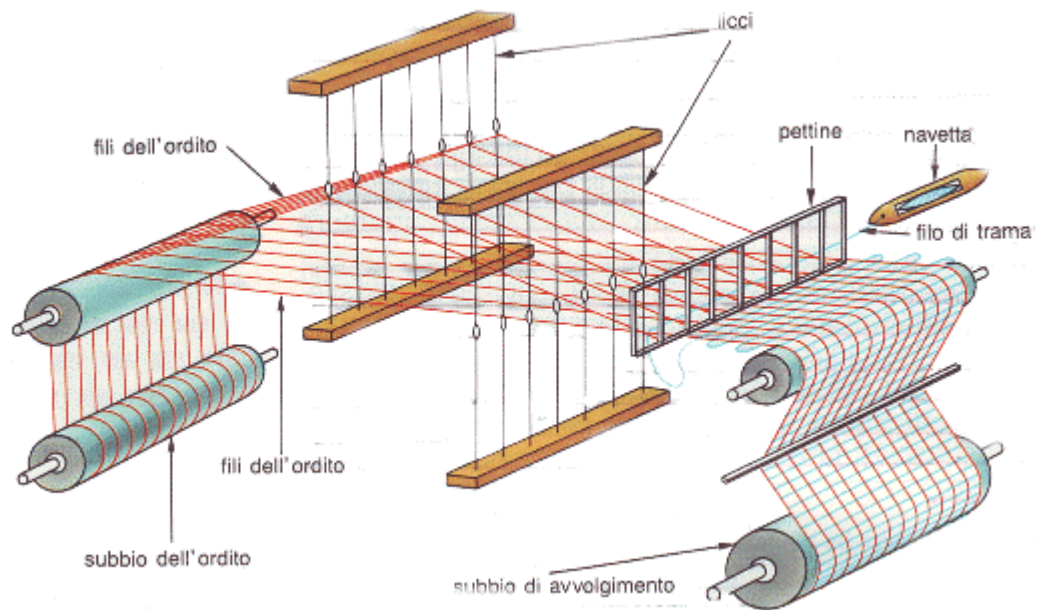


Figura 2.20: Schema del processo di tessitura [20]

Il tessuto infine prodotto andrà alla sezione di finissaggio, dove subendo diversi trattamenti acquisirà le caratteristiche qualitative ideali per l'uso finale.

2.2 PROBLEMATICHE LEGATE ALLA POLVEROSITÀ NELL'AMBIENTE DI LAVORO

Molti dei processi trattati sono comuni per varie fibre sia animali che vegetali, quindi non solo specifici per la lana. Le lavorazioni principali sono prettamente di natura meccanica, per cui a causa di tagli, pettinature, stirature ecc. che avvengono a contatto con le parti metalliche si generano degli scarti di lavorazione di natura polverosa, i così detti flocks, ovvero degli agglomerati di fibre spezzate che racchiudono micro impurità all'interno.

I flocks sono abbastanza leggeri e la velocità con cui vengono generati è elevata, per cui tendono non solo a sedimentare vicino al macchinario ma anche ad areo-dispersersi nel reparto. Ciò è un ostacolo per l'operatore addetto al macchinario, diminuisce la visibilità e la respirazione diventa più faticosa, che per lavorare in sicurezza necessita del giusto equipaggiamento come mascherine e occhiali protettivi.

Le fibre di cotone, rispetto a quelle di lana, sono pericolose per la salute, in quanto possono causare la bissinosi, un'affezione polmonare causata dall'inalazione di polvere di cotone. Per questa ragione è necessario ventilare i reparti maggiormente coinvolti nella generazione dei flock, dalla Tabella 2.1 la filatura è il reparto che necessita di più ricambi di aria per ora.

Tabella 2.1: Numero di ricambi di aria ogni ora per reparto nell'industria del cotone [21]

Reparto	Numero ricambi aria per ora
Pettinatura	15
Cardatura	20
Filatura	45
Asciugatura	30
Tessitura	20
Preparazione delle fibre	15
Ritorcitura	20

I ricambi d'aria vengono generati attraverso il sistema di ventilazione del reparto, essa ha il compito di aspirare l'aria polverosa e riuscire ad abbattere le polveri sospese con un sistema di abbattimento come può essere un ciclone o un filtro a maniche. Anche l'umidificazione del reparto è qualcosa che deve essere garantito, la presenza di acqua appesantisce le polveri aereodisperse favorendone la sedimentazione. Inoltre la presenza di umidità rafforza le fibre da trattare (ne aumenta le proprietà meccaniche), ne mantiene la malleabilità, evita la rottura dei nodi nel filato e di conseguenza anche la generazione di cariche elettrostatiche.

Per la pulizia dell'ambiente di lavoro e dei macchinari non possono essere usati apparecchiature ad aria compressa, ma solo sistemi di aspirazione a vuoto. L'aria compressa ti genera altra polvere sospesa e dispersa e ciò potrebbe creare atmosfere potenzialmente esplosive.

2.2.1 Sistemi di Abbattimento Polveri

Nell'industria tessile per abbattere le polveri areo-disperse spesso vengono installati filtri a maniche e cicloni, la spinta data dall'aspirazione convoglia l'aria polverosa verso i filtri e blocca il passaggio delle particelle solide.

Il Filtro a maniche di Figura 2.16 è un collettore provvisto di attacchi dove sono collocate le maniche, ovvero dei filtri a forma di tubo.



Figura 2.21: Filtro a maniche [22]

L'aria inquinata viene aspirata tramite una tubazione collegata al ventilatore e viene espulsa attraverso il setto filtrante, le polveri che precipitano vengono accumulate nei sacchi in propilene di raccolta.

I cicloni separatori invece sono dei sistemi di abbattimento delle polveri che sfruttano la forza centrifuga. Le polveri contenute nell'aria decantano, dopo un moto discensionale vorticoso lungo le pareti, in una tramoggia con un sistema di raccolta, l'aria invece esce dall'alto.



Figura 2.22: Coppia di Cicloni per abbattimento polveri [22]

Questo tipo di filtro in genere è usato per polveri grossolane o come pre-filtro per alte concentrazioni di polveri in modo da migliorare la prestazione dei filtri che vengono dopo, aumentando il livello di separazione ed evitando intasamenti nell'impianto.

3 METODI E STRUMENTI

3.1 CARATTERIZZAZIONE CHIMICO-FISICA

Con il presente sotto capitolo si vuole introdurre il lettore a tutte le metodologie e i test in cui i vari campioni di polvere, di varia natura provenienti da diverse realtà industriali italiane, vengono caratterizzati in base alla loro natura chimico fisica. Per cui è importante conoscere la dimensione delle particelle, il tenore di umidità e la composizione chimica del campione, tramite un'analisi CHN dello stesso.

3.1.1 Umidità

La misura del contenuto di umidità del campione da testare è uno dei parametri fondamentali per eseguire i test di screening in tubo Hartman e in sfera Siwek, dove è necessario avere un'umidità relativa inferiore al 10÷15 %. La presenza di acqua nel campione provoca un aumento della sua temperatura ed energia minima di accensione, ciò influenza le misure di MIE e della MIT. La determinazione dell'umidità si effettua ponendo il campione in stufa, a 65 °C per 5 ore, ciò serve per calcolare il quantitativo di umidità relativa presente nel campione tal quale, ovvero calcolare il quantitativo d'acqua in base alla differenza di peso tra campione tal quale e campione essiccato.

$$UR = \left[1 - \left(\frac{\text{Peso netto secco}}{\text{Peso netto umido}} \right) \right] * 100 \quad (3.1)$$

3.1.2 Setacciature

La setacciatura è una tecnica per separare del materiale solido in base alle dimensioni. Il setaccio presenta dei vagli di dimensione specifica e questi garantiscono il passaggio dei corpi di dimensione minore. Il setaccio deve essere scosso durante il suo utilizzo per favorire il passaggio dei corpi destinati al sottovaglio.

In laboratorio, la setacciatura del campione di polvere è la prima cosa da fare per la caratterizzazione chimico-fisica dello stesso; L'apparecchiatura usata per fare ciò è un setacciatore meccanico a vibrazioni (Figura 3.1), formato da una base in cui risiede l'organo che fa vibrare la piastra, sopra il quale si impilano i diversi setacci. I setacci usati in laboratorio hanno apertura che va da 2 mm a 25 µm.



Figura 3.1: Setacciatore meccanico a vibrazioni

Per i campioni studiati la difficoltà che si è presentata è quella di non riuscire a setacciare alcuni flock proveniente da vari reparti tessili. Il setacciatore a vibrazioni per alcuni campioni è risultato inefficace, a causa della morfologia delle fibre e della loro diversa orientazione rispetto alle maglie del setaccio e della forte adesione che le lega nel flock; per altri invece è risultata abbastanza efficace, grazie ad una forma meno ingombrante del campione. A seguito delle vibrazioni, dei pesetti martellano sul setaccio favorendone il processo di raccolta delle particelle fini. Il particolato fine così prodotto, di dimensione inferiore a $500\ \mu\text{m}$, verrà usato poi nei test di esplosività in sfera.

Per i flock maggiormente agglomerati, che hanno fallito la setacciatura, si è deciso di procedere con il setaccio manuale.

3.1.3 Granulometria

Il laboratorio dispone, per la misura della granulometria dei campioni, di un granulometro laser, modello Mastersizer Scirocco 2000M della Malvern (Figura 3.2), il quale si basa sul principio di diffrazione della luce di un raggio laser, indotta dal passaggio delle particelle.



Figura 3.2: Granulometro laser

Le particelle vengono disperse con l'ausilio di una messa a vuoto, regolata da un aspiratore ATEX.

Il raggio laser, a lunghezza d'onda fissata, viene diffratto dalle particelle di campione in una camera, dove sensori posti su tutta la sua lunghezza registrano la diffrazione e attraverso un sistema di elaborazione di dati restituiscono le dimensioni del campione, ovvero la sua curva granulometrica (PSD).

La curva presenta tre punti caratteristici chiamati decimo percentile ($d(0,1)$), cinquantesimo percentile ($d(0,5)$) e novantesimo percentile ($d(0,9)$) e rappresentano rispettivamente le dimensioni del 10%, 50% e 90% in frazioni di peso del campione.

Lo strumento funziona in un range di dimensione che va da $0,1 \mu\text{m}$ fino a $1000 \mu\text{m}$ ed è possibile variare pressione di aspirazione e alimentazione del campione, in modo da ottenere per diverse prove un'elevata riproducibilità e garantire l'efficace dispersione del campione (la pressione di alimentazione ha lo scopo di disaggregare gli agglomerati, in modo che solo le particelle singole vengano misurate dal granulometro).

Lo strumento viene tarato utilizzando 1,5 g di un campione di riferimento, il quale dopo la pesata entra nel granulometro, tramite vibrazioni e aspirazione. Si monitora dal pc l'oscurazione del laser.

3.1.4 Stima del diametro con microscopio elettronico

Il diametro della fibra è uno dei parametri che influenzano l'innesco della polvere stessa, la lunghezza sicuramente determina la tendenza a formare flock di dimensione maggiore ma esistono al momento evidenze della sua influenza sulla sua esplosività. Tramite setacciatura e granulometria si è riusciti a quantificare il range dimensionale del campione e le dimensioni relative a percentuali in volume dello stesso.

Allo scopo di ottenere un valore di diametro medio attendibile, ogni campione è stato fotografato al microscopio elettronico, ogni fotografia ha una sua scala in micrometri come riferimento per cui, tramite un programma per acquisire immagini, si è misurato il diametro manualmente rapportato alla scala dell'immagine.

