



**Politecnico
di Torino**

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

Esplosioni di polveri di lana nell'industria tessile

Relatore

Prof. Luca Marmo

Correlatore

Dott. Enrico Danzi

Candidato

Tommaso Tosti

Ottobre 2021

A nonno Gigio,

Il mio pensiero affonda nelle tue radici

Sommario

1-Abstract	1
2-Introduzione allo studio delle fibre tessili	5
2.1 Definizione di fibre tessili	5
2.2 Tipologie di fibre.....	6
2.3 Fasi di lavorazione della lana	8
2.4 Filatura laniera pettinata	10
2.4.1 Lavaggio	10
2.4.2 Oliatura	10
2.4.3 Cardatura	10
2.4.4 Pettinatura.....	11
2.5 Filatura laniera cardata	12
2.5.1 Apertura delle balle	12
2.5.2 Depolverizzazione	12
2.5.3. Apertura.....	12
2.5.4 Miscelazione.....	13
2.5.5 Cardatura	13
2.5.6 Divisione.....	13
2.5.7. Filatura.....	14
2.6 Polveri tessili	15
3-Introduzione alle esplosioni di polveri fibrose.....	19
3.1 Esplosioni di polveri.....	19
3.2 Il pentagono delle esplosioni	22
3.3 Effetto domino nelle esplosioni di polveri.....	23
3.4 Fattori che influenzano l'esplosione di polveri	24
3.4.1 Natura delle polveri	24
3.4.2 Granulometria.....	25
3.4.3 Concentrazione delle polveri.....	27
3.4.4 Umidità.....	27

3.4.5 Turbolenza	27
3.5 Analisi storica e casi studio	28
3.5.1 Analisi Storica	28
3.5.2 Casi studio	40
3.5.2.1 Harbin	41
3.5.2.2 Okaharu	42
3.5.2.3 Malden Mills	42
3.5.2.4 Pettinatura italiana	43
3.5.2.5 Finelvo	46
4-Test di infiammabilità ed esplosività, analisi granulometriche e microscopiche, metodologie ed esiti delle misurazioni	49
4.1 Introduzione.....	49
4.2 Analisi granulometriche e microscopiche	49
4.2.1 Analisi granulometriche, metodologie ed esiti delle misurazioni.....	49
4.2.2 Analisi microscopiche, metodologie ed esiti delle misurazioni	55
4.3 Misura dell'indice di disperdibilità-D.I. (Dustability Index)	61
4.4 Test di infiammabilità in tubo di Hartmann	65
4.5 Test di esplodibilità in sfera Siwek.....	66
5-Correlazioni, risultati e conclusioni	69
5.1 Correlazioni tra lavorazioni tessili, luogo di campionamento, dimensioni ed esplodibilità della fibra.	69
5.2 Correlazioni tra diametro ed esplodibilità delle fibre di lana	72
5.3 Correlazioni tra D.I. ed esplodibilità delle fibre di lana	73
5.4 Considerazioni sul lavoro svolto e conclusioni	74
Bibliografia.....	77
Ringraziamenti	79

1-Abstract

Le esplosioni di polveri in ambienti industriali sono antiche quanto l'industria stessa: i primi documenti che trattano di questo fenomeno, infatti, sono coevi alla prima rivoluzione industriale.

Per beneficio di inventario si ricorda che la prima analisi di un incidente di questa natura, nello specifico dell'esplosione di un forno, risulta essere quella svolta da Carlo Ludovico Morozzo di Bianzé, depositata nel 1786 all'Accademia delle scienze di Torino.

La polvere è una presenza ubiquitaria e inevitabile in tutti quei processi industriali in cui vengono utilizzati degli organi mobili che, per loro natura, vanno a sollecitare i materiali trattati.

Questo problema è reso più grave dal fatto che anche polveri apparentemente innocue, come farina o zucchero, possono, in presenza di opportune condizioni, deflagrare anche in maniera violenta causando danni a persone ed apparecchiature.

Il parametro principale che caratterizza una polvere è il diametro delle particelle che la compongono infatti, al diminuire di quest'ultimo, aumenta la loro superficie esposta per unità di volume e dunque la facilità di innesco.

Altro fattore da non trascurare è la tendenza all'aggregazione: è infatti noto che tanto più una polvere tende a formare aggregati tanto meno essa è prona all'ignizione.

Le condizioni sotto le quali avvengono i fenomeni esplosivi sono schematizzate nel cosiddetto "pentagono delle esplosioni" i cui "lati" sono: combustibile (la polvere), ossidante (di solito l'ossigeno atmosferico), fonte di ignizione, dispersione e confinamento.

La pericolosità delle esplosioni di polveri non dipende tanto dall'aumento di pressione legato all'esplosione primaria quanto dalle esplosioni secondarie.

Quello delle esplosioni secondarie è un esempio di "effetto domino": l'aumento di pressione legato all'esplosione primaria causa il sollevamento delle polveri accumulate sulle superfici, con conseguente formazioni di nuove nubi di polvere che possono essere innescate dall'energia dell'esplosione primaria, causando così una sequenza di esplosioni a catena.

Nonostante il fenomeno sia noto da tempo esso è spesso sottostimato, se non trascurato, anche dagli stessi operatori della sicurezza, come dimostra la lunga sequela di eventi incidentali ad esso correlati.

Esplosioni di polveri di lana nell'industria tessile

Incidenti avvenuti in diverse parti del mondo, dalla metà degli anni '80 fino agli inizi del 2000 (Harbin, Cina, 1987; Okaharu, Giappone, 1994, Malden Mills, USA, 1995) Italia compresa, (Pettinatura Italiana, Biella, Italia, 2001; Finelvo, Biella, Italia, 2001) hanno portato l'attenzione su un altro tipo di polvere, che fino a quel momento non era stata considerata pericolosa, ovvero quella formata da fibre tessili.

Gli episodi sopra citati dimostrano che anche polveri di questa natura, che per le loro caratteristiche geometriche e per la loro tendenza all'aggregazione sembrerebbero apparentemente innocue, o comunque caratterizzate da una minore pericolosità, sono comunque a rischio di esplosione.

Scopo della tesi è, dopo aver effettuato una analisi storica sugli incidenti che coinvolgono fibre tessili, analizzare i fattori e i meccanismi sottesi alle esplosioni di polveri, con particolare attenzione all'esplosione delle fibre tessili, e tra queste, alle fibre di lana.

Per l'analisi storica degli incidenti riguardanti le polveri di fibre tessili si è fatto ricorso ad alcune delle più vaste banche dati di eventi incidentali: ARIA, CSB, eMars.

La sperimentazione è stata condotta e sviluppata su differenti fasi:

-analisi granulometrica delle fibre tessili, svolta attraverso l'uso di un granulometro laser allo scopo di ricavarne la particle size distribution (PSD), l'analisi si è dimostrata particolarmente problematica in quanto le analisi granulometriche risultano precise in presenza di particelle sferiche, ma perdono in accuratezza quando il campione ha natura fibrosa.

Il problema è stato risolto grazie ad una analisi microscopica dei campioni, allo scopo di misurarne il diametro medio.

Si sono quindi svolte:

-una analisi microscopica delle fibre tessili, fatta allo scopo di misurare il diametro medio dei diversi campioni.

-una valutazione empirica del D.I. (dustability index o indice di disperdibilità) che è una misura empirica della capacità di dispersione della polvere.

- una campagna sperimentale di acquisizione dati con l'utilizzo del tubo di Hartmann e dell'apparato di Siwek da 20 litri, allo scopo di misurare i parametri deflagranti come il K_{st}.

Il Kst (explosion index) rappresenta la massima velocità di crescita della pressione durante una prova in ambiente confinato (autoclave).

Esso si riferisce alla crescita di pressione in un contenitore chiuso posto sotto opportune condizioni operative ed è misurato in bar·m/s.

In base al Kst misurato la polvere è classificata con un numero da 1 (basse velocità di crescita della pressione) a 3 (alte velocità di crescita della pressione).

Al termine della sperimentazione in sfera per la misura del Kst tutti i campioni sono stati testati nuovamente nel tubo di Hartmann senza fonte di innesco allo scopo di misurare il D.I.

In ultimo si è deciso di analizzare l'origine delle polveri per vedere se fosse possibile correlare l'esplosibilità dei campioni alle lavorazioni subite.

Si è verificato che il rischio di esplosione di una polvere tessile fibrosa può, come nel caso delle polveri tradizionali, essere correlato sia al diametro che alla disperdibilità in aria.

Si è inoltre verificata la validità del D.I. come strumento di valutazione della pericolosità di una polvere infiammabile.

Allo scopo di facilitare la lettura del lavoro svolto viene riportato un piccolo riassunto dei vari capitoli.

Nel Capitolo 2 vengono descritti i concetti inerenti alle fibre tessili e alla loro lavorazione, focalizzando l'attenzione sulle fibre di lana e sulle polveri da essa generate.

Nel capitolo 3 vengono esposte le nozioni introduttive al fenomeno delle esplosioni di polveri, ponendo l'accento sulle condizioni che portano a questi episodi, vengono esposti i risultati del lavoro di analisi storica e vengono inoltre riportati i casi studio relativi ad alcuni famosi eventi incidentali correlati all'esplosione di polveri tessili.

Nel Capitolo 4 vengono esposte le metodologie di esecuzione del test di screening secondo ISO 80079-20-2 per determinare se una polvere è infiammabile a temperatura ambiente e per definirne l'eventuale magnitudo nell'ambito della valutazione dei rischi, di seguito vengono quindi riportati i risultati della campagna sperimentale svolta.

Nel capitolo 5 vengono esposte le correlazioni trovate attraverso la campagna sperimentale descritta nel punto 4.

2-Introduzione allo studio delle fibre tessili

2.1 Definizione di fibre tessili

Scopo di questa tesi è fornire uno studio riguardo la pericolosità delle esplosioni delle fibre tessili di lana, per poterlo fare è quindi necessario iniziare andando ad introdurre il concetto di “fibra tessile”.

La principale caratteristica di una fibra tessile risiede nel suo elevato rapporto tra lunghezza e diametro, come è possibile evincere già dalla definizione di “fibra tessile” fornita nel regolamento (UE) n. 1007/2011 del Parlamento europeo e del Consiglio, del 27 settembre 2011 [1], esso infatti così recita:

“Ai fini del presente regolamento si intende per [...] fibra tessile alternativamente:

- I un elemento caratterizzato da flessibilità, finezza ed elevato rapporto tra lunghezza e dimensione trasversale massima, che lo rendono atto ad applicazioni tessili*
- II una lamella flessibile o un tubo di larghezza apparente non superiore a 5 mm, comprese le lamelle tagliate da lamelle più larghe o da film, fabbricati a base di sostanze [...] atti ad applicazioni tessili.”*

2.2 Tipologie di fibre

Le fibre usate per i tessuti sono di varia origine e in base a questo si possono suddividere secondo lo schema riportato in Figura 2.1