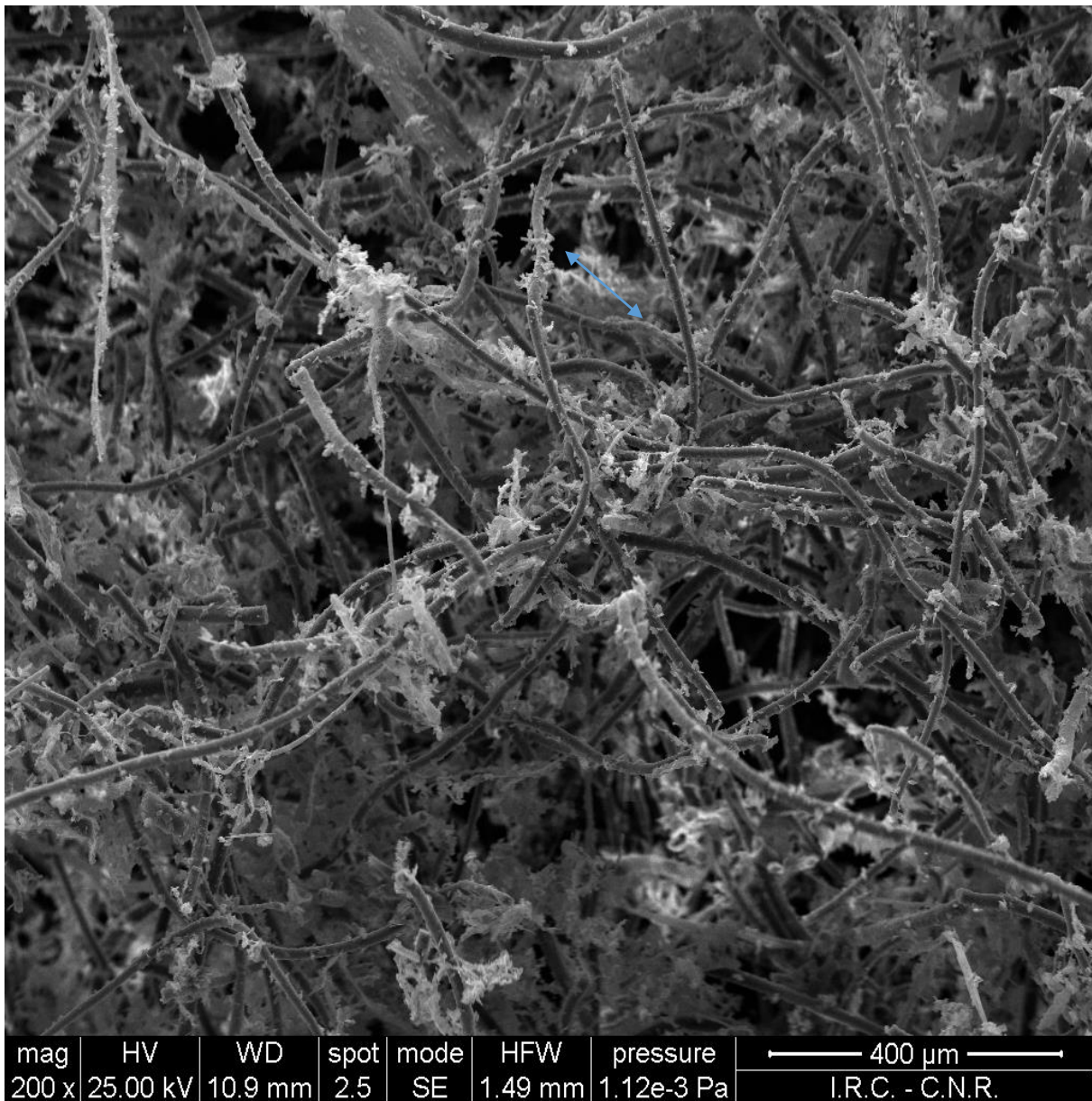


Figura 3.3: Foto del campione A al microscopio elettronico 400 μm

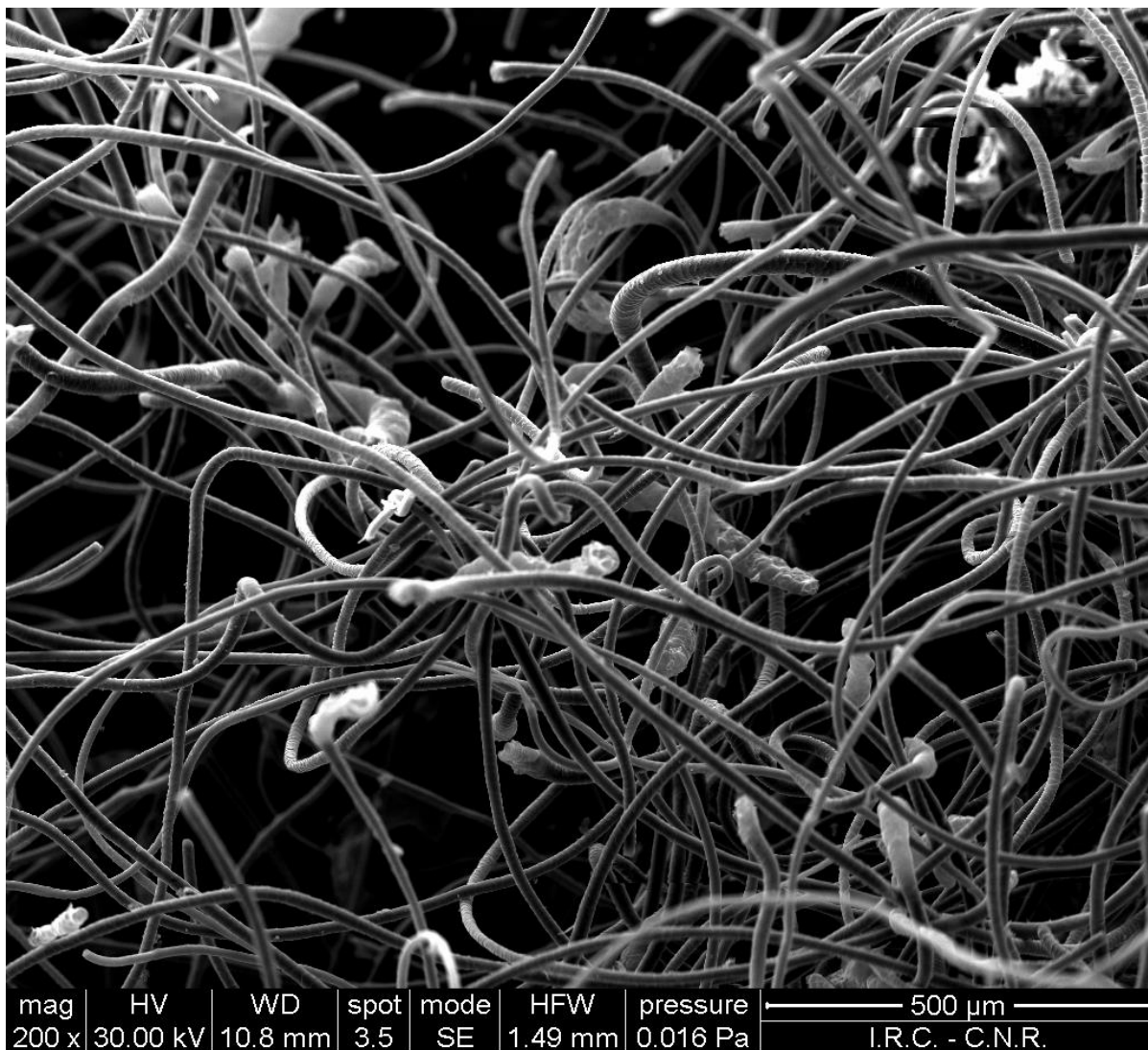


Figura 23.4: Foto del campione M al microscopio elettronico 500 μ m

3.2 TEST DI INFIAMMABILITÀ

In questo sotto capitolo si introdurranno i test di infiammabilità effettuati nel laboratorio di atmosfere esplosive (Centro Sperimentale Sicurezza Industriale Atmosfere Esplosive del Politecnico di Torino). Il test di screening è un test in più fasi effettuato sulle polveri per valutare le caratteristiche di pericolosità delle stesse. Il test si compone di una prova a temperatura ambiente effettuata nel tubo hartmann, se il test è fallito si effettuano prove a temperatura elevata nel forno Godbert-Greenwald e su una piastra riscaldante. Il test termina con le prove nella sfera Siwek per determinare K_{st} e P_{max} della polvere testata.

3.2.1 Test in tubo Hartmann

Il tubo Hartmann è un tubo cavo in vetro di 6,63 centimetri di diametro e 34,5 cm di altezza con un volume pari a circa 1200 cm^3 , l'innesco è posizionato all'interno ad $1/3$ dell'altezza totale, inserito in una cassa di acciaio con un tronco di cono finale, per agevolare l'aspirazione dei fumi da parte della cappa. Il tubo è poi posizionato su un portacampione e ancorato alla testa da un tappo forato incastrato nella cassa di sostegno. Il tutto è collegato all'impianto di distribuzione dell'aria compressa con una valvola riduttrice di pressione, una leva di carico, un barilotto di accumulo e una elettrovalvola.

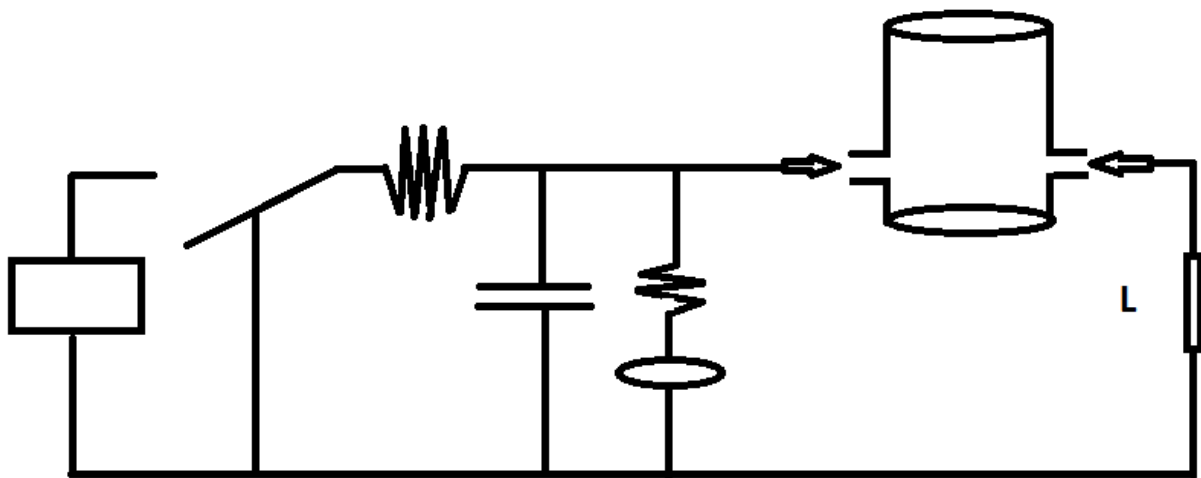


Figura 3.5: Circuito di scarica per generare arco elettrico nel tubo di Hartmann

Il test consiste nel vedere il comportamento di un determinato campione di polvere sollevato da un'onda di pressione, confinato nel tubo alla presenza di un innesco. La normativa per la determinazione della MIE UNI EN 13821/2004 [23] prevede di testare il campione ad un'energia nota e verificarne l'innesco in prove ripetitive, se non si innesca si aumenta l'energia dell'innesco, se è positiva si diminuisce fino a trovare l'energia minima di innesco.



Figura 3.6: Tubo Hartmann con inneschi ad arco continuo

La normativa prevede che le condizioni in cui deve essere fatto il test sia a temperatura di 20/25 °C, più in dettaglio:

- Il primo passo consiste nel prendere un campione tal quale, preparare 10 pesate dello stesso per varie concentrazioni:
 - 0,3 g corrispondenti a 2,5 g/m³
 - 0,5 g corrispondenti a 4,2 g/m³
 - 1 g corrispondenti a 8,3 g/m³
- Sistemato il campione nel portacampione, ancorare il tubo alla cassa con un foglio di carta che tappi l'estremità superiore, per simulare un parziale confinamento del volume di prova.
- Collegare gli elettrodi al sistema di controllo e portare in pressione il barilotto al massimo di 8 bar, gli inneschi utilizzati in laboratorio sono:
 - un arco elettrico continuo creato da due elettrodi in tungsteno che creano una scarica generata da un sistema di controllo che funziona a 29 kV e con una potenza di 21,75 W.
 - Una treccia di fili di una lega di ferro che diventa incandescente appena viene attraversato dalla corrente generata da un sistema di controllo settato a 155 W di potenza
- Azionare gli inneschi e istantaneamente aprire l'elettrovalvola.

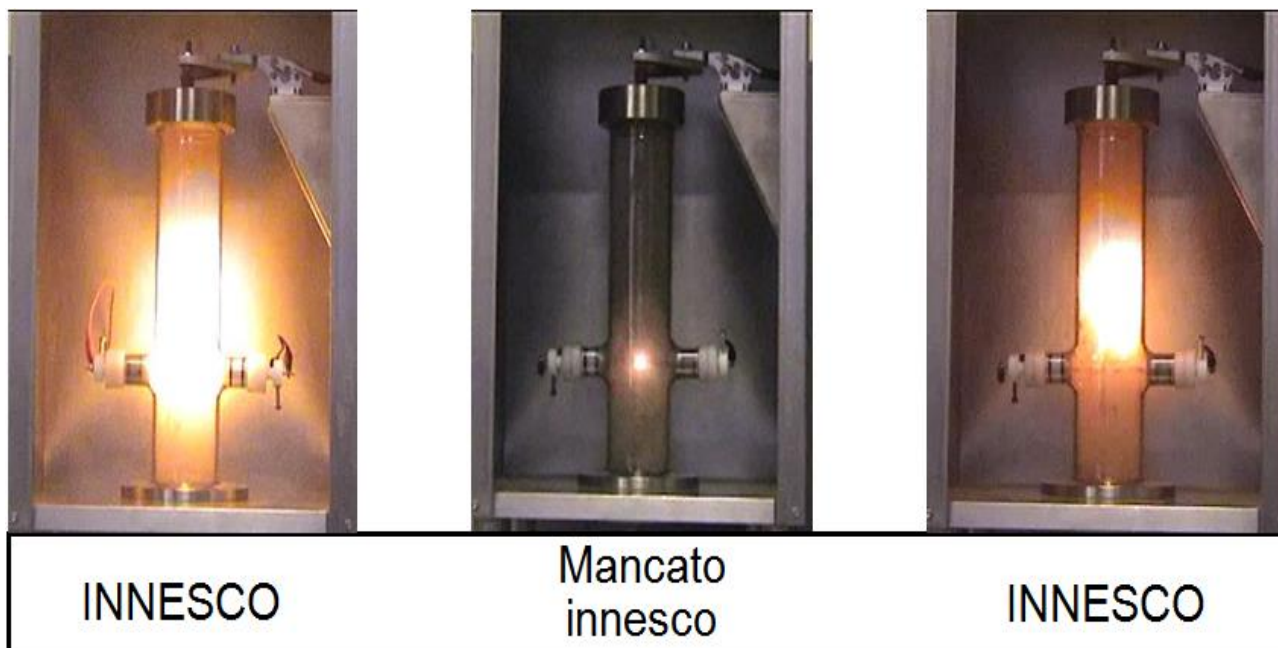


Figura 3.7: Verifica visiva dell'innesco in tubo Hartmann ad arco continuo

- Verificare se l'innesco c'è stato, è considerato innesco quando si genera una fiammata che arrivi almeno a 4/5 cm di distanza da dove è posizionata la fonte di innesco. Se si è verificato sospendere la prova e annotare i risultati, al contrario invece bisogna ripetere la prova fino a 10 volte lo stesso peso, poi passare a concentrazioni maggiori e ripetere la procedura.
- Le prove ad arco continuo e filo caldo sono consecutive, perché si passa da energie minori a energie maggiori. Se il primo innesco, ovvero l'arco, non è sufficiente passare al filo caldo iniziando sempre con le prove a concentrazione minore, poi incrementare in base agli esiti negativi
- Alla fine di ogni prova pulire il tubo e il portacampione con l'aspiratore ATEX e ripetere la prova.

Il campione che si innesca in queste due prove è definito Esplosibile a Temperatura Ambiente, se non si ha innesco si passa alle prove ad alta temperatura nel forno Goodbert-Greenwald e nella piastra riscaldante.

Per i campioni trattati non sono stati eseguiti test nel forno per problemi di dispersione del campione, il vano portacampione è cilindrico con un gomito uscente nella testa del forno per cui essendo le polveri fibrose tendenti ad aggregarsi tra loro creano un tappo nel gomito, inceppando la valvola. In piastra invece non sono stati trattati per la disomogeneità dei flocks.

3.2.2 Test in sfera Siwek per determinare il valore di Kst e Pmax

Kst e Pmax sono due valori che ci permettono di quantificare la violenza dell'esplosione di una determinata polvere combustibile, ovvero generata da un'esplosione primaria o a seguito di un'onda di pressione e della presenza di un altro innesco.

La normativa ATEX sulle atmosfere esplosive definisce il parametro Kst come il massimo valore numerico di un aumento di pressione in un serbatoio di 20 l nelle condizioni standard e si misura in bar m/s, ovvero misura la velocità di aumento della pressione durante l'esplosione.

Da [24] definiamo:

$$Kst = \left(\frac{dP}{dt} \right)_{max} * V^{\frac{1}{3}} = cost \quad (3.2)$$

La formula è concepita per misurare il valore della violenza dell'esplosione indipendentemente dal volume di prova, in quanto il test standard è concepito in una camera da 1 m³. La sfera da 20 litri può essere utilizzata da normativa, come strumento alternativo per la misura di Kst e Pmax.

Per i calcoli è necessario utilizzare le procedure descritte dalla normativa UNI EN 14034-2:2011 [25] per la velocità di aumento di pressione e dalla Uni EN 14034-1:2011 [26] per la pressione massima di esplosione.

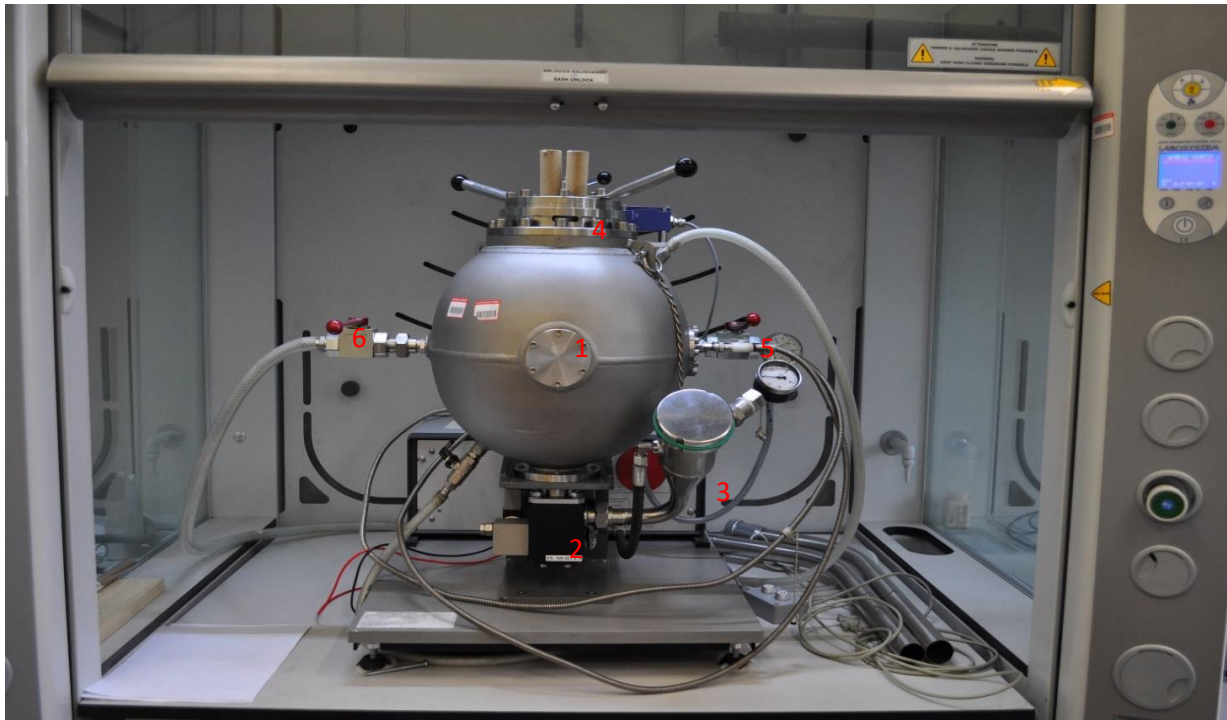


Figura 3.8: Sfera Siwek da 20 litri del laboratorio sulle atmosfere esplosive del Politecnico di Torino: 1) Sfera con camicia ad acqua; 2) Elettrovalvola per polveri; 3) Portacampione di carico per le polveri; 4) Tappo di chiusura della sfera in cui vengono collegati gli inneschi; 5) Trasduttori di pressione e valvola del sistema di vuoto; 6) valvola di sfiato

La sfera Siwek in Figura 3.8 è una sfera in acciaio inossidabile di 20 litri con una camicia ad acqua per il raffreddamento, è posizionata su un supporto e dotata di una elettrovalvola per polveri, che consente la dispersione della polvere inserita nel portacampione di carico all'interno della sfera.

Da sopra è chiusa in sicurezza da un tappo di acciaio con un sistema di blocco con leva. Dal tappo si estendono due aste con dei morsetti a vite all'estremità in cui vengono posizionati gli inneschi chimici Simex (Figura 3.9), vengono sospesi internamente alla sfera, mentre esternamente sono collegati i cavi provenienti dall'unità di controllo KSEP 310, che fornisce la scarica elettrica per l'accensione dei detonatori al momento della prova.



Figura 3.9: Detonatori chimici Simex da 5 kJ ciascuno

La stessa unità collega i trasduttori di pressione all'ambiente interno della sfera ed è a sua volta collegata all'unità di controllo KSEP 332 che rileva i valori di pressione e li elabora al pc fornendo i valori di Pmax e Kst, in più regola l'innesco dei detonatori e l'apertura dell'elettrovalvola.

La sfera è collegata ad un sistema di vuoto mentre il portacampione è collegato ad un compressore che prende aria dalla rete e la comprime fino alla pressione di 20 bar mentre l'interno della sfera è depressurizzato a -0,6 bar, in modo da garantire che all'interno della sfera la pressione sia equivalente quella atmosferica durante la prova.

I trasduttori sono due in parallelo, misurano entrambi la stessa pressione interna così da evitare una misura errata, e il sensore collocato sull'estremità è formato da cristalli di quarzo, sfruttando l'effetto piezoelettrico si misura la pressione esercitata sul cristallo e quindi internamente. Per evitare che si possano danneggiare i trasduttori, le estremità che si trovano a pieno contatto con l'esplosione sono ricoperte da uno strato di silicone.

Il computer ci fornisce dai dati acquisiti un grafico della pressione in funzione del tempo, in cui troviamo la pressione dell'esplosione P_{ex} che viene corretta nella P_{max} [26]. Dal grafico (Figura 3.10) inoltre viene individuato il flesso della curva che rappresenta il punto in cui si ha massima velocità di aumento di pressione.

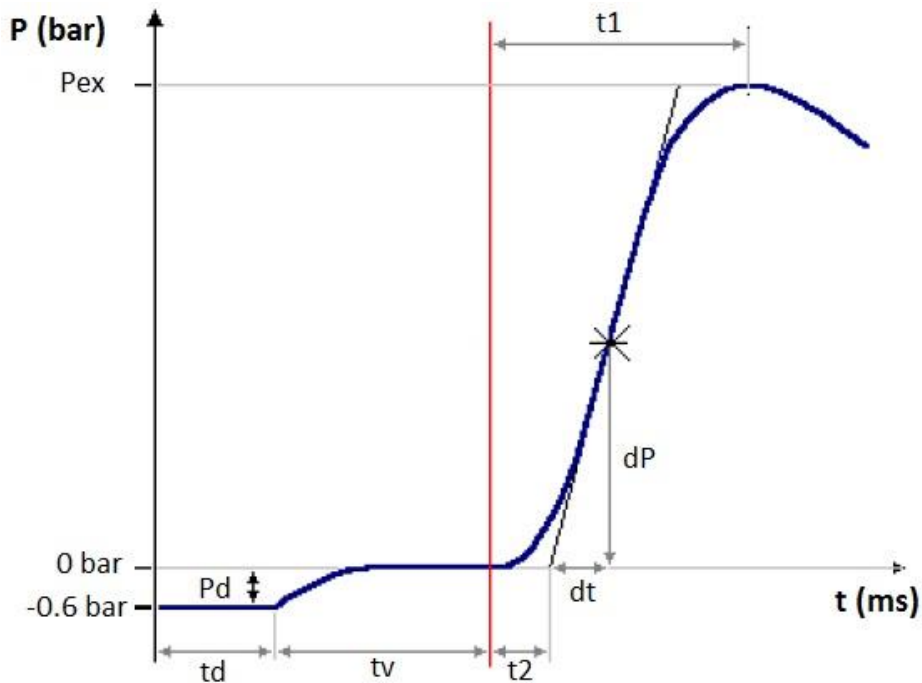


Figura 3.10: Andamento della pressione in funzione del tempo dentro la sfera [27]

La prova che prevede l'utilizzo di detonatori chimici di elevata potenza, deve essere eseguita con l'ausilio di personale specializzato, equipaggiato con i dispositivi di protezione individuale adeguati, ovvero:

- Indumenti antistatici come le scarpe, il camice e i guanti. In modo da poter maneggiare con cura i detonatori chimici Simex, evitando accumulo di cariche elettrostatiche.
- Cuffie per attutire il rumore e occhiali protettivi per tutti i presenti in laboratorio durante la prova.

Il campione, dopo la pesa, viene caricato nel portacampione mentre gli inneschi vengono posizionati sui supporti del tappo della sfera. Gli inneschi sono ciascuno da 5 kJ e contengono 0,25 grammi di polvere di alluminio, vengono collegati tra loro da un filo metallico per essere fissato ai morsetti dei supporti.

La sfera quindi viene chiusa in sicurezza e i detonatori vengono collegati dai cavi provenienti da KSEP 310, si accende il compressore e si inizia a portare a 20 bar l'interno del portacampione. Tramite un interruttore si aziona la pompa a vuoto, con la valvola di sfiato chiusa la pompa aspira l'atmosfera interna e crea il grado di vuoto desiderato (-0.6 bar). Il test è azionato da pc collegato alla piattaforma di controllo KSEP 332.

Prima di ogni serie di test si devono eseguire un test check e test con un campione di riferimento, nel caso la Niacina.

Tra un test e l'altro è molto utile eseguire un test check, ovvero un test senza detonatori ne campione, utile al controllo del funzionamento meccanico dei vari organi della sfera, ovvero il funzionamento dell'elettrovalvola e la tenuta al vuoto. Per sapere invece se i trasduttori sono tarati, bisogna fare il test con Niacina, il campione di riferimento per il calcolo del Kst. Alla sfera è allegata una scheda di controllo, gli operatori del laboratorio devono verificare se il test effettuato dia risultati nei limiti dei test eseguiti in precedenza.

A fine prova, ovviamente effettuata sotto una cappa di aspirazione che deve rimanere accesa per tutta la notte successiva alla prova, si sfiata e in modalità emergenza si apre la sfera. Poi tramite aspiratore ATEX si pulisce la sfera eliminando i residui di combustione e i detonatori esplosi.

L'utilizzo di fonti d'innesco altamente energetiche (come i detonatori da 5 kJ utilizzati da normativa UNI EN 14034) può falsare il test nella sfera Siwek [28] a causa del fenomeno dell'overdriving, ovvero un fenomeno che avviene quando l'innesco usato nella sfera preriscalda e brucia la nube polverosa generata, ciò sovrastima i parametri di Pmax e Kst, quindi è conveniente testare i campioni anche con detonatori da 1 kJ che vengono utilizzati per la determinazione del LEL.

3.3 TEST IN CIECO PER LA MISURA DELLA DISPERDIBILITÀ

Il test è stato sviluppato nel laboratorio di Sicurezza Industriale sulle Atmosfere Esplosive del Politecnico di Torino ed ha lo scopo di determinare il comportamento delle particelle fini presente nei campioni fibrosi da trattare. Viene eseguito da ogni addetto al laboratorio, non avendo dei riscontri da dati standard, ed è un test di tipo qualitativo. Ogni operatore esegue il test, in cieco rispetto ai risultati ottenuti dagli altri operatori in modo da garantire la validità del test

Klippel et al. [29] definiscono la disperdibilità di una polvere come la sua tendenza a generare delle particelle fini aerodisperse, ovvero la tendenza di una polvere a formare una nube che resti sospesa in aria. Il test di Klippel è pensato per le polveri tradizionali ed è di tipo quantitativo.

Il test qualitativo è pensato anche per le polveri di natura fibrosa, quindi è interessante testare ogni campione in modo da potergli attribuire un indice di disperdibilità (DI) e cercare di correlare i parametri di esplosività degli stessi campioni ai corrispettivi indici valutati.

Il test prevede 3 prove:

1. Test per valutare la tendenza del campione a liberare particelle fini.
2. Test per valutare la tendenza del campione a formare agglomerati durante la sedimentazione.
3. Test per valutare il comportamento del campione al sollevamento tramite sbuffo di aria in pressione.

I primi due test vengono eseguiti in un contenitore di vetro, il terzo test invece è eseguito con l'ausilio del dispositivo Hartmann senza l'uso di inneschi vari.



Figura 3.11: Tubo Hartmann usato nelle prove in cieco per valutare l'indice di disperdibilità

Ad ogni test si dà una valutazione da 1 a 3 come la Tabella X riporta, la somma dei punteggi dei tre test fornisce l'indice di disperdibilità valutato internamente in laboratorio e definito come dustability index (DI).

Tabella 3.1: Test in cieco per il calcolo del dustability index

Punteggio:	1	2	3
1° test	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 ad occhio nudo si rileva la formazione di una nube di particelle fini in aria
2° test	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.
3° test	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.	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.



Figura 3.12: Campione prima della prova nel tubo Hartmann



Figura 3.13: Campione di polvere disperso dopo la prova

3.4 SVILUPPO DI METODI PER LA MISURA DELLA DISPERDIBILITÀ

Per cercare di ricreare un test per la misura della disperdibilità di tipo quantitativo oltre che di tipo qualitativo come quello di Klippel per le polveri tradizionali, si è pensato di progettare una camera di dispersione in plexiglass (Figura 3.13), di misura 30x50x120 cm.