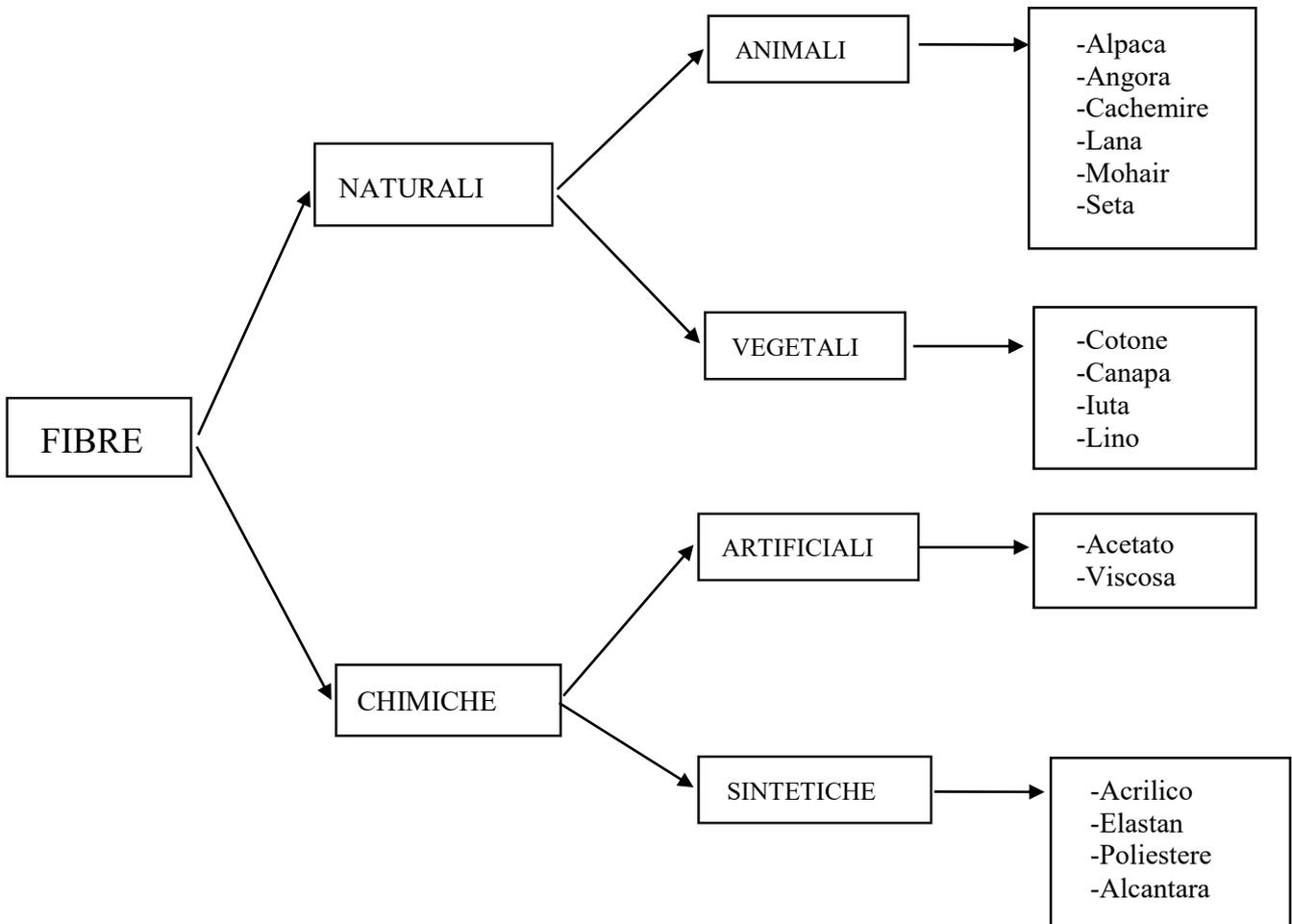


Figura 2.1: Tipologie di fibre [2]

Si definiscono fibre naturali quelle fibre ricavate a partire da fonti “naturali”, quali piante o animali e che, nel corso della loro lavorazione, non subiscono variazioni nella struttura e nella natura chimica della fibra stessa. [2]

Normalmente le fibre naturali vengono suddivise in base alla loro origine tra fibre animali e fibre vegetali.

Si definiscono fibre chimiche le fibre prodotte attraverso reazioni chimiche. Come le fibre naturali anche esse sono suddivisibili in due sottogruppi: fibre artificiali e fibre sintetiche.

Esplosioni di polveri di lana nell'industria tessile

Si definiscono fibre artificiali quelle fibre prodotte a partire da prodotti naturali, che però subiscono delle reazioni chimiche che ne modificano struttura e natura. Sono invece chiamate fibre sintetiche quelle fibre ottenute da composti chimici di sintesi. [2]

La fibra tessile di interesse per questa tesi è la lana: essa è una fibra naturale di origine animale ricavata dal pelo di alcuni animali come pecora, capra, vigogna, alpaca, coniglio, cammello.

In questo lavoro per lana si intenderà solo quella prodotta da ovini, ovvero pecore e capre d'allevamento.

Le fibre di lana hanno una lunghezza che va da 40 mm a 350 mm e un diametro che va da 16 μm fino ad oltre 50 μm e sono costituite da una sostanza proteica, la cheratina, che forma scaglie che si sovrappongono le une alle altre.

La lana è una fibra altamente igroscopica, può infatti assorbire vapore acqueo fino ad un terzo del suo peso senza tuttavia dare la sensazione di bagnato: questo fenomeno è dovuto al fatto che la fibra è composta da catene di aminoacidi in grado incorporare le molecole d'acqua.

La lana assorbe il vapore acqueo ma non l'acqua, è infatti idrorepellente; questo perché è ricoperta da una materia cerosa.

Una delle caratteristiche fondamentali della lana è l'elevato potere di isolamento termico.

Ultima caratteristica importante è l'elevato potere ignifugo; infatti, la lana prende difficilmente fuoco, non propaga la fiamma e non si scioglie. [3]

2.3 Fasi di lavorazione della lana

Le fibre di lana grezze devono ovviamente essere trattate e subire diverse lavorazioni prima della tessitura.

Nelle Figure 2.2 e 2.3 sono riportati gli schemi di lavorazione delle fibre di lana.

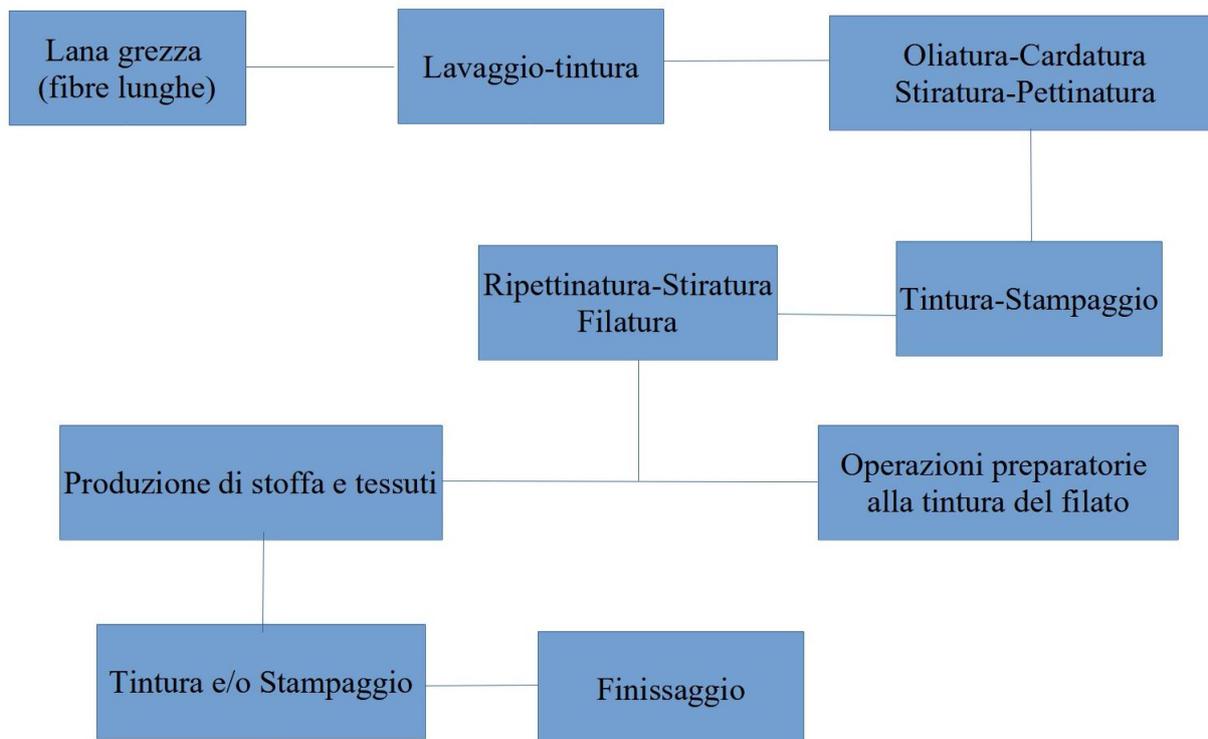


Figura 2.2: Schema del ciclo di lavorazione della lana pettinata [3]

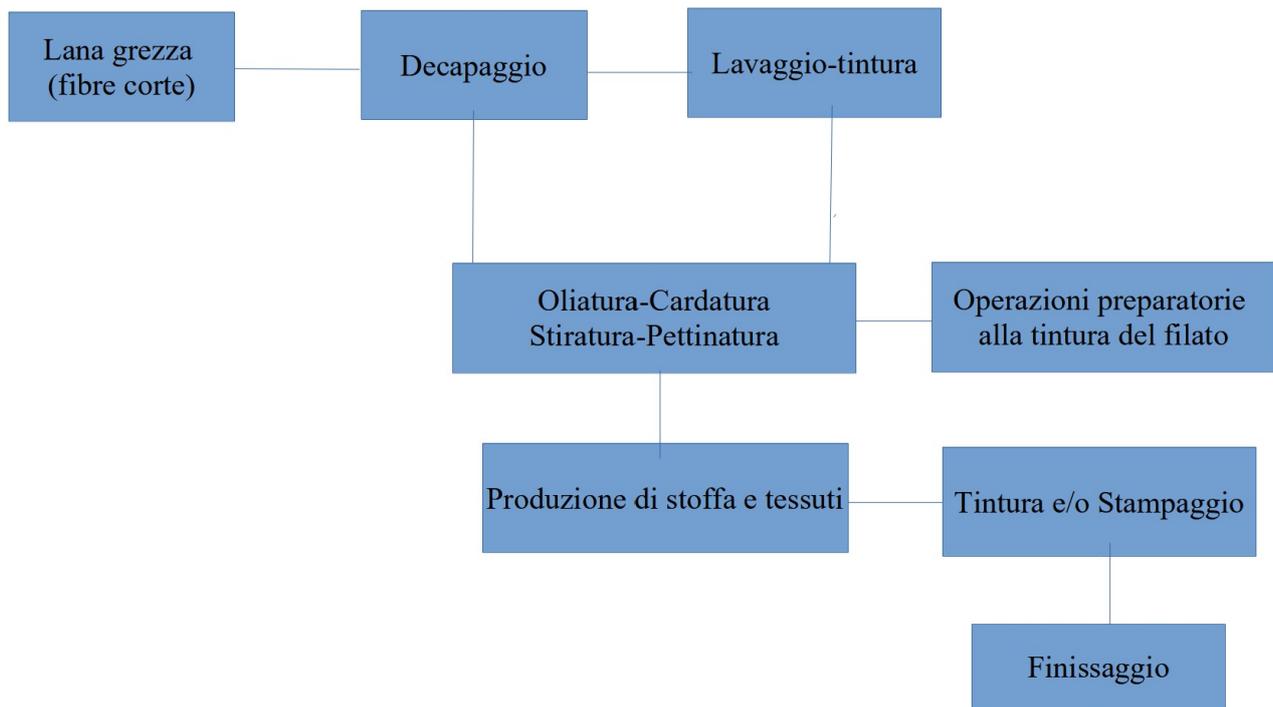


Figura 2.3: *Schema del ciclo di lavorazione della lana cardata* [3]

2.4 Filatura laniera pettinata

Nella filatura laniera pettinata la lana, dopo le operazioni di tosatura, viene pressata in balle ed inviata agli stabilimenti di pettinatura.

La pressatura, seppur vantaggiosa dal punto di vista del trasporto, obbliga gli stabilimenti ad esporre la lana a calore ed umidità affinché essa riprenda il suo volume naturale. [3]

2.4.1 Lavaggio

La lana sucida (non ancora ripulita) non può essere immediatamente lavata, in quanto anche dopo le operazioni di riscaldamento ed umidificazione, non sarebbe possibile arrivare a pulire l'interno delle balle.

Prima del lavaggio si procede quindi alle operazioni di sgrossatura, ovvero di rottura dei pezzi più grandi in pezzi più piccoli, e di apertura e battitura.

Dopo queste operazioni le fibre, già parzialmente pulite da polvere, residui di terra e fibre vegetali, passano al lavaggio vero e proprio con acqua e detergenti, allo scopo di rimuovere lo sporco ed i grassi naturalmente presenti sul vello dell'animale.

La lana viene poi asciugata ed essiccata. [3]

2.4.2 Oliatura

Dopo l'operazione di lavaggio le fibre hanno perso lo strato di grasso che le ricopriva e, in conseguenza di ciò, tendono ad accumulare cariche elettrostatiche e quindi ad attaccarsi tra di loro e sui macchinari.