Il progetto nasce dal fatto che i nostri campioni di natura fibrosa non si disperdono bene nelle apparecchiature standard utilizzate per le polveri tradizionali, quindi risulta difficoltoso lo studio dello stesso. L'idea è quella di ricreare uno strato di polvere colpita da un'onda di pressione, a seguito del quale è possibile vedere il comportamento delle particelle fini (come si disperdono e in che quantità lo fanno)

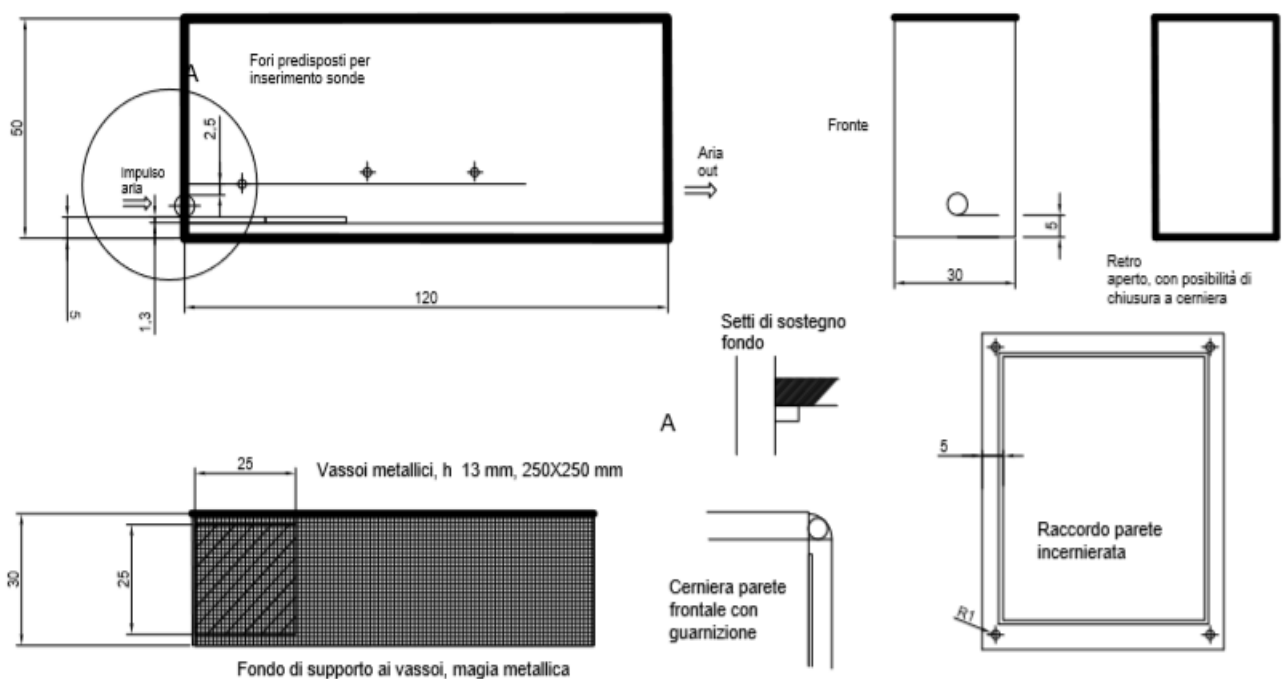


Figura 3.14: Progetto della camera di dispersione

La camera presenta dei setti di sostegno interni in cui poter appoggiare delle griglie metalliche di misura 250x250 mm. Il fronte della camera presenta un imbocco per il sistema dell'aria compressa ed è chiuso con delle cerniere con guarnizione. Il retro è aperto con possibilità di chiusura con cerniera in modo da poter essere facilmente apribile per svolgere le dovute operazioni.

Le griglie possono essere fino a quattro, su ogni griglia viene posizionato uno strato di polvere fibrosa tal quale, ovvero i flocks. Un impulso di aria compressa ha il compito di sollevare una nube dentro la camera, può provenire da sotto o da sopra la griglia. L'aria compressa è inviata a 3 bar tramite elettrovalvola da un barilotto di 0,55 litri che accumula l'aria compressa di rete a 8 bar, a monte del barilotto vi è una valvola riduttrice di pressione e una leva manuale di carico.

L'obiettivo è quello di valutare qualitativamente come si disperde la polvere orizzontalmente e quantitativamente quanta polvere si è dispersa, pesando tutto ciò che è presente sulla griglia prima e dopo il test.

La camera presenta dei fori per le sonde o eventuali inneschi, l'idea è di avere delle videocamere e registrare con vari fotogrammi come si comporta la nube nella sua generazione e nel suo eventuale innesco, valutando la velocità di propagazione del fronte di fiamma.

4 RISULTATI E DISCUSSIONE DEI RISULTATI

In questo capitolo verranno presentati tutti i campioni testati, tutti i risultati dei test effettuati e i commenti di questi risultati.

I campioni testati sono tutti di origine animale e fanno tutti parte della filiera della lana.

Tabella 4.1: Lavorazione e luogo di campionamento dei campioni testati

Campione	Tipo di fibra	Tipo di lavorazione	Luogo di campionamento
A	Animale-Lana	Tessitura (orditura)	Ambiente di lavoro
B	Animale-Lana	Tessitura (orditura)	Ambiente di lavoro
C	Animale-Lana	Roccatura	Ambiente di lavoro
D	Animale-Lana	Roccatura	Impianto di aspirazione del reparto
E	Animale-Lana	Roccatura	Impianto di aspirazione del reparto
F	Animale-Lana	Filatura (filatura pettinata)	Macchinari
G	Animale-Lana	Filatura (filatura pettinata)	Ambiente di lavoro
H	Animale-Lana	Preparazione filatura	Ambiente
I	Animale-Lana	Preparazione filatura	Ambiente
J	Animale-Lana	Cardatura	Ambiente di lavoro
K	Animale-Lana	Cardatura	Macchinari
L	Animale-Lana	Cardatura e pettinatura	Filtro dei locali di carderia
M	Animale-Lana	Spazzolatura	Ambiente di lavoro
N	Animale-Lana	Battitura e Cardatura	Ambiente di lavoro
O	Animale-Lana	Tessitura	Impianto di aspirazione del reparto
P	Animale-Lana	Lavaggio	Washing filter - washing box
Q	Animale-Lana	Asciugatura	Washing filter - dryer outcome
R	Animale-Lana	Preparazione carderia	Ambiente di lavoro

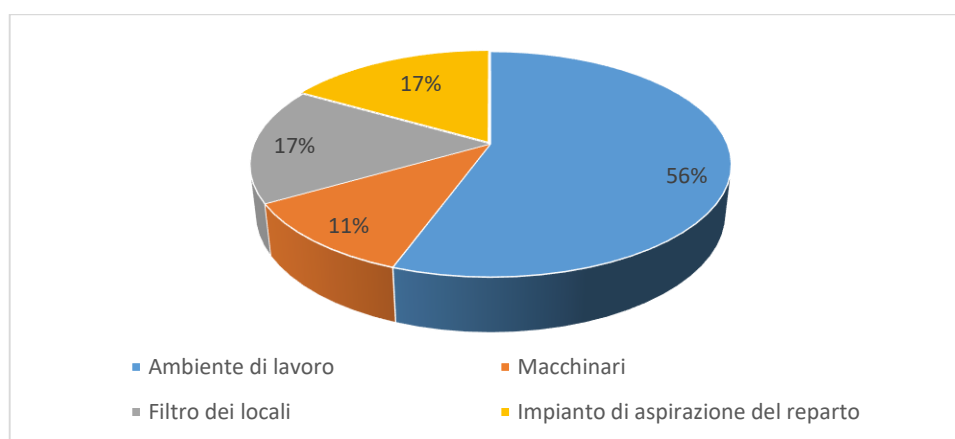


Figura 4.1: Luoghi di campionamento dei flock testati

Dalla Figura 4.1 si nota che il 56 % dei campioni è stato prelevato dagli ambienti di lavoro, ovvero dagli strati che si sono formati nel reparto per sedimentazione delle polveri disperse in aria. Un 17% invece è stato prelevato direttamente dai macchinari in cui sono stati trattati (il campione F ad esempio è stato prelevato dal filatoio mentre il campione K probabilmente è stato prelevato dalla carda), un altro 17% proviene dai filtri del macchinario o dei locali (i campioni P e Q provengono ad esempio dal filtro di lavaggio della lana grezza mentre il campione L proviene dal filtro del locale di carderia e pettinatura). L'ultimo 11% invece proviene dall'impianto di aspirazione del reparto, di questi ne abbiamo 2 provenienti dal reparto di filatura in cui avviene la roccatura del filato.

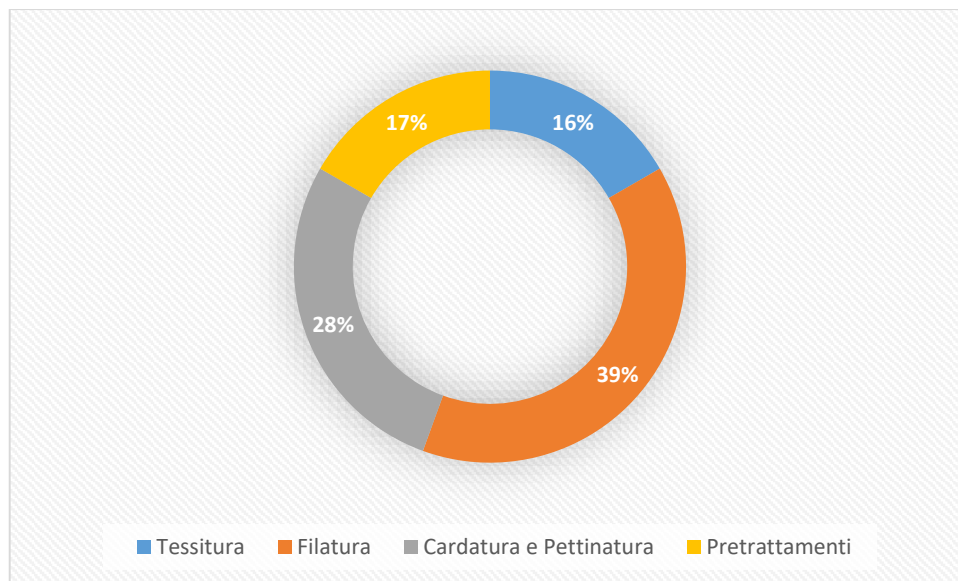


Figura 4.2: *Reparto di provenienza dei campioni testati*

Come mostrato nel grafico di Figura 4.2, Il 17% dei campioni proviene dal reparto dei pretrattamenti o preparazione alla carderia dove viene lavorata la lana grezza e sporca, il 28% invece proviene dai reparti di carderia e pettinatura dove avviene la separazione delle fibre. Il 39% dei campioni proviene dai reparti di filatura, in cui avviene la preparazione, la filatura stessa e la roccatura; Il 16% rimanente proviene dal reparto di tessitura in cui avviene l'orditura.

La denominazione dei campioni testati è stata semplificata rispetto a quella adottata dal Centro Sperimentale Sicurezza Industriale e Atmosfere Esplosive del Politecnico di Torino.

I campioni testati sono nelle immagini da Figura 4.3 a Figura 4.19:



Figura 4.3: Campione G



Figura 4.4: Campione J



Figura 4.5: Campione A.



Figura 4.6: Campione B.



Figura 4.7: Campione C.



Figura 4.8: Campione K.



Figura 4.9: Campione R.



Figura 4.10: Campione O.



Figura 4.11: Campione F

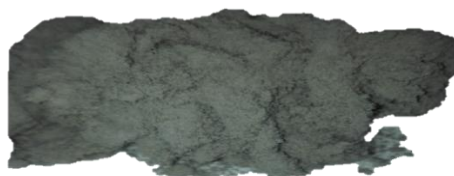


Figura 4.12: Campione L



Figura 4.13: Campione H

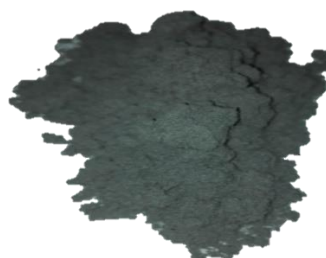


Figura 4.14: Campione I



Figura 4.15: Campione E



Figura 4.16: Campione M

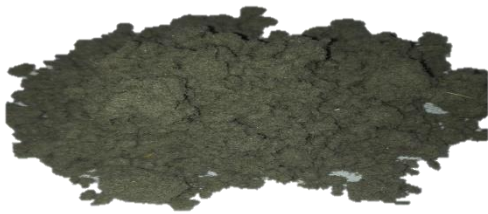


Figura 4.17: Campione N



Figura 4.18: Campione P



Figura 4.19: campione Q

4.1 CARATTERIZZAZIONE DEI CAMPIONI

Ogni campione è stato setacciato e testato al granulometro laser, per determinare la distribuzione granulometrica e la quantità di particelle al di sotto dei 500 μm .

Tabella 4.2: Distribuzione granulometrica dei campioni

Campione	d10	d50	d90
A	5,463	23,896	0,966
B	3,107	19,772	159,601
C	4,887	39,801	350,489
D	2,504	6,756	53,397
E	2,684	7,592	63,132
F	3,057	13,706	261,485
G	2,528	6,588	18,463
H	7,209	33,624	401,048
I	11,699	35,929	282,83
J	Nd	Nd	Nd
K	12,352	59,344	341,081
L	2,481	14,278	37,509
M	13,157	56,174	189,651
N	Nd	Nd	Nd
O	11,249	52,658	234,191
P	Nd	Nd	Nd
Q	Nd	Nd	Nd
R	6,41	55,181	380,552

In Tabella 4.2 vengono presentati i risultati ottenuti dalla misura del granulometro laser, esso fornisce i percentili di riferimento del campione, cioè la misura granulometrica riferita al 10, al 50 e al 90 % in peso del campione. Tutti i campioni presentano una misura granulometrica inferiore ai 500 μm . Il campione J non è stato testato per la difficoltà di disperdere lo stesso nel granulometro.

Tabella 4.3: Risultati delle setacciature dei 18 campioni

Campione	>2 mm	2 mm x 1 mm	1 mm x 500 µm	<500 µm
A	22,8%	0,76%	2,54%	73,9%
B	10,3%	9,91%	7,27%	72,5%
C	69,3%	0,63%	1,67%	28,4%
D	4,78%	5,26%	10%	79,9%
E	11,3%	0,44%	3,32%	85%
F	34,7%	0,48%	1,38%	63,5%
G	37,3%	0,11%	0,86%	61,72%
H	18,1%	4,44%	13,1%	64,4%
I	11%	2,02%	8,67%	78,3%
J	44,4%	0,95%	5,01%	49,6%
K	4,2%	3,02%	7%	85,8%
L	7,47%	0,12%	1,31%	91,1%
M	55,1%	0,4%	0,6%	43,9%
N	1,2%	19,7%	19,4%	59,6%
O	<0,1%	17,6%	6,13%	76,3%
P	1,60%	1,4%	4,3%	95,8%
Q	<0,1%	<0,1%	<0,1%	99,9%
R	67%	0,57%	5,28%	27,1%

Tutti i campioni presenti in Tabella 4.3 sono stati setacciati con l'ausilio di tre griglie con vagliatura diversa, un vaglio da 2 mm, uno da 1 mm e 1 da un 500 µm. La maggior parte dei campioni setacciati presenta un elevato contenuto di particelle fini.

I campioni un po' più difficoltosi da testare sono stati il campione R e il campione C, hanno una percentuale superiore al 60% in peso di campione sopravaglio del setaccio più grossolano, con maglia 2 mm. Ciò è dovuto o alla presenza di poco particolato fine nel campione o alla difficoltà stessa delle particelle di liberarsi dal flock in cui sono intrappolate.

I campioni più semplici da setacciare sono stati il campione L, il campione P e il campione Q, questi tre campioni provengono dai filtri dei locali di tessitura e dai trattamenti preliminari (filtri di lavaggio). Altri facilmente setacciabili sono stati i campioni O, D ed E, raccolti tutti nell'impianto di aspirazione del reparto di tessitura e filatura (roccatura), i campioni K ed I provenienti rispettivamente dai macchinari della carderia e dall'ambiente dove avvengono le preparazioni per la filatura.

Infine i campioni tal quali sono stati fotografati al microscopio elettronico in modo da valutare il diametro medio delle particelle presenti nel campione.

Tabella 4.4: Diametro medio misurato al microscopio elettronico

Campione	Diametro microscopio
A	17 μm
B	20 μm
C	21 μm
D	17,6 μm
E	22,27 μm
F	9 μm
G	15 μm
H	21,67 μm
I	20,36 μm
J	15 μm
K	39 μm
L	23,242 μm
M	16,8 μm
N	19,871 μm
O	13 μm
P	21,173 μm
Q	20,588 μm
R	41 μm

In Tabella 4.4 i risultati dei test al microscopio elettronico, il campione F presenta il diametro medio più piccolo pari a 9 μm mentre il campione R ha il diametro medio più alto, pari a 41 μm .

In generale il loro diametro medio è compreso tra i 10 e i 20 micrometri.

4.2 RISULTATI DEI TEST DI INNESCO A TEMPERATURA AMBIENTE

Questo test serve a determinare se un campione di polvere può essere definito esplodibile a temperatura ambiente. Tutti i campioni sono stati testati con il tubo Hartmann con innesco ad arco continuo (energeticamente più debole) e in caso di fallimento è stato eseguito il test con il tubo Hartmann con innesco il filo caldo.

Tabella 4.5: Risultati test in tubo Hartmann

<i>Campione</i>	Test Arco continuo	Test filo caldo
<i>A</i>	SI (III/0,3)	NE
<i>B</i>	SI(I/0,3)	NE
<i>C</i>	SI (II/0,3)	NE
<i>D</i>	NO	SI(0,3/0,5)
<i>E</i>	NO	SI(I/0,3)
<i>F</i>	NO	NO
<i>G</i>	SI (II/0,3)	NE
<i>H</i>	NO	NO
<i>I</i>	SI(IX/0,5)	NE
<i>J</i>	SI (IV/0,3)	NE
<i>K</i>	SI (I/1,0)	NE
<i>L</i>	NO	SI(VII/0,3)
<i>M</i>	NO	SI (I/0,3)
<i>N</i>	NO	SI (V/0.3)
<i>O</i>	SI (VII/0,3)	NE
<i>P</i>	SI (I,1)	NE
<i>Q</i>	NO	SI (I,0.3)
<i>R</i>	SI (VII/1,0)	NE

Dalla tabella 4.5 si nota che undici campioni su diciotto totali si sono innescati nel Test ad arco continuo, sette sono avvenuti durante il test con 0,3 grammi di campione, uno con il test a 0,5 di campione e tre con 1 grammo di polvere. Tra questi il campione D ha dato un innesco insolito al primo tentativo nella prova a 0,3 grammi con innesco ad arco continuo, non ripetuta nelle verifiche successive, poi si è innescato nel test con il filo caldo

I campioni che non si sono infiammati nell'arco continuo sono stati testati nel tubo con il filo caldo, la scritta NE significa che il test non è stato eseguito, perché si era già verificato un innesco con l'arco.

Sei su otto dei test eseguiti hanno avuto successo, ovvero si è ottenuto un innesco, tutti con concentrazione di campione pari a 305 g/m^3 . I campioni F ed H sono stati classificati come non esplodibili a temperatura ambiente, in quanto non sono risultati inneschi in nessuna delle due prove.

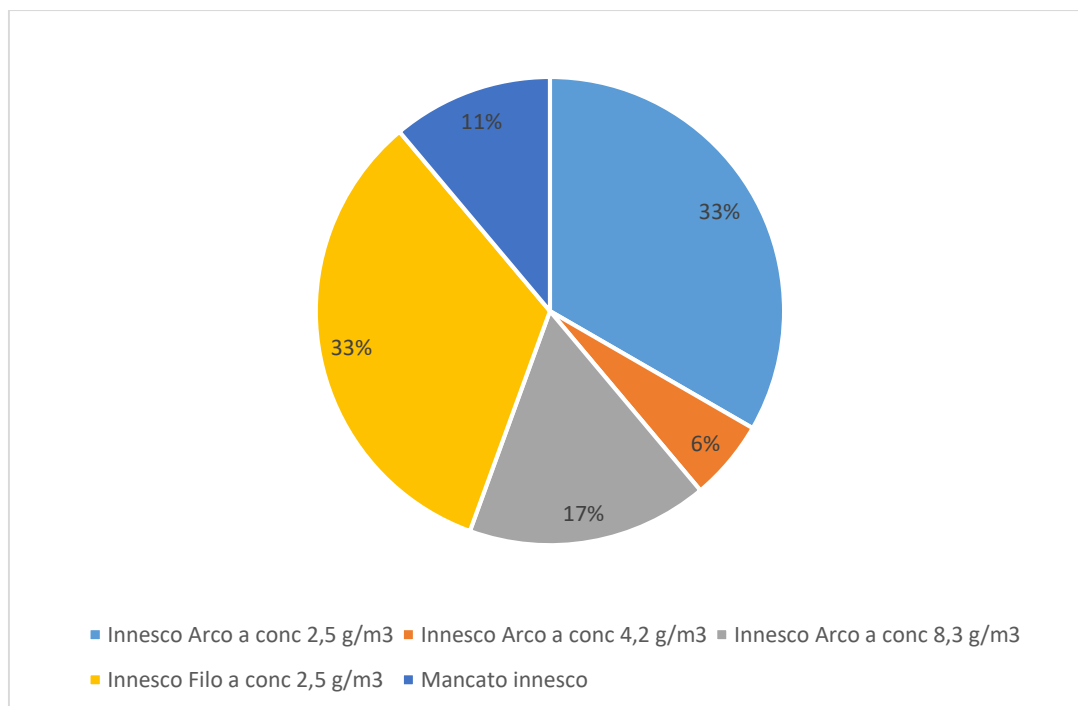


Figura 4.20: Percentuali di innesco dei campioni nelle diverse prove

Il 66 % dei campioni si è innescato a basse concentrazioni, tra tubo Hartmann con innesco ad arco continuo e innesco con filo caldo.

I due campioni classificati come non esplodibili a temperatura ambiente dovevano essere testati ad alte temperature (come previsto dalla procedura del test di screening), ciò non è stato possibile per difficoltà nel disperdere un materiale così disomogeneo e voluminoso, causa delle dimensioni ridotte del portacampione e della valvola del forno GG, pensato per polveri con particelle sferiche.

4.3 DETERMINAZIONE DEI PARAMETRI KST E PMAX

Tutti i campioni setacciati sono stati testati nella sfera Siwek da 20 litri.

Tabella 4.6: Risultati del test in sfera Siwek

Campione	Kst	Pmax
A	126	7,6
B	82,8	7,8
C	53,1	6,3
D	94,5	6,9
E	81,7	6,7
F	96	6,7
G	52	6,6
H	86,2	6,6
I	60,37	6,1
J	44,8	6,1
K	46,1	6,9
L	73,8	6,3
M	110,3	6,4
N	40,5	6
O	110	7,2
P	60,1	6
Q	48	5,9
R	97,4	6,7

Nella Tabella 4.6 sono mostrati i risultati dei test effettuati nella sfera Siwek da 20 litri, tutti i campioni fanno parte della classe St 1. Le prove sono state fatte con due inneschi chimici Simex da 5 kJ. Il campione che presenta il valore più alto di Kst è il A, proveniente dal reparto di tessitura mentre il valore più basso (campione N) proviene dall'ambiente di lavoro di battitura e carderia. Il valore di pressione massima generata all'interno della sfera è stato ottenuto testando il campione B, anch'esso proveniente dal reparto di tessitura, il valore più basso di pressione massima invece è stato registrato per il campione Q proveniente dai filtri di lavaggio e asciugatura della lana grezza.

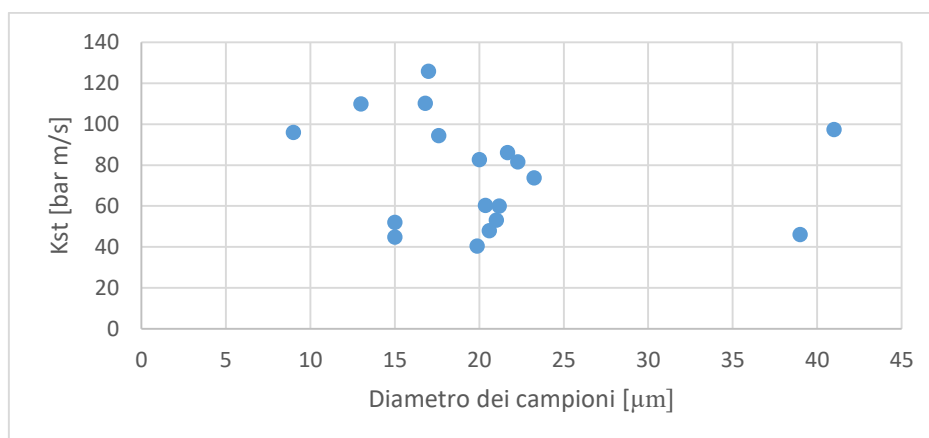


Figura 4.21: Dipendenza del Kst dal diametro delle fibre dei campioni

Dal grafico a dispersione di Figura 4.22 si nota una leggera dipendenza del Kst dalla dimensione delle fibre, escludendone alcuni si può vedere una certa dipendenza, con i valori più bassi di diametro troviamo i valori più elevati di Kst (analogamente a ciò che succede con particelle sferiche) e via via crescendo il diametro il valore di Kst scende. Ovviamente non è solo il diametro ad influenzare questo parametro.

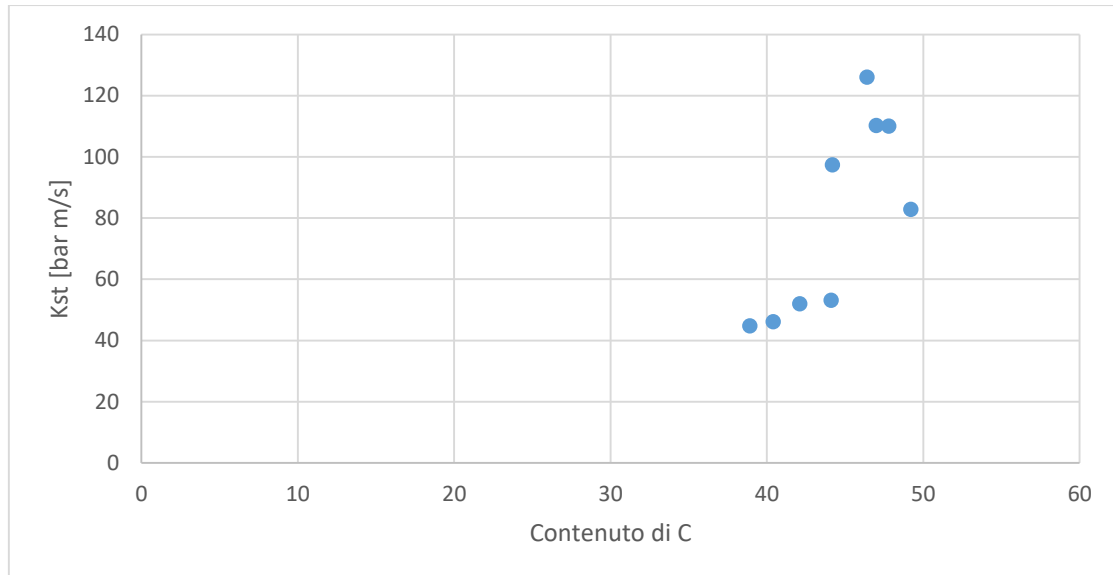


Figura 24: Kst di alcuni campioni in funzione del contenuto di carbonio.