Per evitare i problemi legati all'accumulo di cariche elettrostatiche si procede a lubrificare le fibre attraverso una operazione di oliatura. [3]

2.4.3 Cardatura

Scopo dell'operazione di cardatura, è quello di ordinare le fibre e parallelizzarle, allo scopo di ottenere il "nastro cardato". [3]

2.4.4 Pettinatura

Scopo del processo di pettinatura è quello di eliminare le fibre corte, parallelizzare le fibre che non si sono allineate nel corso della cardatura, ed eliminare eventuali residui ancora presenti.

Il processo di pettinatura avviene in tre fasi:

- I Fase di preparazione: scopo della fase di preparazione è distendere le fibre ancora ripiegate su loro stesse, questo sia per evitare di scartare fibre lunghe che, a causa del loro essere ripiegate, potrebbero apparire come corte, sia per evitare che la pettinatrice si rompa. La fase di preparazione viene svolta da un macchinario detto stiratoio, costituito da una serie di aghi di acciaio atti a penetrare e accompagnare la massa fibrosa.
- II Fase di pettinatura: scopo della fase di pettinatura è quello di ottenere un nastro, il cosiddetto “nastro pettinato”, caratterizzato da un altro grado di parallelismo tra le fibre che comporta una riduzione di volume e di pelosità della lana.
- III Fase di post-pettinatura: nella post-pettinatura il nastro pettinato viene stirato più volte allo scopo di stabilizzarlo.

Dopo la fase di pettinatura il nastro pettinato subisce le operazioni di finissaggio.

2.5 Filatura laniera cardata

Il ciclo di filatura laniera cardata è destinato a quelle fibre di lunghezza limitata, ovvero inferiore ai 40 mm, e che quindi non possono subire pettinatura.

2.5.1 Apertura delle balle

È il primo passaggio del ciclo, ed è necessario in quanto le balle arrivano in stabilimento compresse e devono essere riportate allo stato di fiocco in modo da garantire una alimentazione uniforme alle macchine successive.

L'apertura avviene tramite un nastro trasportatore verticale costituito da stecche di legno con punte di acciaio grazie al quale aggancia le fibre, le miscela e le trasporta verso l'alto dove finiscono poi in una tramoggia di scarico.

2.5.2 Depolverizzazione

I fiocchi così ottenuti hanno al loro interno varie impurità come polveri, materiale di origine vegetale, sporco che devono essere eliminate.

I fiocchi vengono quindi inviati alla battitrice, costituita da una camera di battitura in cui si trova un tamburo cilindrico provvisto di punte di acciaio smussate, il cui scopo è favorire l'apertura dei fiocchi.

Al di sotto della camera di battitura è posta una griglia che ha lo scopo di trattenere il materiale di scarto all'interno della camera di battitura.

La macchina è costantemente sotto aspirazione e l'aria viene fatta passare attraverso filtri a maniche per eliminare le polveri in modo da evitarne l'accumulo nell'area di lavoro.

2.5.3. Apertura

Dopo la depolverizzazione si passa alla fase di apertura.

Essa viene svolta, in base alla lunghezza delle fibre, da macchinari diversi: quando le fibre sono corte si usa una macchina nota come "lupo apritore", quando le fibre sono di lunghezza maggiore si usa invece una "carda lupo".

Come già visto per la filatura laniera pettinata anche in quella cardata si svolgono le operazioni di oliatura e lavatura.

2.5.4 Miscelazione

Le fibre ancora bagnate vengono inviate alle stanze di mescolatura, all'interno delle quali si opera disponendo il materiale su strati successivi, favorendo la miscelazione legata al successivo prelievo pneumatico verticale.

Terminate le operazioni di preparazione, iniziano le vere e proprie fasi di filatura.

2.5.5 Cardatura

L'operazione fondamentale della filatura laniera cardata è, per l'appunto, la cardatura. Scopo della cardatura è quello di eliminare le impurità residue, favorire la miscelazione e aprire definitivamente i fiocchi, andando a parallelizzare le fibre.

Normalmente si usa una carda a cilindri, ognuno dei quali ha un proprio diametro, delle punte ordinate con varie inclinazioni e una diversa velocità di rotazione, grazie alla combinazione dei diversi cilindri è possibile realizzare contemporaneamente le operazioni di cardatura, spogliatura e sollevamento, facendo sì che i denti della carda non siano mai bloccati dalla lana in ingresso.

I denti delle carde sono detti guarnizioni e possono essere di due tipi: elastici o rigidi.

2.5.6 Divisione

Scopo della procedura di divisione è quello di ripartire il velo prodotto dalla carda in un certo numero di stoppini, ai quali, mentre vengono avvolti sui subbi che alimentano i filatoi, viene conferita una forma tondeggiante.

Nella filatura cardata, a differenza di quanto avviene per la filatura pettinata, gli stoppini passano direttamente alla filatura senza subire altre trasformazioni intermedie, come la pettinatura, che ne andrebbero ad aumentare la regolarità.

2.5.7. Filatura

L'operazione di filatura può essere svolta seguendo due procedimenti diversi: la filatura ad anello o il selfacting.

Nel primo caso il subbio su cui sono avvolti gli stoppini viene inserito nella zona di alimentazione del filatoio, da qui il filato viene preso da un cursore che ruota su un anello intorno al fuso.

Grazie a questo movimento rotatorio il filato raggiunge il giusto livello di torcitura.

Nella filatura ad anello quindi le operazioni di filatura e di avvolgimento sul fuso avvengono in contemporanea.

Il selfacting è invece una operazione di filatura discontinua: in questo processo si produce la lunghezza desiderata di filato che viene poi avvolto su una bobina.

2.6 Polveri tessili

Buona parte delle polveri tessili sono frutto delle operazioni di cardatura e pettinatura in quanto queste operazioni si avvalgono di guarnizioni e pettini che, per la loro stessa azione meccanica, oltre a separare dalle fibre le polveri ed i residui, possono causarne la rottura, con conseguente formazione di fibre molto corte che sono esse stesse uno dei costituenti delle polveri tessili.

. Le polveri possono essere suddivise in due grandi famiglie:

- I Polveri che si accumulano sulla macchina nel corso della lavorazione che le produce.
- II Polveri ambientali che si disperdono nell'ambiente e sedimentano o vengono raccolte dall'impianto di aspirazione.

La Figura 2.4 mostra il tunnel sotterraneo del reparto di tessitura di un'azienda tessile del vercellese, all'interno del quale viene convogliata l'aria aspirata dagli ambienti di lavoro, si distingue bene lo spesso strato di polveri depositate sul pavimento.



Figura 2.4: *Tunnel di convogliamento dell'aria aspirata dal reparto di tessitura di una azienda tessile del vercellese*

Esplosioni di polveri di lana nell'industria tessile

Nelle Figure 2.5 e 2.6 viene invece mostrata la polvere prodotta dai telai durante la fase di tessitura e accumulata sui macchinari stessi.



Figura 2.5: *Polveri prodotte dal telaio durante la tessitura*

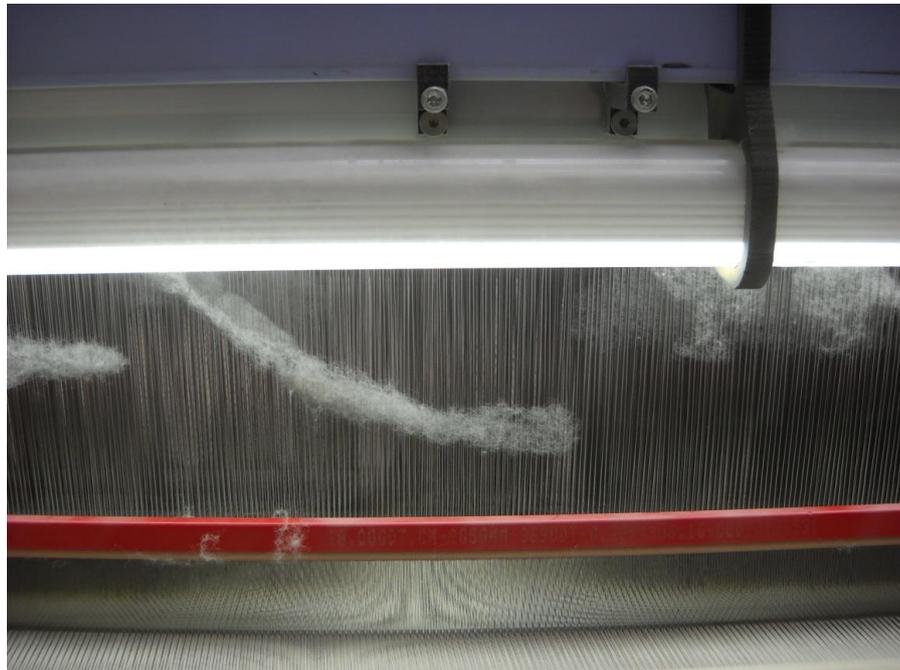


Figura 2.6: *Polveri prodotte dal telaio durante la tessitura*

Esplosioni di polveri di lana nell'industria tessile

La polvere che si accumula sui macchinari tende a formare degli accumuli simili a dei “materassini” ed è molto coesiva.

L'accumulo di polveri di solito è concentrato in tre zone

- I Reparti di lavorazione in cui non c'è buona pulizia.
- II Zone in cui sono alloggiati i ventilatori e i macchinari per il controllo della temperatura e dell'umidità.

In queste zone tendono ad accumularsi a terra grandi ammassi polverosi che, a causa della presenza, tipica dell'industria tessile, di enormi ricircoli d'aria, tendono a risollevarsi.

- III Sistemi di abbattimento polveri.

A differenza di quanto avviene in altri settori industriali, nell'industria tessile raramente si usano filtri a maniche tradizionali, nella maggior parte dei casi l'aria viene inviata in una manica contenuta in camere non confinate, il che riduce il rischio di esplosione.

Tutti i concetti appena esposti sono fondamentali per la comprensione dei processi che possono originare polveri pericolose e degli ambienti in cui è maggiormente possibile trovarle depositate in strato, dove quindi possono facilmente verificarsi esplosioni secondarie.

3-Introduzione alle esplosioni di polveri fibrose

3.1 Esplosioni di polveri

La principale distinzione tra un incendio e una esplosione sta nella velocità di rilascio di energia dei due fenomeni: relativamente lenta in un incendio e molto veloce (nell'ordine dei secondi) per una esplosione.

Un incendio può essere frutto di una precedente esplosione, così come un incendio può fungere da innesco per una esplosione.

Una esplosione è quindi un fenomeno che consiste nel rapido rilascio di una grande quantità di energia in uno spazio ed un volume limitati a sufficienza da comportare un accumulo locale e temporaneo dell'energia stessa.

Al rapido rilascio di energia fa seguito una rapida espansione dei gas che provocano un'onda di pressione.

Più nello specifico l'esplosione di polveri è un fenomeno che si genera a seguito della rapida combustione di una polvere infiammabile dispersa in aria. [4]

Va ricordato che qualunque materiale solido infiammabile che possa essere disperso in aria può, nelle opportune condizioni, deflagrare, quindi anche materiali apparentemente innocui come zucchero, farina, cacao, ma anche polveri plastiche e metalliche possono dare origine a violente esplosioni.

Si ha quindi un rischio di esplosione ogniqualvolta si producono, stoccano o lavorano delle polveri, e ogniqualvolta queste ultime hanno la possibilità di combinarsi con l'aria, soprattutto se ciò avviene all'interno di un ambiente parzialmente o completamente confinato.