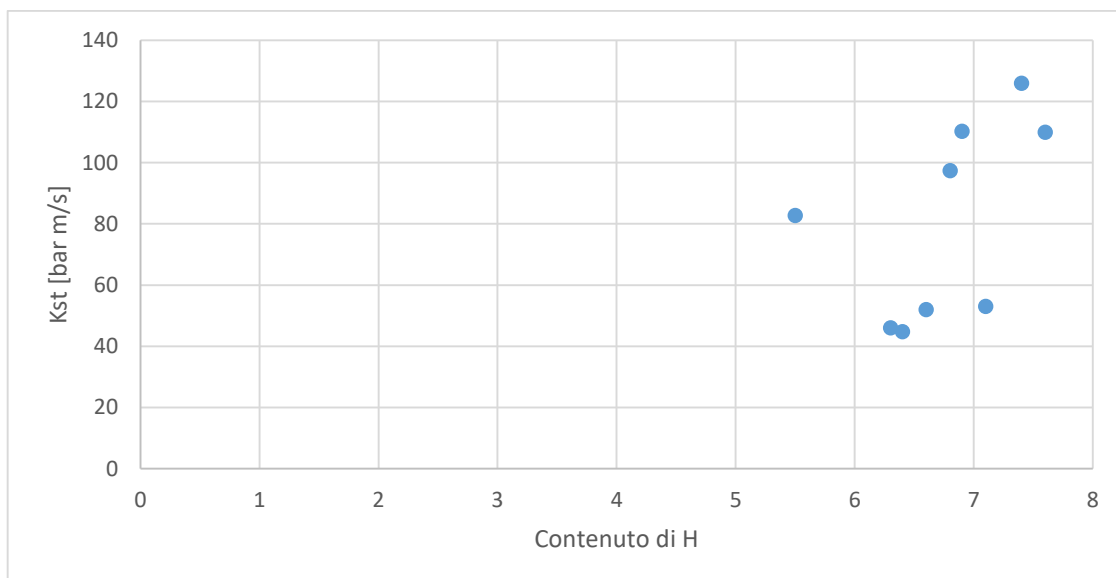


Figura 4.23: Kst di alcuni campioni in funzione del contenuto di idrogeno

Da Figura 4.23 a Figura 4.24 vengono mostrate le dipendenze tra il Kst e il contenuto rispettivamente di Carbonio, Idrogeno e Azoto. Ai fini teorici (e quindi di un'eventuale esplosione), aumentando il contenuto di Carbonio e di Idrogeno si incrementa l'efficacia della reazione, di conseguenza la violenza dell'esplosione, ovvero il Kst tende ad aumentare. Dalle Figure si osserva come a valori più elevati di C si ha una tendenza a valori più elevati di Kst, mentre per quanto riguarda l'Azoto dovrebbe avvenire il fenomeno opposto, ovvero aumentando il contenuto di Azoto il valore di Kst dovrebbe diminuire, ciò non è visibile dalla Figura X essendo il Kst funzione di molte variabili.

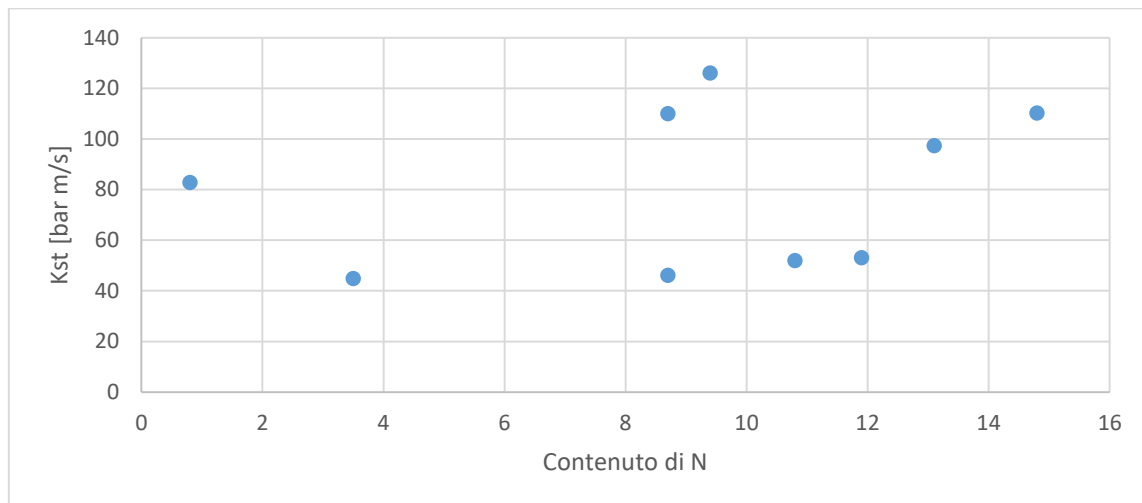


Figura 4.24: Kst di alcuni campioni in funzione del contenuto di Azoto

4.4 RISULTATI DEL TEST IN CIECO PER LA DISPERSIONE DI POLVERI FIBROSE

Questo test è stato eseguito da tre operatori del laboratorio di Sicurezza Industriale sulle Atmosfere Esplosive del Politecnico di Torino, i risultati dei tre test sono stati mediati. Il test fornisce per ogni campione un indice di disperdibilità compreso tra il valore minimo di 3 (somma delle tre prove con risultati da 1 a 3 per ognuna di esse) e un valore massimo di 9.

Tabella 4.7: Indice di Disperdibilità medio per ogni campione

Campione	Indice di Disperdibilità medio
A	6,33
B	7
C	5,5
D	7
E	7,5
F	7,5
G	6,67
H	6,5
I	7
J	6
K	6
L	8
M	8
N	6,5
O	7,33
P	6,5
Q	6,5
R	5,67

I campioni L ed M presentano l'indice di disperdibilità medio maggiore e pari a 8, il minore lo si trova per il campione C e per il campione R che presentano un indice inferiore di 6.

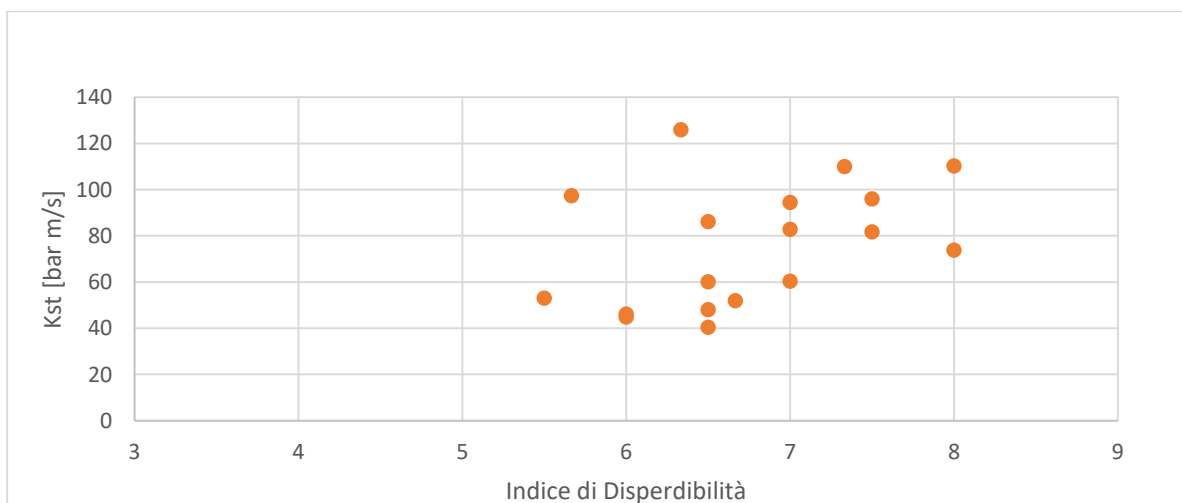


Figura 425.25: Variabilità del Kst con l'indice di disperdibilità.

Nella Figura 4.25 vengono correlati il parametro Kst e gli indici di disperdibilità medi valutati a seguito del test in cieco di tutti i campioni.

La dipendenza tra i due parametri sembra di natura lineare, i campioni provengono da diverse lavorazioni e reparti per cui si è deciso di scremare i dati in base alle lavorazioni che hanno subito, in modo da verificare se effettivamente la dipendenza può essere ritenuta lineare.

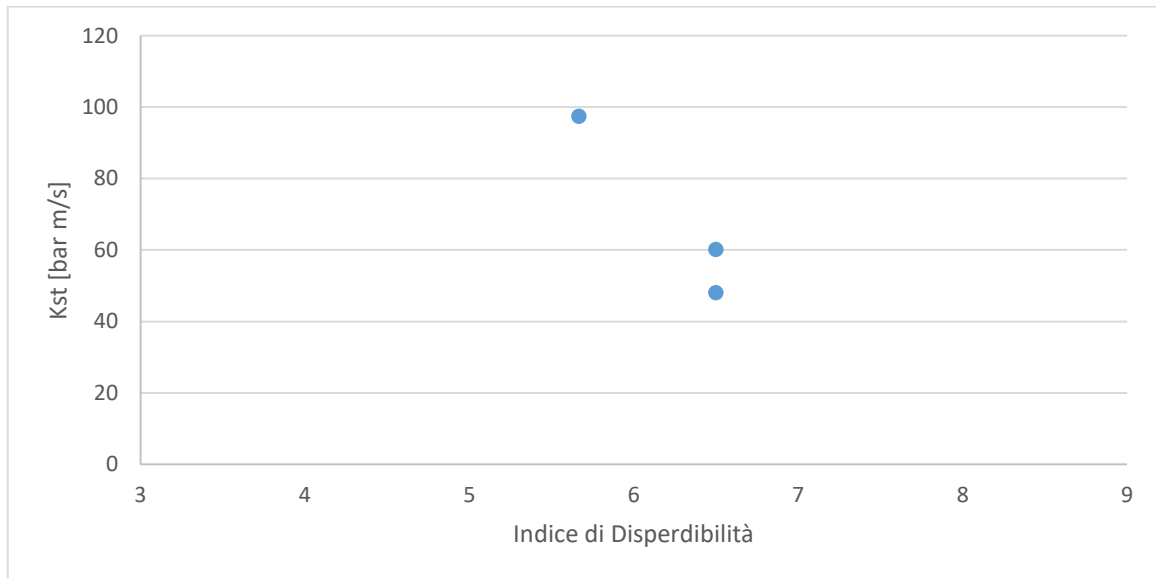


Figura 4.26: Kst in funzione dell'indice di disperdibilità nella sezione dei pretrattamenti

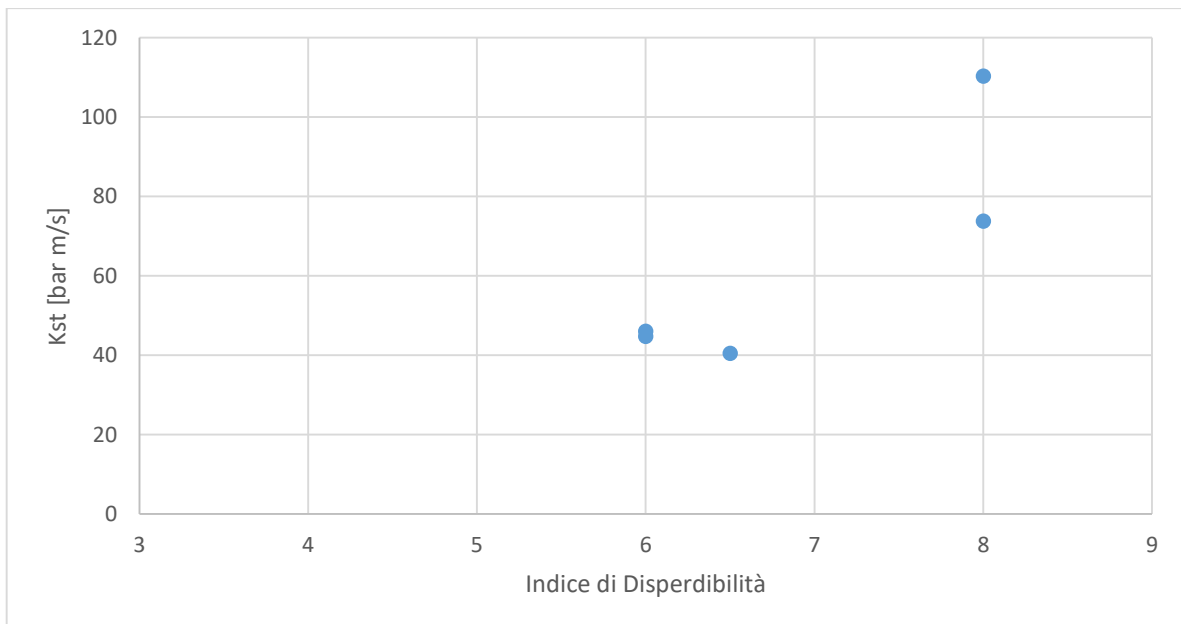


Figura 4.27: Kst in funzione dell'indice di disperdibilità nella sezione di cardatura e pettinatura

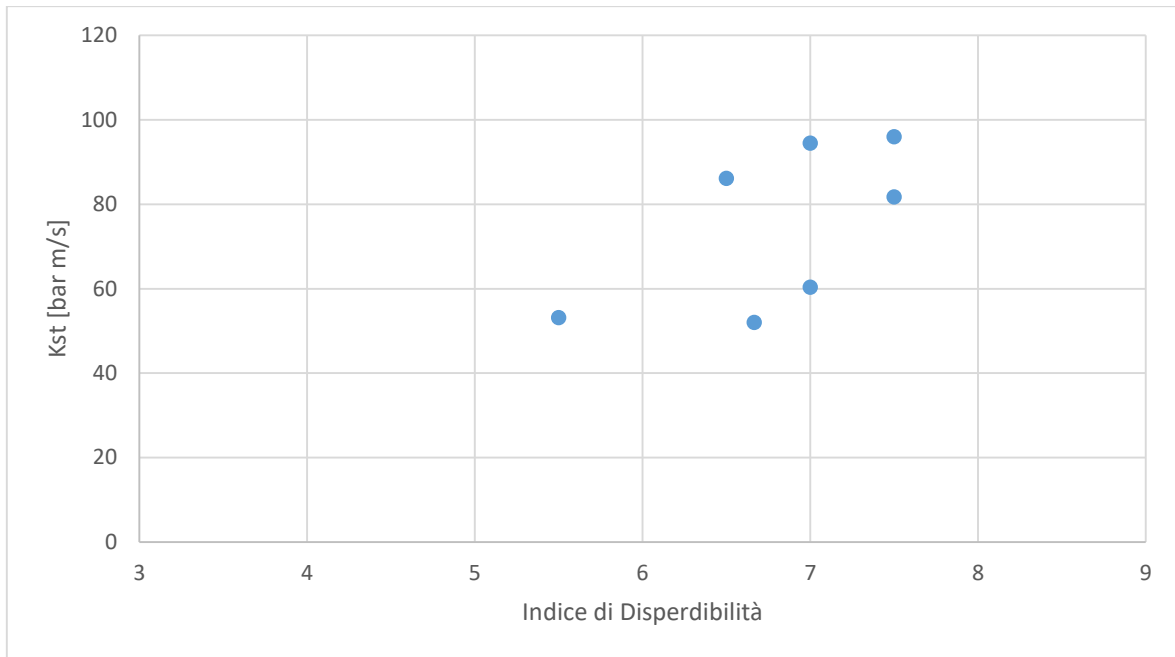


Figura 4.28: *Kst in funzione dell'indice di disperdibilità nella sezione di filatura e roccatura*

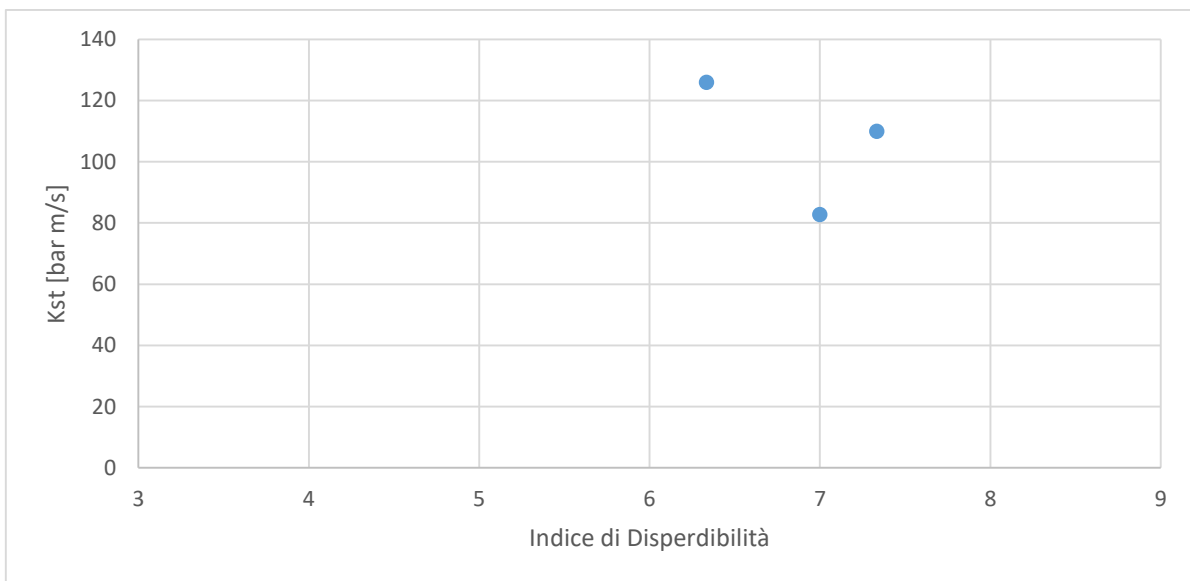


Figura 4.29: *Kst in funzione dell'indice di disperdibilità nella sezione di tessitura*

Dai quattro grafici precedenti si può osservare un andamento tendenzialmente lineare del Kst in funzione dell'indice di disperdibilità per diversi settori di lavorazione.

Nella Figura 4.26 viene mostrato il Kst in funzione dell'indice di disperdibilità dei campioni provenienti dai pretrattamenti del ciclo laniero, scende all'aumentare dell'indice di disperdibilità, anomalo il comportamento del campione R che presenta un elevato valore di Kst pur avendo un indice di dispersione basso e un diametro medio più alto rispetto agli altri campioni testati dello stesso reparto, ciò può essere causato per esempio da altre variabili che influenzano il Kst o dal meccanismo di dispersione.

Per quanto riguarda la Figura 4.27 e la Figura 4.28 per le sezioni di cardatura e filatura i dati sembrano rispecchiare una linearità tra il Kst e i valori dati dal test in cieco, ad alti valori dell'indice di disperdibilità corrispondono più elevati valori di Kst. Per i trattamenti di tessitura (Figura 4.29) invece, i campioni testati hanno presentato una linearità inversa, con il campione B con un valore di Kst più basso e un indice di disperdibilità più alto rispetto agli altri campioni. Ovviamente essendo la misura del test di tipo oggettivo, la differenza tra i valori assegnati esigua e le caratteristiche chimico fisiche tra i campioni differenti, i dati possono essere ritenuti coerenti con gli altri testati, ma non essendo presente un riscontro con altri campioni dello stesso reparto non è possibile verificare la linearità tra i due parametri in questo caso.

Nelle figure successive verranno presentati alcuni grafici del Kst in funzione dell'indice di disperdibilità dei campioni testati per coppie di reparto e per luoghi di campionamento.

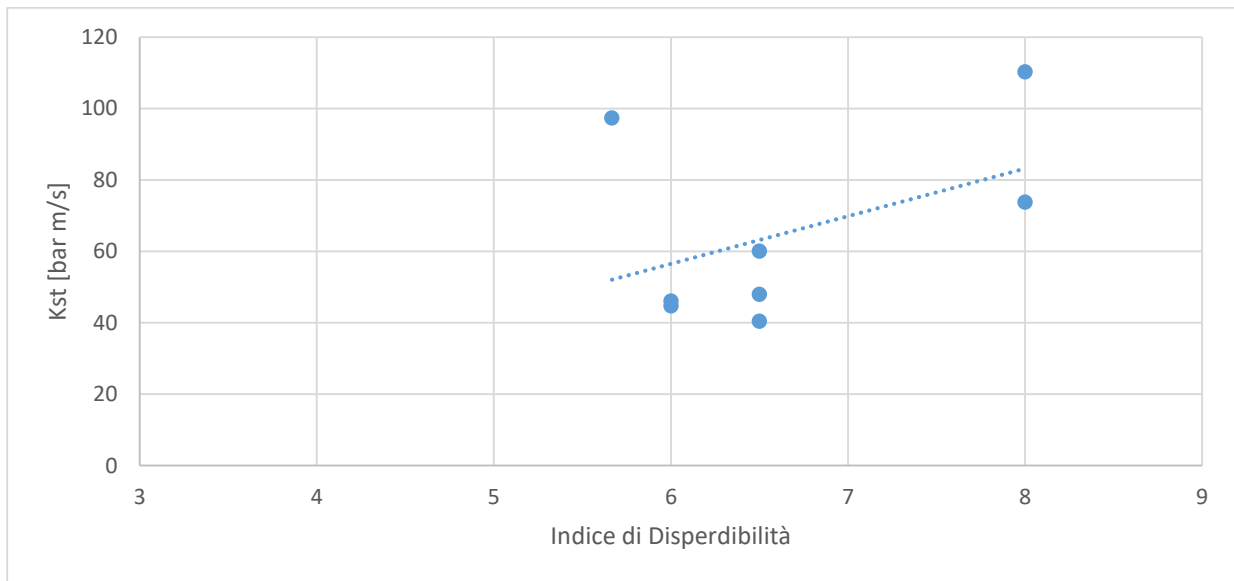


Figura 4.30: *Kst in funzione dell'indice di disperdibilità nei settori di preparazione e carderia*

In questo gruppo di campioni sembra esserci una linearità tra Kst e indice di disperdibilità, il campione R abbassa la pendenza della linea di tendenza dei dati.

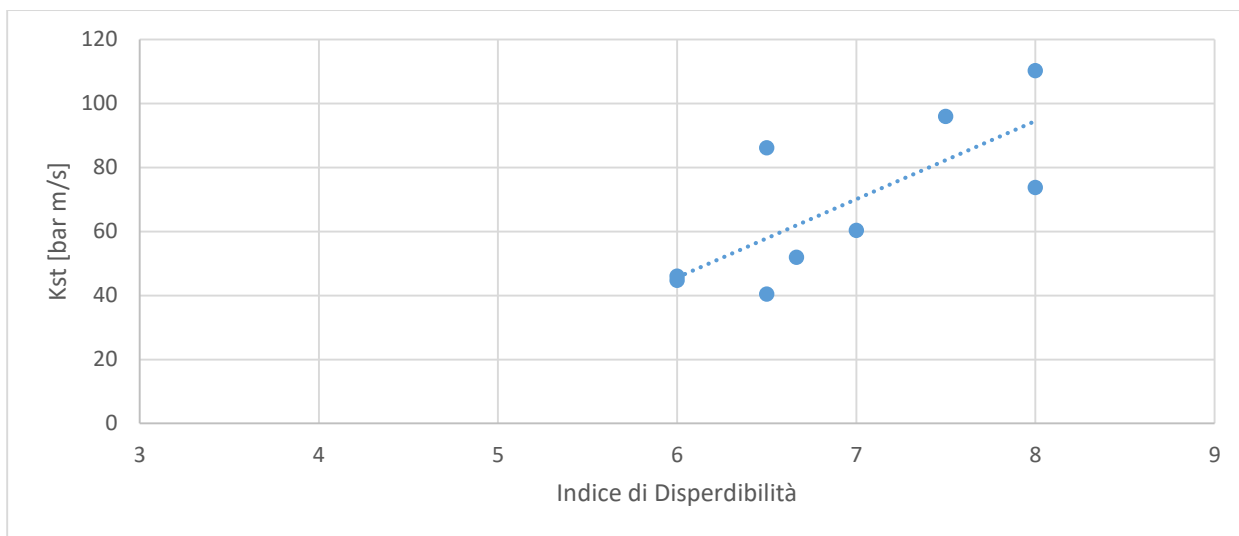


Figura 4.31: *Kst in funzione dell'indice di disperdibilità nei settori di carderia e filatura*

In questi altri campioni, provenienti da carderia e filatura, si nota bene una forte tendenza lineare tra il Kst e l'indice di disperdibilità, con pendenza positiva della linea di tendenza dei dati.

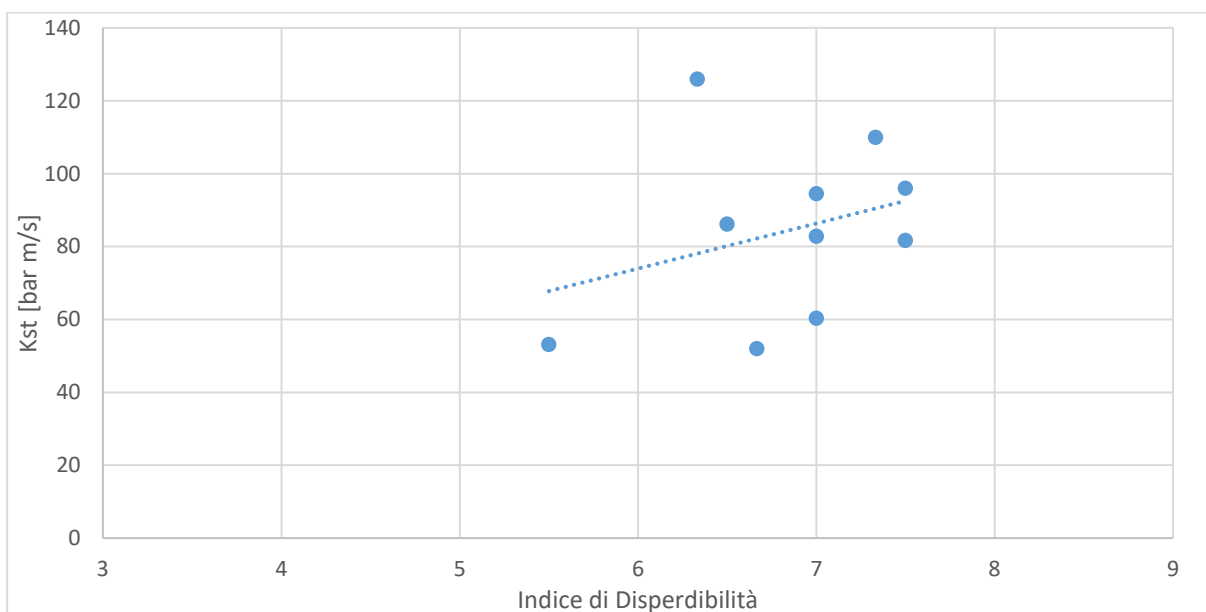


Figura 4.32: *Kst in funzione dell'indice di disperdibilità dei campioni delle sezioni di filatura, roccatura e tessitura.*

In Figura 4.32 la linearità tra le due variabili sembra meno pendente rispetto ai casi visti prima, la presenza del campione A con alto valore di Kst e un indice di disperdibilità non troppo elevato fanno abbassare un po' la pendenza della linea di tendenza dei dati.

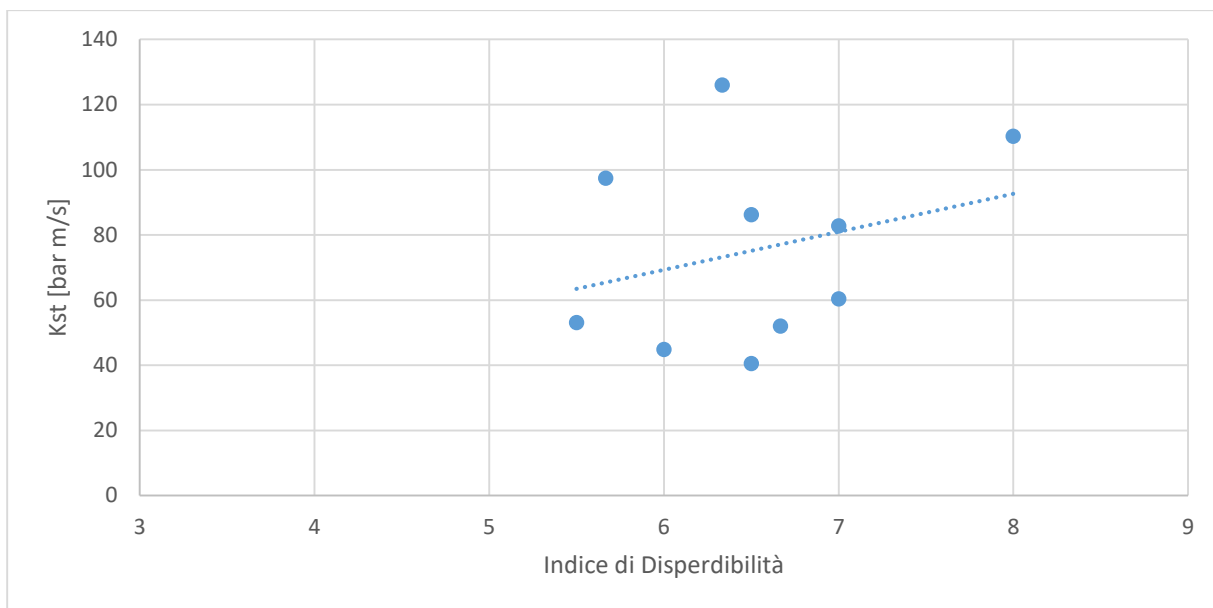


Figura 26.33: *Kst in funzione dell'indice di disperdibilità per i campioni provenienti dall'ambiente di lavoro e dai macchinari.*

Dai campioni raccolti nell'ambiente di lavoro si nota una dipendenza lineare dei parametri dei dati, la pendenza della linea di tendenza dipende anche qui dalla presenza dei campioni A ed R.