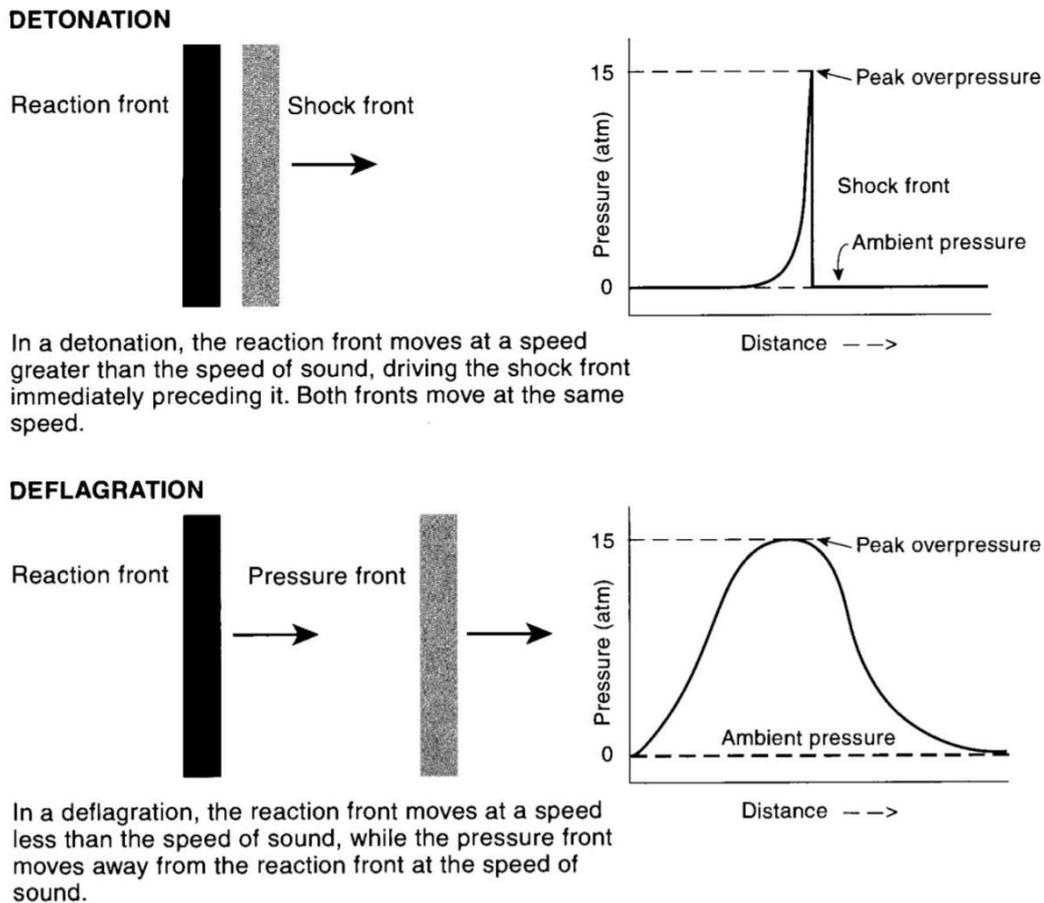


Figura 3.1: *Onda di pressione e fronte di pressione nel caso di detonazione e deflagrazione in campo aperto [5]*

Si definisce fronte di fiamma (o fronte di reazione) quella porzione di miscela entro la quale avvengono le reazioni di combustione, il fronte di fiamma si muove all'interno della miscela combustibile nella direzione che va dai gas combusti alla miscela fresca, propagando così l'innesco, ad una velocità chiamata "velocità del fronte di fiamma" o velocità di propagazione.

Se il fronte di fiamma si mantiene piano, o ha comunque una conformazione netta e definita, e la sua velocità di propagazione è dell'ordine dei m/s, ovvero inferiore a quella del suono, si ha una deflagrazione.

Se invece il fronte di fiamma non ha conformazione regolare ma, al contrario, molto frastagliata a causa della turbolenza, delle perturbazioni o degli attriti si può avere una fase di autoaccelerazione della fiamma che andrà a propagarsi con una velocità superiore a quella del suono, nell'ordine delle migliaia di m/s.

Esplosioni di polveri di lana nell'industria tessile

In questo caso si ha una detonazione, si creano dunque delle onde di pressione che si propagano nella miscela come un'onda d'urto che precede il fronte della reazione. [5]

3.2 Il pentagono delle esplosioni

Il cosiddetto “pentagono delle esplosioni” è composto dai quei cinque elementi che devono essere presenti affinché possa verificarsi una esplosione di polveri, essi sono:

- presenza di una polvere combustibile finemente suddivisa
- presenza di ossidante
- presenza di una fonte di innesco
- confinamento
- miscelazione tra polvere combustibile e ossidante.

Come si nota i primi tre elementi sono gli stessi che compongono il ben più noto triangolo del fuoco.

Quello che va sottolineato è che, a differenza di quanto avviene per gli incendi, per il cui sviluppo è necessaria la contemporanea presenza di tutti e tre gli elementi del “triangolo del fuoco”, affinché si verifichi una esplosione di polveri, è sufficiente un confinamento solo parziale di una nube di polvere innescata, da questo punto di vista le nubi di polvere si comportano come se fossero nubi di gas infiammabile. [4]

L'accento dato al fenomeno del confinamento deriva dal fatto che affinché si abbia una esplosione sono necessarie concentrazioni di polveri molto elevate difficili, se non impossibili, da raggiungere fuori da ambienti chiusi, come silos di stoccaggio, filtri a maniche, impianti di trasporto pneumatico o essiccatori.

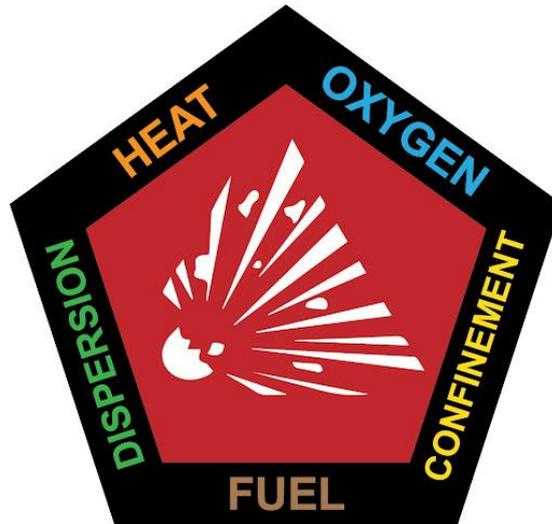


Figura 3.2: *Pentagono dell'esplosione di polveri*

3.3 Effetto domino nelle esplosioni di polveri

Come già anticipato la pericolosità delle esplosioni di polveri non dipende tanto dall'aumento di pressione legato all'esplosione primaria quanto dalle esplosioni secondarie.

Quello delle esplosioni secondarie è un esempio di “effetto domino”: ad una prima esplosione, detta “esplosione primaria” che, come già detto, normalmente si verifica all'interno di una apparecchiatura o in un ambiente confinato possono far seguito una catena di esplosioni. [5]

L'onda di pressione legata all'esplosione primaria, infatti, può causare il sollevamento di eventuali cumuli di polvere i quali vanno a formare nuove nubi di polveri che possono venire innescate dall'energia generata dall'esplosione primaria.

Bisogna ricordare che, in buona parte degli eventi incidentali, la maggior parte dei danni è stata causata dalle esplosioni secondarie e non da quelle primarie [4, 6, 7].

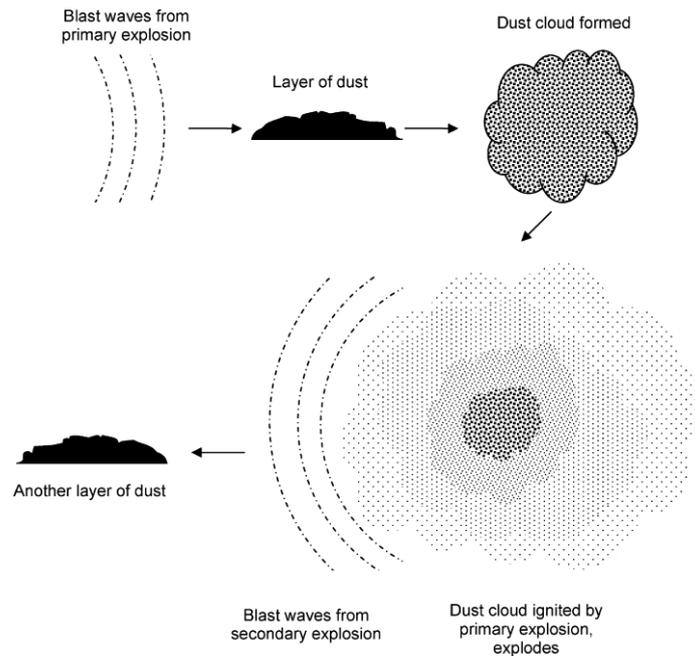


Figura 3.3: *Effetto domino nelle esplosioni di polvere* [4]

3.4 Fattori che influenzano l'esplosione di polveri

3.4.1 Natura delle polveri

Una esplosione è un fenomeno che consiste nel rapido rilascio di una grande quantità di energia in uno spazio ed un volume limitati a sufficienza da comportare un accumulo locale e temporaneo dell'energia stessa. [5]

Questa energia, nel caso delle esplosioni di polveri, è di solito energia “chimica”; frutto di una combustione in ambiente confinato, reazione di combustione che può essere così scritta:

Polvere combustibile + Ossigeno → Ossidi + Calore

Risulta quindi evidente che le polveri di ossidi stabili, come silicati, solfati, nitrati, sabbia e cemento non potendo dar luogo a reazioni di combustione non sono nemmeno esplosive.

L'infiammabilità di una polvere è condizione necessaria ma non sufficiente affinché questa sia esplosiva, polveri come quella di grafite, ad esempio, a fronte di un elevato potere calorifico risultano difficilmente esplodibili. [4]

Sono esplosivi le polveri di seguenti materiali:

- Materiali organici naturali (lana, grano, lino, zucchero, etc.)
- Materiali organici sintetici (plastica, pesticidi, etc.)
- Metalli (alluminio, zinco, etc.)
- Non metalli (carbone e altri derivati dell'industria mineraria)

Il calore di combustione del materiale è comunque un parametro molto importante, infatti indica la quantità di calore che può essere rilasciato dall'esplosione; in ogni caso, in genere, si usa mettere in relazione il calore di combustione con la quantità di ossigeno consumato poiché, in un dato volume di nube di polvere, vi è una quantità limitata di ossigeno ed è questo a determinare il calore rilasciato dall'esplosione per unità di volume di nube, ovvero il reagente limitante della reazione di combustione è, solitamente, l'ossigeno.

3.4.2 Granulometria

Qualsiasi materiale solido che può bruciare in aria, lo farà con velocità e violenza tanto maggiori quanto maggiore è il suo grado di suddivisione.

Questo avviene perché tanto più è ridotta la dimensione delle particelle che vengono disperse tanto maggiore è la loro superficie esposta per unità di volume, al crescere della quale aumenta la velocità della reazione di combustione.

Se il materiale è suddiviso abbastanza finemente e sospeso in un volume sufficientemente ampio da permettere ad ogni frammento di bruciare senza restrizioni la reazione è molto veloce e l'energia necessaria per l'accensione è particolarmente bassa. [8]

Quando questa situazione si verifica in un ambiente confinato si ha una vera e propria esplosione.

Questo fenomeno è autolimitante infatti, sotto un certo diametro particellare, variabile in base alla polvere analizzata, le particelle tendono a coalescere e a formare dei cluster con conseguente diminuzione di superficie esposta per unità di volume. [4]



Figura 3.4: *La velocità di combustione aumenta all'aumentare della superficie esposta per unità di volume. [8]*

3.4.3 Concentrazione delle polveri

Come gas e vapori, anche le polveri esplodono solo quando hanno una concentrazione compresa all'interno di un certo range di valori i cui estremi sono noti come lower explosive limit (LEL, limite inferiore di esplosibilità), e upper explosive limit (UEL, limite superiore di esplosività). [7]

In generale, con valori che variano in base alla natura chimico-fisica della polvere in esame, l'intervallo all'interno del quale può verificarsi un'esplosione comprende concentrazioni che vanno da alcune decine di grammi di polvere al metro cubo fino a più di un chilogrammo di polvere al metro cubo.

Sebbene molto lontano dagli standard richiesti dalle normative per l'igiene industriale, non è raro che queste concentrazioni vengano raggiunte all'interno dell'ambiente di lavoro.

3.4.4 Umidità

In generale, ma non per tutte le polveri, la presenza di umidità tende a diminuire l'esplosibilità.

Infatti, all'aumentare dell'umidità le particelle di polvere diventano più coesive e producono agglomerati che sono più difficili da disperdere e quindi più difficili da innescare e bruciare.

Inoltre parte del calore di combustione è consumato per vaporizzare l'umidità.

Un aumento nella percentuale d'umidità provoca un aumento della temperatura di accensione, dell'energia di accensione e della concentrazione minima esplosibile.

3.4.5 Turbolenza

La presenza di condizioni turbolente nei sistemi industriali è quasi inevitabile, basti solo pensare ai sistemi di trasporto pneumatico, soventemente utilizzati per la movimentazione delle polveri.

L'esplosione stessa causa un certo grado di turbolenza, grado di turbolenza che aumenta al procedere del fronte di fiamma a causa della aumentata disponibilità di ossigeno alla superficie della particella.

L'aumento della disponibilità di ossigeno, che solitamente è il reagente limitante della reazione di combustione, provoca un aumento della velocità della reazione all'interfaccia solido-gas e un corrispondente incremento nei processi di trasferimento del calore.

La turbolenza provoca anche una frammentazione del fronte di fiamma con una pressione d'esplosione maggiore. [7]

3.5 Analisi storica e casi studio

3.5.1 Analisi Storica

Avvalendoci di alcune delle più ampie banche di eventi incidentali disponibili quali: ARIA, CSB, eMars, abbiamo svolto una analisi storica degli eventi incidentali legati all'esplosione di fibre tessili.

L'analisi storica è partita dallo studio dei dati forniti dall'eMars, la banca dati degli eventi incidentali della commissione europea.

L'eMars (Major Accident Reporting System) è stata istituita nel 1982, a seguito della direttiva Seveso, allo scopo di facilitare lo studio degli incidenti e dei “*near miss*” che coinvolgono l'utilizzo di sostanze pericolose in modo da poter prevenire e mitigare gli effetti.

Purtroppo i paesi membri della commissione europea sono tenuti a riportare solamente quegli incidenti che coinvolgono i cosiddetti “*impianti Seveso*”, ovverosia quegli impianti che trattano e stoccano grossi quantitativi di sostanze chimiche potenzialmente pericolose, e tutti gli incidenti classificati come “*major accident*” da parte della normativa Seveso stessa. [9]

Inoltre i report e le analisi statistiche contenute nell'archivio dell'eMars non riportano né il luogo né la compagnia coinvolta nell'incidente, questo allo scopo di incentivare le aziende coinvolte in eventi incidentali alla condivisione dei dati, rendendoli di fatto inutilizzabili a fini legali o anche solo a scopo di critica. [9]

Questo però va a ridurre la quantità e la qualità dei dati forniti in quanto raramente gli impianti tessili sono “*impianti Seveso*”, inoltre la banca dati eMars non riporta con accuratezza gli episodi incidentali degli ultimi tre anni, in quanto questa è all'incirca la durata di un processo di revisione completo dei dati.

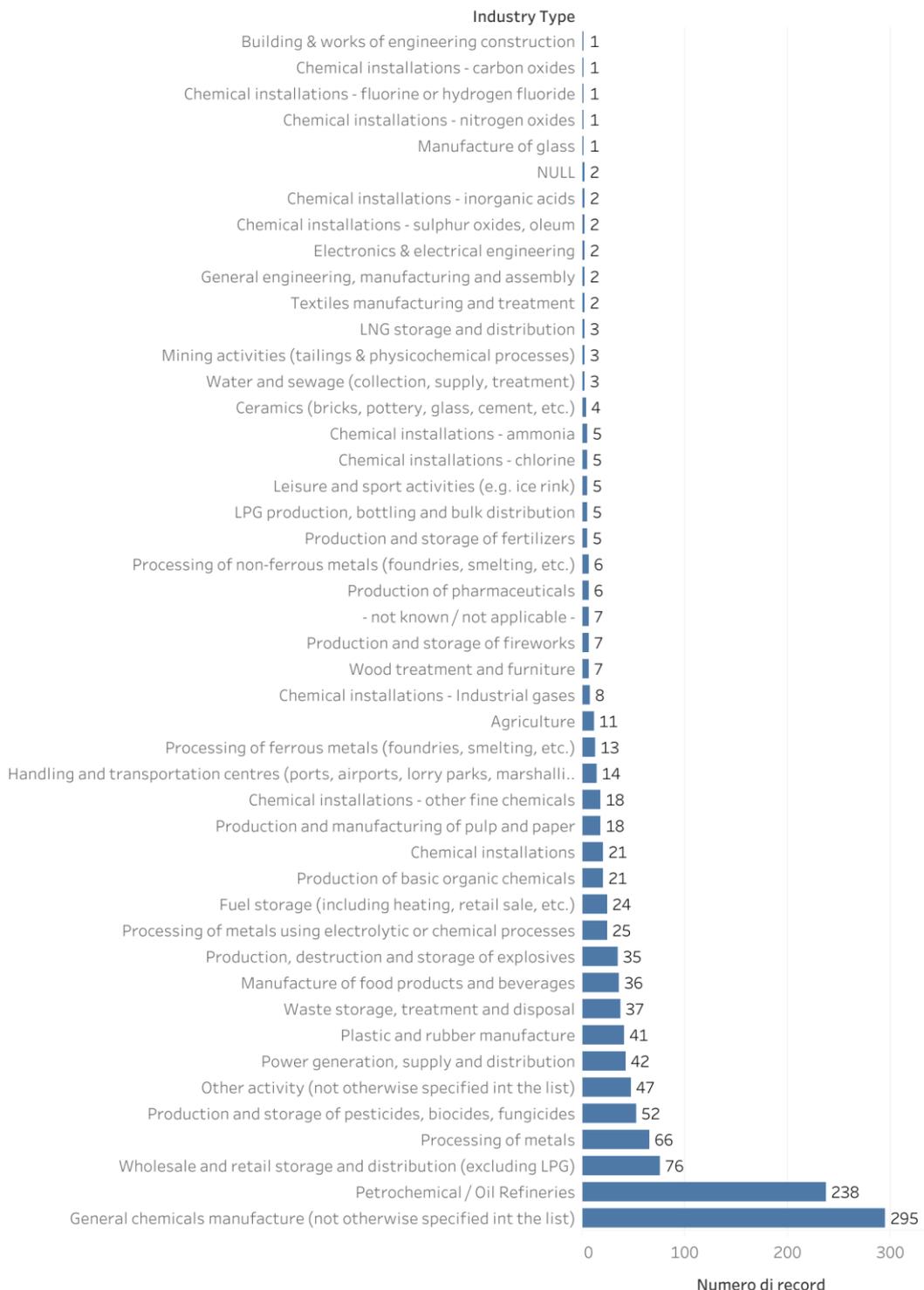
Analizzando i dati forniti dall'eMars , risultano due eventi incidentali che riguardano direttamente l'industria tessile e nove incidenti correlati più o meno direttamente alla produzione e all'indotto collegato alle fibre tessili.[9]

Di questi assumono particolare rilevanza due episodi classificati come “*major accident*”. Il primo è avvenuto il 14 aprile del 1995, ed è stato causato dall'esplosione delle sostanze accumulate nel condotto di aspirazione dei vapori e delle fibre tessili di un essiccatore.

Il secondo invece è avvenuto il 1 settembre 2003, e riguarda l'incendio di una fabbrica di fibre e tinture tessili.

Esplosioni di polveri di lana nell'industria tessile

Tabella 3.1: *Eventi incidentali della banca dati eMars suddivisi per comparto industriale. [9]*



Esplosioni di polveri di lana nell'industria tessile

Dopo l'analisi della banca dati eMars abbiamo svolto una medesima ricerca sulla banca dati del CSB.

Il CSB (chemical safety board) è l'agenzia federale statunitense incaricata di indagare sugli incidenti industriali afferenti in maniera più o meno diretta al comparto chimico all'interno del territorio statunitense.

A seguito di tre catastrofiche esplosioni di polvere che hanno ucciso 14 lavoratori nel 2003, il CSB ha avviato uno studio sulle esplosioni di polvere in ambito industriale.

A seguito dello studio è stato pubblicato un report che analizza 281 eventi incidentali legati alle esplosioni di polveri svoltisi tra il 1985 e il 2005 [10].

Esplosioni di polveri di lana nell'industria tessile

Tabella 3.2.a: *Esplosioni di polveri nell'industria statunitense, 1980-1987. [10]*

#	Year	Date	State	Fataliti	Iniurie	Fuel	Facility Type
1	1980	1/24/1980	IN	0	0	Food	Food products
2	1980	2/1/1980	MN	1	8	Food	Food products
3	1980	2/8/1980	IL	0	0	Food	Food products
4	1980	5/9/1980	OK	0	2	Food	Food products
5	1980	5/10/1980	NC	0	0	Food	Food products
6	1980	7/22/1980	FL	0	0	Food	Food products
7	1982	1/1/1982	NE	0	0	Inorganic	Chemical Manfact - Miscellaneous
8	1982	5/6/1982	MN	0	9	Plastic	Chem manufact - Industrial organic chemicals
9	1982	10/18/1982	IA	0	0	Food	Food products
10	1983	4/19/1983	WI	0	9	Wood	Furniture & fixtures
11	1983	5/1/1983	NC	0	0	Wood	Furniture & fixtures
12	1984	2/20/1984	KY	0	1	Food	Food products
13	1984	2/23/1984	OH	0	1	Inorganic	Chem manufact - Miscellaneous chemical products
14	1984	6/8/1984	IL	1	3	Food	Food products
15	1984	6/15/1984	OH	1	4	Coal	Electric Services
16	1984	6/19/1984	IA	1	1	Metal	Primary metal industries
17	1984	7/18/1984	CA	0	0	Coal	Stone, clay, glass, & concrete products
18	1984	7/23/1984	CO	1	2	Coal	Electric Services
19	1984	8/10/1984	WV	2	0	Coal	Primary metal industries
20	1984	8/31/1984	NH	0	1	Metal	Equipment manufacturer - industrial
21	1985	2/14/1985	OR	0	1	Wood	Lumber & wood products
22	1985	4/3/1985	IL	1	13	Inorganic	Packaging & storage
23	1985	6/4/1985	WY	0	3	Coal	Electric Services
24	1985	6/12/1985	IA	0	1	Food	Food products
25	1985	6/18/1985	NM	0	0	coal	Stone, clay, glass, & concrete products
26	1985	6/24/1985	VA	0	7	Wood	Furniture & fixtures
27	1985	8/2/1985	UT	0	0	Inorganic	Equipment manufacturer - industrial
28	1985	10/24/1985	GA	1	2	Plastic	Chem manufact - Industrial organic chemicals
29	1986	2/28/1986	WI	0	4	Wood	Food products
30	1986	6/18/1986	CA	0	4	Food	Food products
31	1986	7/1/1986	OH	1	1	Metal	Chem manufact - Miscellaneous chemical products
32	1986	7/22/1986	IL	0	1	Plastic	Chem manufact - Miscellaneous chemical products
33	1986	7/29/1986	MN	0	2	Coal	Electric Services
34	1986	9/8/1986	TN	1	1	Wood	Lumber & wood products
35	1986	9/13/1986	OH	2	0	Food	Packaging & storage
36	1986	12/15/1986	IL	0	0	Food	Food products
37	1986	12/31/1986	VA	0	2	Wood	Lumber & wood products
38	1987	2/4/1987	NY	1	5	Metal	Fabricated metal products
39	1987	3/18/1987	AL	1	0	Wood	Furniture & fixtures

Esplosioni di polveri di lana nell'industria tessile

Tabella 3.2.b: *Explosioni di polveri nell'industria statunitense, 1987-1991.* [10]