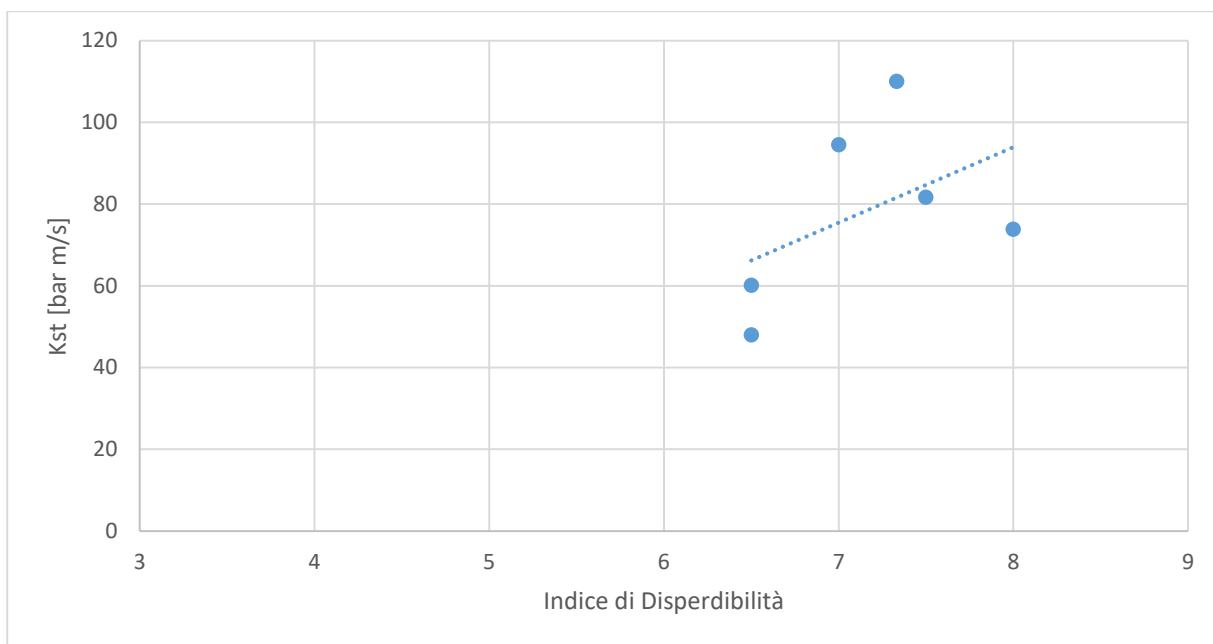


Figura 4.34: *Kst in funzione dell'indice di Disperdibilità dei campioni provenienti dai filtri dei locali e dall'impianto di aspirazione del reparto*

Anche in questo grafico si può vedere la dipendenza lineare crescente del Kst con l'indice di disperdibilità, i campioni provengono dall'impianto di aspirazione e dai filtri dei vari locali.

Con i dati presentati si può dire che tutti i locali sono a rischio esplosione da polveri, i campioni della sezione dei pretrattamenti presentano indici di disperdibilità bassi, i campioni P e Q (provengono da filtri di macchine di lavaggio e asciugatura della lana grezza) hanno un'elevata quantità di fini e sono risultati poco disperdibili, forse per la presenza di grassi o oli presenti nello stesso che ne favoriscono l'aggregazione o per un contenuto di umidità elevato nel campione tal quale. Il campione R invece presenta un diametro medio delle fibre elevato ed è risultato poco disperdibile per la poca presenza dei fini, particelle che nel test in sfera hanno dato un K_{st} vicino ai 100 bar m/s.

I reparti come la cardatura, la filatura e la tessitura sono risultati equamente a rischio, con alcuni campioni della cardatura molto polverosi (campioni L ed M) o i campioni presi dall'impianto di aspirazione di locali di filatura e roccatura (D ed E), mentre il campione C dello stesso reparto è risultato poco disperdibile per la poca presenza di particelle fini nel campione tal quale.

Sono necessarie ulteriori campagne sperimentali su altri campioni da settori diversi di lavorazione o test differenti per stabilire effettivamente una chiara dipendenza lineare delle due variabili, anche se, come già riportato in letteratura [12], la disperdibilità (o polverosità) dei campioni è sicuramente una variabile che insiste positivamente sulla capacità delle polveri di esplodere (creare nubi all'interno del range di infiammabilità).

5 CONCLUSIONI

Questo lavoro di tesi è stato svolto per approfondire le tematiche riguardanti la sicurezza industriale, nello specifico approfondisce lo studio riguardante le polveri di natura fibrosa, scarti della filiera della lana e più in generale di tutta l'industria tessile rispetto al rischio di esplosione.

La lana è un materiale ignifugo ma i vari casi di incidenti industriale nel reparto tessile hanno acceso lo studio sulla sicurezza di questo settore, la colpa è imputata alle polveri derivate dalle lavorazioni meccaniche effettuate sulla fibra e alla presenza di eventuale materiale estraneo di scarto all'interno del flusso di materiale in lavorazione.

In questo lavoro sono stati analizzati 18 campioni di polveri fibrose provenienti da varie industrie laniere e da vari reparti sottoponendole a diversi test di caratterizzazione e per verificare il loro carattere esplosivo.

Le conclusioni che si possono trarre dal lavoro sono:

- Il campione apparentemente più pericoloso è il campione M proveniente dal reparto di carderia, presenta un elevato valore di Kst e un indice di disperdibilità pari a 8, ha un diametro medio delle fibre di circa 17 μm ma si presenta come un flock con una percentuale di particelle sotto i 500 μm inferiore rispetto a molti altri campioni testati. La prova a temperatura ambiente in cui è stato accertato l'innesco è avvenuta con il tubo Hartmann con filo caldo.
- Il più devastante per il Kst e la Pmax fornite è invece il campione A proveniente dal reparto di tessitura, l'indice di disperdibilità dello stesso è poco superiore al valore di 6, presenta un diametro medio delle fibre di circa 17 μm e ha un'elevata quantità di particelle fini. Questa polvere si è innescata nel tubo Hartmann con arco continuo.
- I campioni F ed H, provenienti dal reparto di filatura, che erano stati classificati non esplodibili a temperatura ambiente perché non si erano innescati al test nel tubo Hartmann, hanno presentato entrambi nel test in sfera Siwek dei Kst di circa 90 bar m/s e una Pmax di 6,7 bar. Nel test in cieco sono stati valutati con un indice di disperdibilità media rispettivamente di 7,5 e 6,5 presentando entrambi un 64% di particelle sotto i 500 μm , quindi il mancato innesco a temperatura ambiente può essere imputato alla difficoltà di dispersione del campione tal quale nel dispositivo Hartmann.
- Per quanto riguarda la disperdibilità dei campioni, in tutti i reparti di provenienza si è vista una sorta di dipendenza lineare tra il Kst e l'indice di disperdibilità, con un contributo positivo di quest'ultimo sulla capacità di generare nubi infiammabili.
- I campioni provenienti dai pretrattamenti sono risultati i meno disperdibili nel complessivo, i campioni P e Q provenienti dai filtri del reparto di lavaggio e asciugatura della lana grezza hanno fornito dei Kst dell'ordine dei 50-60 bar m/s con un indice di disperdibilità poco superiore al 6.

- I reparti di cardatura e filatura sono risultati quelli in cui le polveri si aereodisperdono meglio, molti dei campioni hanno avuto un indice di disperdibilità del valore di 7-8 e valori di Kst dai 60 ai 120 bar m/s. Ragion per cui questi locali possono essere ad alto rischio esplosione da polveri.
- I campioni della sezione dedicata alla tessitura si disperdono bene, il Kst dei tre campioni testati è maggiore di 80 bar m/s, per cui è anch'esso un locale da tenere sotto osservazione per il forte rischio di incorrere in esplosioni da polveri.
- Considerando i luoghi di campionamento, i campioni provenienti da filtri e dall'impianto di aspirazione sono di piccole dimensioni per cui presentano dei buoni indici di disperdibilità, essendo già disperse nel reparto da cui vengono aspirate. Le polveri raccolte invece nell'ambiente di lavoro presentano anch'essi dei buoni indici di disperdibilità, alcuni dei quali ritenuti molto pericolosi per l'elevato valore di Kst espresso.

Tutti i reparti dell'industria laniera possono essere a rischio esplosione da polveri tessili, Filatoi e Carderia sono quelli maggiormente a rischio, ogni campione è stato classificato st1 ovvero capace di provocare una debole esplosione.

Per la sicurezza dell'impianto e dei lavoratori, bisogna garantire e migliorare:

- La ventilazione dei reparti e aspirazione in continuo dell'aria, in modo da evitare la sedimentazione delle polveri che si aereodisperdono a causa dei vari processi in cui vengono generate ed evitare che si possa creare confinamento nell'impianto di aspirazione
- Alcuni sistemi di abbattimento delle polveri aspirate come i cicloni o delle camere isolate di confinamento della polvere aspirata.
- Pulizia dei reparti e dei macchinari con sistemi di aspirazione adeguati, come aspiratori a vuoto o aspiratori ATEX.
- Umidificazione del reparto per appesantire le polveri aereodisperse e migliorare le condizioni lavorative del personale.

Infine lo studio sul comportamento delle polveri tessili e sulla loro disperdibilità verrà approfondito con i test che il Centro Sperimentale per la Sicurezza Industriale sulle Atmosfere Esplosive del Politecnico di Torino svilupperà dentro la camera di dispersione progettata.

6 BIBLIOGRAFIA

- [1]: Arpa Piemonte, La prevenzione delle esplosioni da polvere, 21 giugno 2017.
- [2]: Tom Janicik, Dust Explosion Data: How to Identify and Communicate the Hazard
- [3]: Eckhoff R. K., Dust Explosions in the Process Industries, Gulf Professional, Publishing, 1997
- [4]: Bowen X. The explosion accident in the Harbin Linen textile plant, EuropExNewslett. 6, (1988).
- [5]: Hailin, Z. Investigation of the dust explosion in Harbin linen factory, Unpublished English manuscript, 1988, as cited in Eckhoff, R.K. Dust Explosions in the Process Industries, 3rd ed.; Gulf Professional Publishing: Oxford, U.K., 2003.
- [6]: Norberto Piccinini, Dust explosion in a wool factory: Origin, dynamics and consequences, Fire Safety Journal 43 (2008) 189–204
- [7] www.arpa.piemonte.it
- [8]: Luca Marmo, Case study of a nylon fibre explosion: An example of explosion risk in a textile plant, Journal of Loss Prevention in the Process Industries 23 (2010) 106–111
- [9]: Nadir Ayrilmis, Turker Gulec, Emrah Pesman, Alporen Kaymakci, Potential use of cotton dust as filler in the production of thermoplastic composites, Journal of Composite Materials 51(30), Marzo 2017
- [10]: www.corme.it
- [11]: <http://dalfiloderbaalfilodilana.blogspot.com/2011/05/tosatura.html>
- [12]: Luca Marmo, Enrico Danzi, Dust Explosion Hazards In The Textile Industry, MCS 10, 2017
- [13]: <http://www.tvprato.it/2011/02/autocarro-e-balle-di-lana-rubateritrovate-dal-proprietario-del-mezzo>
- [14]: www.bonino1913.it
- [15] : <https://pt.wikipedia.org/wiki/Carda>
- [16]: www.filaturamarcelliemagnolfi.it
- [17]: www.sapere.it
- [18]: www.massimoretti.it
- [19]: www.albinigroup.com
- [20]: <http://bellomosalvatore.altervista.org/storia.htm>
- [21]: H.R. Sheikh, Social Compliance in Pakistan’s Textile Industry, Pakistan Textile Journal

[22]: www.borghesiangiolino.it

[23]: Norma UNI EN 13821 - Determinazione dell'energia minima di accensione delle miscele polvere/aria - Data pubblicazione 2004.

[24]: W. Bartknecht, Brenngas-und Staubexplosionen, Forschungsbericht F45. Koblenz Bundesinstitut fur Arbeitsschutz, Federal Republic of Germany, 1978.

[25]: Norma UNI EN 14034-2:2011 - Determinazione delle caratteristiche di esplosione di nubi di polvere - Parte 2: Determinazione della velocità massima di aumento della pressione di esplosione (dp/dt)_{max} di nubi di polvere.

[26]: Norma UNI EN 14034-1:2011 - Determinazione delle caratteristiche di esplosione di nubi di polvere - Parte 1: Determinazione della pressione massima di esplosione p_{max} di nubi di polvere

[27]: Cesana C, Kuhner A.G., Siwek R., 201 Apparatus KSEP7.0 Manual, FireEx Consultant Ltd.

[28]: Norma UNI EN 14034-3:2011 - Determinazione delle caratteristiche di esplosione di nubi di polvere - Parte 3: Determinazione del limite inferiore di esplosione LEL di nubi di polvere

[29]: Klippel, A., Schmidt, M., Krause, U., 2015. Dustiness in workplace safety and explosion protection – Review and outlook. J. LossPrev. ProcessInd. 34, 22–29. doi:10.1016/j.jlp.2015.01.011