#	Year	Date	State	Fataliti	Iniurie	Fuel	Facility Type
40	1987	3/27/1987	IN	1	2	Metal	Primary metal industries
41	1987	4/8/1987	IN	1	0	Plastic	Rubber & plastic products
42	1987	6/10/1987	UT	0	6	Metal	Fabricated metal products
43	1987	9/13/1987	AL	0	0	Food	Food products
44	1988	1/14/1988	MN	0	0	Food	Food products
45	1988	3/19/1988	CA	0	3	Food	Food products
46	1988	3/30/1988	NJ	0	2	Pharmaceutical	Chem Manufact - Pharmaceutical Preparations
47	1988	4/15/1988	NC	0	2	Wood	Lumber & wood products
48	1988	5/12/1988	OH	1	8	Metal	Equipment manufacturer - industrial
49	1988	7/13/1988	OH	1	2	Metal	Primary metal industries
50	1988	11/19/1988	OH	1	0	Plastic	Chem manufact - Plastics materials & synthetic resins
51	1988	12/2/1988	MN	0	0	Food	Food products
52	1988	12/2/1988	AL	1	0	Wood	Lumber & wood products
53	1989	1/11/1989	PA	1	0	Metal	Primary metal industries
54	1989	1/25/1989	MI	0	1	Food	Food products
55	1989	2/3/1989	KS	0	0	Food	Food products
56	1989	2/14/1989	IA	0	0	Food	Food products
57	1989	3/2/1989	PA	1	2	Metal	Fabricated metal products
58	1989	5/12/1989	IL	0	0	Food	Food products
59	1989	7/13/1989	AR	0	7	Plastic	Fabricated metal products
60	1989	8/7/1989	IN	0	2	Wood	Rubber & plastic products
61	1989	10/24/1989	MN	0	0	Coal	Electric Services
62	1989	11/13/1989	IA	0	0	Food	Food products
63	1989	11/22/1989	IA	0	0	Food	Food products
64	1990	1/17/1990	OH	2	1	Metal	Chem manufact - Miscellaneous chemical products
65	1990	2/19/1990	OR	0	9	Wood	Paper products
66	1990	3/31/1990	IN	0	7	Metal	Electric Services
67	1990	4/20/1990	MD	0	2	Metal	Primary metal industries
68	1990	6/21/1990	AR	2	0	Metal	Primary metal industries
69	1990	6/29/1990	PA	0	2	Metal	Primary metal industries
70	1990	9/27/1990	IL	0	0	Food	Food products
71	1990	10/22/1990	CA	0	1	Textile	Textile products
72	1990	11/5/1990	MI	0	0	Food	Food products
73	1990	11/9/1990	MD	0	1	Metal	Primary metal industries
74	1990	11/27/1990	VA	2	0	Wood	Lumber & wood products
75	1991	4/1/1991	IA	0	0	Food	Food products
76	1991	4/11/1991	OR	0	1	Wood	Lumber & wood products
77	1991	6/6/1991	CA	1	1	Inorganic	Chem Manufact - Pharmaceutical Preparations
78	1991	6/12/1991	NH	0	1	Plastic	Equipment manufacturer - industrial
79	1991	9/1/1991	NM	1	2	Wood	Lumber & wood products
80	1991	9/21/1991	CA	0	2	Metal	Rubber & plastic products
81	1991	9/24/1991	IA	0	0	Food	Food products

Esplosioni di polveri di lana nell'industria tessile

Tabella 3.2.c: *Esplosioni di polveri nell'industria statunitense, 1991-1996.* [10]

#	Year	Date	State	Fataliti	Iniurie	Fuel	Facility Type
82	1991	12/17/1991	MI	0	11	Inorganic	Chemical Manfact
83	1992	6/3/1992	RI	0	2	Food	Food products
84	1992	7/31/1992	MD	0	1	Metal	Primary metal industries
85	1992	10/3/1992	IN	1	0	Metal	Equipment manufacturer - industrial
86	1992	11/18/1992	SD	0	2	Wood	Lumber & wood products
87	1992	12/4/1992	NC	0	5	Wood	Lumber & wood products
88	1993	1/6/1993	NY	2	2	Pharmaceutical	Chem Manufact - Pharmaceutical Preparations
89	1993	2/8/1993	NH	0	8	Wood	Lumber & wood products
90	1993	3/21/1993	IA	0	0	Food	Food products
91	1993	3/24/1993	SC	2	2	Plastic	Chem manufact - Plastics materials & synthetic resins
92	1993	4/26/1993	NY	0	0	Pharmaceutical	Chem Manufact - Pharmaceutical Preparations
93	1993	5/12/1993	IN	0	1	Plastic	Stone, clay, glass, & concrete products
94	1993	5/17/1993	MN	1	0	Food	Food products
95	1993	9/3/1993	PA	1	0	Metal	Stone, clay, glass, & concrete products
96	1993	9/27/1993	OR	0	1	Wood	Lumber & wood products
97	1993	10/25/1993	NJ	0	9	Food	Food products
98	1993	12/2/1993	MD	0	1	Metal	Fabricated metal products
99	1994	4/21/1994	IA	0	0	Food	Food products
100	1994	4/21/1994	IN	0	22	Coal	Electric Services
101	1994	5/28/1994	IA	0	0	Food	Food products
102	1994	6/1/1994	MD	0	3	Wood	Furniture & fixtures
103	1994	6/16/1994	MN	0	2	Food	Food products
104	1994	7/16/1994	CA	0	1	Textile	Textile products
105	1994	9/14/1994	FL	0	0	metal	Equipment Manufacturer
106	1994	9/16/1994	AZ	1	6	Inorganic	Chemical manfact
107	1994	11/20/1994	NC	2	4	Wood	Lumber & wood products
108	1994	12/16/1994	CA	0	2	Wood	Unknown
109	1995	1/4/1995	KY	1	0	Metal	Primary metal industries
110	1995	2/28/1995	IL	2	25	Metal	Equipment manufacturer - transportation
111	1995	3/24/1995	IL	0	4	Food	Food products
112	1995	3/25/1995	VA	0	1	Metal	Fabricated metal products
113	1995	5/22/1995	PA	0	1	Inorganic	Chem manufact - Industrial inorganic chemicals
114	1995	7/30/1995	IL	1	0	Food	Food products
115	1995	9/26/1995	IA	0	0	Food	Food products
116	1995	9/29/1995	CA	0	6	Wood	Lumber & wood products
117	1995	11/16/1995	WA	0	0	Metal	Fabricated metal products
118	1995	12/11/1995	IA	0	0	Food	Food products
119	1995	12/11/1995	MA	0	37	Plastic	Textile products
120	1995	12/13/1995	NH	0	0	Plastic	Rubber & plastic products
121	1996	1/9/1996	FL	1	0	Inorganic	Equipment manufact - transportation
122	1996	1/24/1996	AZ	0	3	Coal	Primary metal industries
123	1996	2/27/1996	IL	1	2	Coal	Electric Services

Esplosioni di polveri di lana nell'industria tessile

Tabella 3.2.d: *Explosioni di polveri nell'industria statunitense, 1996-1999.* [10]

#	Year	Date	State	Fataliti	Iniurie	Fuel	Facility Type
124	1996	3/4/1996	VA	0	1	Tobacco	Tobacco products
125	1996	4/27/1996	CA	1	0	Metal	Equipment manufacturer - industrial
126	1996	6/25/1996	TN	0	1	Metal	Primary metal industries
127	1996	7/10/1996	PA	0	0	Food	Food products
128	1996	7/20/1996	NE	1	15	Food	Food products
129	1996	7/30/1996	VA	0	1	Plastic	Equipment manufacturer
130	1996	8/14/1996	NM	2	0	wood	lumber & wood products
131	1996	11/5/1996	UT	0	2	Metal	Chem manufact - Miscellaneous chemical products
132	1996	12/24/1996	PA	1	0	Metal	Primary metal industries
133	1997	1/7/1997	IL	0	5	Paints	Equipment manufacturer - transportation
134	1997	1/10/1997	IL	0	5	Food	Food products
135	1997	2/13/1997	OH	0	2	Metal	Fabricated metal products
136	1997	4/16/1997	PA	2	0	Inorganic	Chemical manufact
137	1997	5/16/1997	CA	0	1	Food	Food products
138	1997	5/18/1997	CA	0	6	Food	Food products
139	1997	6/17/1997	OH	0	0	Food	Food products
140	1997	7/30/1997	UT	1	4	Inorganic	Chemical manufact
141	1997	9/12/1997	NJ	0	1	Organic	Chem manufact
142	1997	9/30/1997	CT	0	3	Plastic	Textile products
143	1997	10/20/1997	MN	0	0	Food	Food products
144	1997	11/24/1997	OH	0	2	Metal	Fabricated metal products
145	1997	12/18/1997	TX	1	4	Metal	Fabricated metal products
146	1998	1/5/1998	PA	0	0	Metal	Primary metal industries
147	1998	3/24/1998	NC	0	2	Wood	Furniture & fixtures
148	1998	3/27/1998	NH	0	0	Wood	Fabricated metal products
149	1998	4/11/1998	CA	0	1	Wood	Lumber & wood products
150	1998	4/13/1998	IL	0	0	Plastic	Rubber & plastic products
151	1998	5/4/1998	TX	1	1	metal	wholesale trade-durable goods
152	1998	5/17/1998	TN	0	2	Food	Food products
153	1998	7/1/1998	CA	0	1	Wood	Lumber & wood products
154	1998	7/1/1998	MS	0	4	Plastic	Equipment manufacturer - medical
155	1998	7/7/1998	KS	0	1	Food	Food products
156	1998	7/28/1998	IN	0	17	Coal	Electric Services
157	1998	8/10/1998	CA	0	1	Wood	Furniture & fixtures
158	1998	8/28/1998	TX	0	1	Food	Food products
159	1998	8/28/1998	TX	0	16	Plastic	Equipment manufacturer - industrial
160	1998	10/12/1998	OR	0	1	Wood	Lumber & wood products
161	1999	2/1/1999	MI	6	30	coal	Electric Services
162	1999	2/17/1999	IL	1	0	Metal	Fabricated metal products
163	1999	2/25/1999	MA	3	9	Plastic	Primary metal industries
164	1999	4/5/1999	AL	1	1	Metal	Primary metal industries
165	1999	4/24/1999	VA	0	4	Wood	Lumber & wood products

Esplosioni di polveri di lana nell'industria tessile

Tabella 3.2.e: *Explosioni di polveri nell'industria statunitense, 1999-2002.* [10]

#	Year	Date	State	Fataliti	Iniurie	Fuel	Facility Type
166	1999	8/12/1999	MD	0	1	Inorganic	Chem manufact - Miscellaneous chemical products
167	1999	8/16/1999	GA	3	4	Coal	Electric Services
168	1999	9/22/1999	NJ	0	2	plastic	Rubber & plastic products
169	1999	10/3/1999	CO	1	0	Wood	Lumber & wood products
170	1999	10/4/1999	MS	0	1	Plastic	Rubber & plastic products
171	2000	1/22/2000	NM	0	3	Food	Food products
172	2000	2/3/2000	MO	1	0	Wood	Chem manufact - Industrial organic chemicals
173	2000	2/3/2000	IN	1	0	Metal	Primary metal industries
174	2000	3/7/2000	CA	0	1	Metal	Electric Services
175	2000	3/16/2000	CA	0	2	Metal	Fabricated metal products
176	2000	3/22/2000	NY	0	1	Food	Food products
177	2000	3/23/2000	TN	0	1	Food	Food products
178	2000	3/24/2000	CA	0	1	Metal	Primary metal industries
179	2000	4/4/2000	CA	0	1	Wood	Fabricated metal products
180	2000	5/4/2000	TX	0	3	Food	Food products
181	2000	6/12/2000	PA	0	6	Plastic	Rubber & plastic products
182	2000	7/5/2000	MD	0	1	Wood	Lumber & wood products
183	2000	8/17/2000	OH	0	1	Plastic	Chem manufact - Miscellaneous chemical products
184	2000	10/25/2000	OR	0	4	Wood	Lumber & wood products
185	2000	10/26/2000	CA	1	4	Plastic	Rubber & plastic products
186	2001	1/10/2001	NH	0	1	Wood	Lumber & wood products
187	2001	1/31/2001	KS	0	0	Food	Food products
188	2001	2/14/2001	PA	3	10	Wood	Lumber & wood products
189	2001	3/14/2001	MD	1	0	Inorganic	Chem manufact - Miscellaneous chemical products
190	2001	5/19/2001	IL	1	1	Food	Food products
191	2001	5/25/2001	MI	0	9	Wood	Lumber & Wood products
192	2001	8/29/2001	MT	0	2	Coal	Electric Services
193	2001	9/8/2001	IL	0	0	Food	Food products
194	2001	9/21/2001	MI	0	2	Food	Food products
195	2001	10/3/2001	IN	5	0	Metal	Chem manufact - Miscellaneous chemical products
196	2001	10/15/2001	NV	1	3	Inorganic	Propellants & explosive manufacturing
197	2001	12/11/2001	PA	0	2	Metal	Fabricated metal products
198	2002	1/16/2002	MI	1	0	Coal	Electric Services
199	2002	1/23/2002	NE	0	13	Plastic	Rubber & plastic products
200	2002	2/11/2002	OH	0	0	Plastic	Unknown
201	2002	2/13/2002	IL	1	2	Coal	Electric Services
202	2002	5/16/2002	MS	5	7	Plastic	Rubber & plastic products
203	2002	5/26/2002	NJ	0	0	Food	Food products
204	2002	6/6/2002	PA	0	3	Metal	Primary metal industries
205	2002	6/10/2002	NC	0	0	Wood	Furniture & fixtures
206	2002	7/19/2002	SC	0	0	Plastic	Chemical manufact
207	2002	8/8/2002	OR	1	3	Food	Food products

Esplosioni di polveri di lana nell'industria tessile

Tabella 3.2.f: *Explosioni di polveri nell'industria statunitense, 2002-2004.* [10]

#	Year	Date	State	Fataliti	Iniurie	Fuel	Facility Type
208	2002	8/8/2002	MS	1	0	Textile	Packaging & storage
209	2002	8/25/2002	TN	1	0	Metal	Chem manufact - Industrial inorganic chemicals
210	2002	9/5/2002	MN	1	4	Food	Food products
211	2002	9/20/2002	KS	0	0	Food	Food products
212	2002	11/18/2002	NC	0	3	Plastic	Rubber & plastic products
213	2002	12/26/2002	AL	1	0	Wood	Lumber & wood products
214	2002	12/27/2002	ID	0	0	Wood	Lumber & wood products
215	2002	12/27/2002	WI	0	1	Metal	Primary metal industries
216	2003	1/21/2003	IL	0	1	Plastic	Automotive services
217	2003	1/23/2003	MO	0	0	Wood	Lumber & wood products
218	2003	1/29/2003	NC	6	38	Plastic	Rubber & plastic products
219	2003	2/10/2003	WI	0	0	Coal	Electric Services
220	2003	2/14/2003	NC	0	2	Wood	Furniture & fixtures
221	2003	2/20/2003	KY	7	37	Plastic	Rubber & plastic products
222	2003	2/25/2003	TN	0	0	Wood	Lumber & wood products
223	2003	2/25/2003	TN	0	0	Wood	Lumber & wood products
224	2003	3/7/2003	NY	0	0	Wood	Lumber & wood products
225	2003	3/12/2003	PA	0	0	Wood	Lumber & wood products
226	2003	3/14/2003	MI	0	0	Metal	Fabricated metal products
227	2003	3/17/2003	PA	0	0	Metal	Fabricated metal products
228	2003	4/9/2003	IN	0	0	Wood	Unknown
229	2003	5/20/2003	KY	1	3	Food	Food products
230	2003	5/23/2003	CA	0	2	Wood	Furniture & fixtures
231	2003	5/30/2003	IA	0	1	Coal	Electric Services
232	2003	7/9/2003	IL	1	1	Metal	Fabricated metal products
233	2003	7/22/2003	SC	0	0	Plastic	Chem Manufact - Pharmaceutical Preparations
234	2003	7/30/2003	SD	0	0	Metal	Fabricated metal products
235	2003	8/11/2003	OR	0	1	Wood	Rubber & plastic products
236	2003	8/26/2003	NC	0	0	Food	Food products
237	2003	9/2/2003	MA	0	1	Wood	Lumber & wood products
238	2003	9/5/2003	OH	0	0	Plastic	Equipment manufacturer
239	2003	10/1/2003	OH	2	9	Wood	Lumber & wood products
240	2003	10/22/2003	KY	0	0	Plastic	Rubber & plastic products
241	2003	10/29/2003	IN	1	2	Metal	Primary metal industries
242	2004	1/12/2004	IA	0	0	Food	Food products
243	2004	1/15/2004	OR	0	2	Wood	Equipment Manufacturer
244	2004	2/11/2004	NE	0	0	Wood	Furniture & fixtures
245	2004	2/12/2004	IL	0	0	Coal	Electric Services
246	2004	2/16/2004	OK	0	0	Coal	Electric Services
247	2004	2/19/2004	OH	0	3	Wood	Lumber & wood products
248	2004	2/23/2004	MI	0	0	metal	Primary metal industries
249	2004	3/16/2004	AR	0	0	Wood	Lumber & wood products

Esplosioni di polveri di lana nell'industria tessile

Tabella 3.2.g: *Esplosioni di polveri nell'industria statunitense, 2004-2005.* [10]

#	Year	Date	State	Fataliti	Injurie	Fuel	Facility Type
250	2004	3/16/2004	OK	0	0	Plastic	Rubber & plastic products
251	2004	3/17/2004	WA	0	2	Wood	Lumber & wood products
252	2004	4/6/2004	KS	0	0	Food	Food products
253	2004	4/7/2004	IL	0	0	Coal	Electric Services
254	2004	4/8/2004	NC	0	1	Food	Food products
255	2004	5/6/2004	WI	0	0	Wood	Lumber & wood products
256	2004	5/16/2004	NJ	0	0	Pharmaceutical	Chem Manufact - Pharmaceutical Preparations
257	2004	6/10/2004	NC	0	3	Plastic	Chem manufact - Miscellaneous chemical products
258	2004	6/25/2004	WI	0	4	Metal	Fabricated metal products
259	2004	7/6/2004	TX	1	2	Metal	Equipment Manufacturer
260	2004	7/20/2004	CT	0	2	Plastic	Rubber & plastic products
261	2004	9/14/2004	OH	0	1	Metal	Primary metal industries
262	2004	9/16/2004	CA	0	0	Wood	Paper products
263	2004	9/18/2004	MA	1	16	Food	Food products
264	2004	9/23/2004	IL	0	0	Wood	Furniture & fixtures
265	2004	9/28/2004	IL	0	0	Coal	Electric Services
266	2004	10/12/2004	IN	0	0	Plastic	Rubber & plastic products
267	2004	11/23/2004	IL	0	0	Plastic	Rubber & plastic products
268	2004	12/3/2004	OH	0	1	Wood	Food products
269	2004	12/8/2004	MD	0	0	Wood	Equipment Manufacturer
270	2005	2/25/2005	KY	0	2	Plastic	Rubber & plastic products
271	2005	5/3/2005	CA	0	2	Pharmaceutical	Chemical manufact
272	2005	6/1/2005	IA	0	1	Inorganic	Rubber & plastic products
273	2005	6/10/2005	TN	0	5	Paints	Chemical Manufact
274	2005	7/4/2005	WA	0	0	Organic	Stone, clay, glass, & concrete products
275	2005	7/8/2005	ME	0	0	Wood	Lumber & wood products
276	2005	7/22/2005	WI	0	2	Metal	Equipment Manufacturer
277	2005	7/26/2005	OR	0	0	Wood	Lumber & wood products
278	2005	10/14/2005	WI	1	1	Wood	Lumber & wood products
279	2005	11/9/2005	IL	0	0	Plastic	Equipment Manufacturer
280	2005	11/14/2005	IA	0	2	Wood	Lumber & wood products
281	2005	11/17/2005	MT	0	1	Inorganic	Chemical manufact
Totals				119	718		

Esplosioni di polveri di lana nell'industria tessile

Dall'analisi del report si evince che, dei 281 casi affrontati, ben cinque ovvero i casi 71, 104, 119, 142, 208, coinvolgono direttamente l'industria tessile, di questi cinque casi due assumono particolare rilevanza in quanto essi non sono solamente legati all'industria tessile, ma in essi i prodotti tessili costituiscono il combustibile principale che ha dato luogo all'esplosione.

Esplosioni di polveri di lana nell'industria tessile

L'ultima banca dati a venir analizzata è stata la banca dati dell'ARIA (Analysis, Research and Information on Accidents), quest'ultima è un database francese che contiene al suo interno i report di più di 46000 tra incidenti e "near misses" avvenuti in tutto il mondo.

Dall'analisi dei report forniti dall'ARIA risulta che negli anni che vanno dal 1985 al 2015 sono avvenute due esplosioni e ventuno incendi correlati al comparto tessile.

In almeno cinque casi il combustibile principale che ha alimentato gli incendi o le esplosioni è stato una fibra tessile. [11]

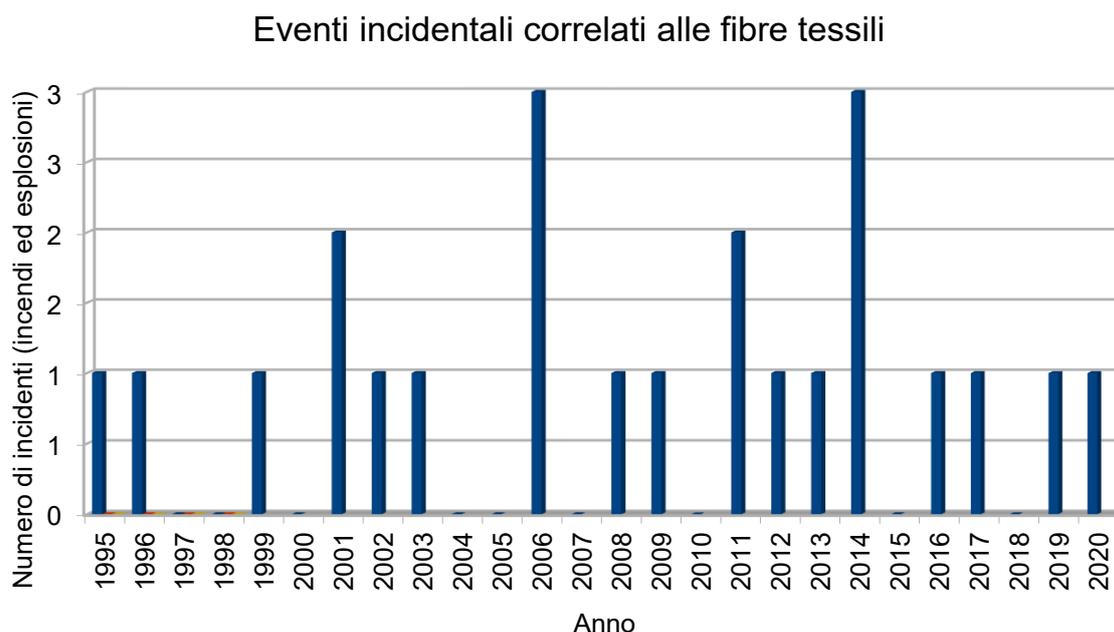


Grafico 3.1: *Esplosioni ed incendi correlati alle polveri tessili, banca dati ARIA*

3.5.2 Casi studio

Tabella 3.4: *Casi rilevanti di esplosioni di polveri tessili in ambito industriale.*

Episodio (anno)	Morti, Feriti	Materiale, Processo (sezione)	Probabile fonte di innesco
Harbin, Cina (1987)	58, 177	Lino, (collettore raccolta polveri)	Scintilla elettrostatica
Okaharu, Giappone (1994)	-	Scarti di cotone	Scarica elettrica
Malden Mills, US (1995)	-, 27	Nylon (unità di floccaggio)	Scarica elettrica
Biella, Italia (2001)	-, 3	Nylon (essiccatore, unità di floccaggio)	Scintilla elettrostatica
Biella, Italia (2001)	3, 6	Lana (sistema di raccolta scarti)	Scintilla elettrostatica

Resoconti di esplosioni di polveri si trovano in letteratura almeno dal 1786, ovvero dalla “*Relation d’une violente détonation arrivée à Turin le 14 décembre 1785 dans un magasin de farine*” scritta da Carlo Ludovico Morozzo di Bianzé e depositata in quell’anno all’Accademia delle scienze di Torino.

Come abbiamo già visto però è solo in tempi relativamente recenti che si è iniziato a sistematizzare questo genere di resoconti.

Scopo di questo paragrafo è descrivere alcuni dei principali incidenti industriali avvenuti nell’ambito dell’industria tessile.

3.5.2.1 Harbin

Il 15 marzo del 1987 negli stabilimenti della Harbin Linen Textile Plant, nella Repubblica Popolare cinese, si registrò una violentissima esplosione che causò la morte di 58 persone, il ferimento di 177 e la distruzione di 13000 m² di impianto. [8]

L'esplosione fu causata da una scintilla elettrostatica avvenuta all'interno di una delle unità di raccolta della polvere, le fiamme da questa prima unità di raccolta si propagarono, attraverso i condotti che collegavano le varie unità, ad una seconda.

Le due unità, ormai preda delle fiamme esplosero pressoché contemporaneamente, facendo propagare l'esplosione alle altre sette unità di raccolta della polvere che, di conseguenza esplosero.

L'onda d'urto causata dall'esplosione delle sette unità di raccolta polvere andò a sollevare gli strati di polvere accumulatisi nella zona di pre-cardatura, i quali sollevatisi in aria formarono una nube che, innescata dall'energia delle esplosioni precedenti diede a sua volta origine ad una nuova esplosione secondaria che fece propagare il fronte di fiamma attraverso le zone di cardatura e pre-filatura dell'impianto.

Il fronte di fiamma, così propagatosi raggiunse il collettore di polveri esterno all'impianto dove avvenne una nuova esplosione.

Altre quattro esplosioni si verificarono a seguito della propagazione del fronte di fiamma nelle zone sotterranee di stoccaggio del tessuto. [11]

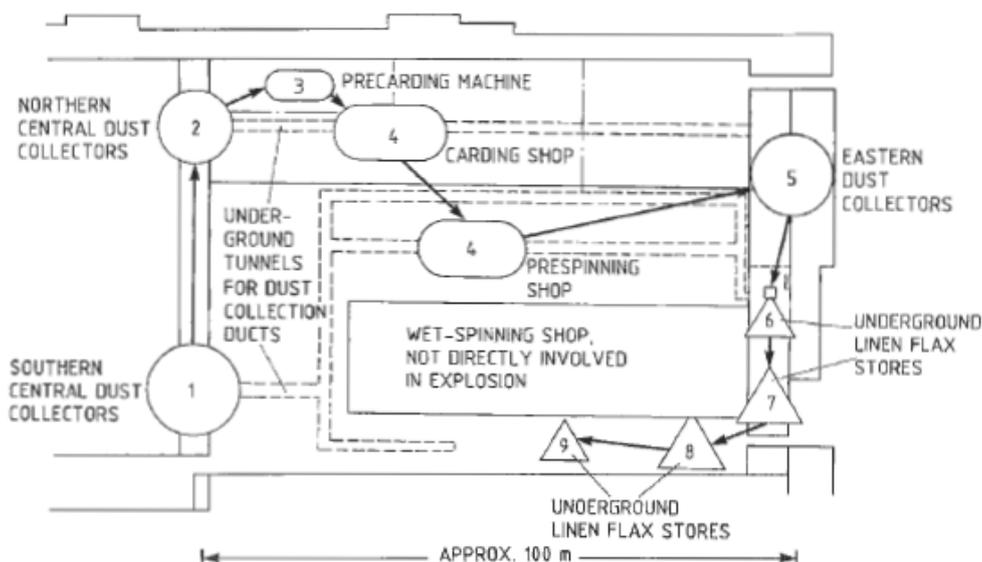


Figura 3.5: Schema dell'incidente della Harbin Linen Textile [11]

3.5.2.2 Okaharu

Nel dicembre del 1994 a Okaharu, Giappone, un incendio, innescato da una scarica elettrica su uno strato di scarti polverosi di cotone, distrusse l'impianto tessile della Shinko Seishoku Company, senza però causare alcuna vittima. [4]

3.5.2.3 Malden Mills

L'11 dicembre 1995 a Methuen, Massachusetts, una esplosione all'interno dello stabilimento di Malden Mills causò gravi ustioni a 27 operai.

Lo stabilimento di Malden Mills produceva tessuti di Nylon.

Nella produzione di tessuti di Nylon si sfrutta un processo noto come floccatura, processo che consiste nell'incollare, tramite l'utilizzo di particolari resine, delle fibre molto piccole (del diametro dell'ordine dei 10 μm e di lunghezza dell'ordine di 1 mm) sopra uno strato di fibre ritorte di maggiori dimensioni, chiamato "flock".

Il processo si svolge così: le fibre vengono prima fatte impregnare con la resina, che funge da collante, i fili così trattati vengono fatti passare in una camera in cui, tramite azione elettrostatica il flock disperso in "nube" viene fatto aderire alla resina, resina che viene poi fatta asciugare in un essiccatore.

All'interno degli essiccatori la temperatura era mantenuta attorno ai 230 °C grazie a degli scambiatori di calore. [12]

Quella notte era in corso la pulizia dell'impianto e le testimonianze riportano che gli ambienti erano molto polverosi, tanto che gli operai per lavorare erano obbligati ad indossare maschere di protezione.

Secondo i report della US Fire Administration è probabile infatti che l'incidente sia stata causato dal calore presente negli essiccatori, il quale sarebbe stato sufficiente ad innescare una nuvola di polvere di nylon.



Figura 3.6: *Incendio dello stabilimento Malden Mills*

3.5.2.4 Pettinatura italiana

Uno dei casi più disastrosi di esplosione avvenuta nell'industria tessile su suolo italiano è certamente quello avvenuto alle 17:50 del 9 gennaio 2001 nello stabilimento della "Pettinatura Italiana" di Vigliano Biellese (BI).

Durante la deflagrazione sono morte tre persone e altre otto sono state ferite, inoltre lo stabilimento ha riportato gravi danni ed è tutt'ora abbandonato.



Figura 3.7: *Vista dall'alto dei danni al tetto dello stabilimento della Pettinatura italiana* [13]

Esplosioni di polveri di lana nell'industria tessile

L'azienda svolgeva per conto di terzi operazioni di lavaggio, cardatura e pettinatura della lana, per questo motivo negli ambienti vi era anche polvere di origine vegetale la quale è caratterizzata da una temperatura di autoaccensione bassa, intorno ai 270 °C [13], e tessile sospesa in aria e depositata in strati sulle superfici.

Allo scopo di rimuovere gli accumuli di polvere i locali erano sottoposti ad una vigorosa ventilazione forzata.

L'elevata ventilazione rese però impossibile notare la modesta quantità di fumo che si stava sviluppando da una combustione a brace, probabilmente innescata o da un "hot spot" localizzato [13] oppure da una scintilla elettrostatica [15] nella sezione di stoccaggio delle lappole (materiale di scarto di origine vegetale) nel piano seminterrato [14].

Gli scarti di cardatura costituiti di materiale vegetale (lappole) e animale (fibre di lana) erano immagazzinati nel seminterrato in diverse sezioni comunicanti tra loro tramite condotti a trasporto pneumatico. [13]

La combustione, inizialmente limitata, andò a coinvolgere porzioni sempre maggiori di materiale, con conseguente aumento della quantità di fumo che, non più mascherato dalla ventilazione forzata, allertò due operai che subito si diressero verso la carda (comunicante con il piano sottostante) per verificarne le condizioni ed estinguere le fiamme o le braci.

Prima che i due uomini riuscissero ad arrivare al macchinario furono investiti dal fronte di fiamma della deflagrazione primaria che causò loro ustioni all'80% del corpo.

Il fronte di fiamma si propagò negli ambienti circostanti arricchendosi via via delle polveri depositate fino a sfogarsi all'esterno formando una fiammata alta dai 20 ai 30 metri e di durata molto breve (meno di 10 minuti, come riferito dai testimoni) a causa dell'esaurimento del materiale combustibile.



Figura 3.8: Vista delle carde sotto le quali si è sviluppato l'innesco [13]

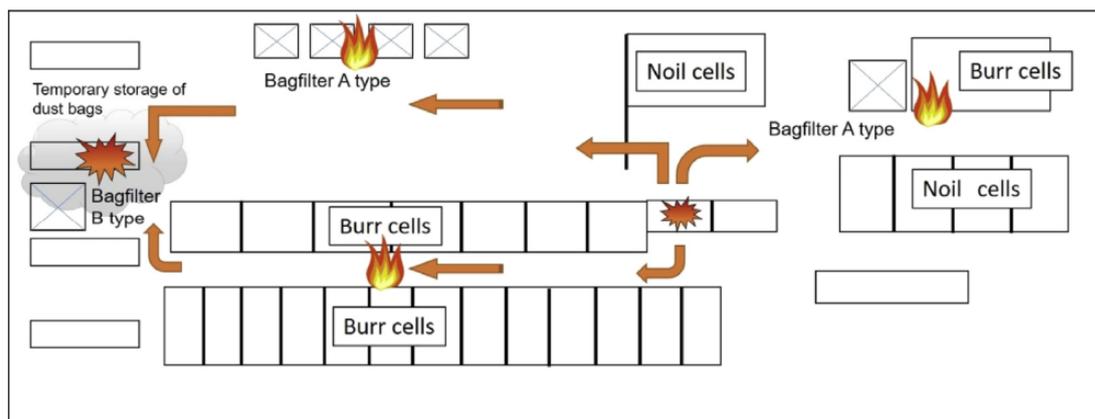


Figura 3.9: Sequenza incidentale dell'esplosione allo stabilimento della Pettinatura italiana

3.5.2.5 Finelvo

Pochi giorni dopo l'esplosione avvenuta negli stabilimenti della Pettinatura italiana, il 19 gennaio 2001, si verificò una seconda grande esplosione in uno stabilimento di Occhieppo Superiore (BI) che provocò la grave ustione di tre operai.

La strana sequenza incidentale (due esplosioni in due impianti tessili nel biellese nell'arco di dieci giorni), fece inizialmente pensare ad azioni di sabotaggio, tesi poi scartata. [16]

L'azienda produceva tessuti sintetici per fodere e rivestimenti per auto.

I processi produttivi svolti all'interno dell'impianto si basavano sulla produzione, tintura, essiccamento e selezione del flock, in una maniera simile a quanto visto per l'incidente di Malden Mills [12].

Il flock è un filo di poliammide composto da più fibre ritorte su cui, tramite particolari resine, vengono incollate fibre, anch'esse di poliammide, di dimensioni molto piccole.

Il processo inizia con l'impregnazione dei fili di poliammide con la resina, i fili vengono poi fatti passare in una camera in cui, tramite azione elettrostatica, il flock disperso in "nube" viene fatto aderire alla resina.

Nello stabilimento Finelvo per asciugare il collante ed innescarne la polimerizzazione si sfruttava una serie di tre forni essiccatori all'interno dei quali il filo passava ripetutamente.

Nelle prime ore del mattino, un lavoratore notò alcuni fili spezzati all'interno del secondo essiccatore e, seguendo le procedure standard, spense l'essiccatore e di conseguenza tutto l'impianto dal momento che i fili dovevano venire riannodati.

Lo spegnimento dell'impianto implicava anche lo spegnimento dei ventilatori e la chiusura delle valvole di regolazione del flusso di calore.

Durante le operazioni le porte di ispezione erano aperte e, a lavoro terminato, un operaio le stava richiudendo mentre un secondo lavoratore riaccendeva l'impianto, proprio nel momento in cui il secondo essiccatore si riaccese avvenne l'esplosione.

Dal momento che i ventilatori erano stati spenti e le valvole di controllo del flusso di calore chiuse, non vi era ricircolo di aria all'interno dell'essiccatore per cui il flock si era depositato sulle superfici degli scambiatori di calore.

Esplosioni di polveri di lana nell'industria tessile

Gli scambiatori erano però ancora pieni di olio a 270°C per cui il materiale plastico si surriscaldò, decomponendosi e andando quindi a produrre gas combustibili che si accumularono nei pressi degli scambiatori.

L'innesco fu probabilmente costituito dalla formazione di braci nello strato di materiale surriscaldato che si trasformò in fiamma viva nel momento in cui i ventilatori furono riaccesi. [17]

La fiamma andò quindi a innescare i gas formati per decomposizione.

Questa prima esplosione risolleò dalle superfici la polvere plastica che si era accumulata, per cui avvenne una prima esplosione secondaria, il cui fronte di fiamma si diramò nei condotti di passaggio dell'aria che terminavano nei filtri a maniche disposti all'esterno dello stabilimento; non potendo propagarsi attraverso i filtri, il fronte di fiamma tornò indietro all'interno delle tubazioni di scarico e raggiunse anche gli altri due essiccatori (tutti e tre i macchinari erano infatti collegati ad un unico condotto di scarico) causando sovrappressione e la conseguente apertura delle porte di ispezione.



Figura 3.10: *Condotti dell'impianto di abbattimento dell'aria*

4-Test di infiammabilità ed esplosività, analisi granulometriche e microscopiche, metodologie ed esiti delle misurazioni

4.1 Introduzione

In questo capitolo verranno esposte le metodologie di esecuzione del test di screening di infiammabilità ed esplosività, usate per determinare se una polvere è infiammabile o esplodibile a temperatura ambiente e per definirne l'eventuale magnitudo nell'ambito della valutazione dei rischi.

Il test di screening si compone di due test nel tubo di Hartmann, uno svolto con innesco elettrostatico, l'altro con filo caldo e con una prova in sfera di Siwek atta a determinare il Kst della polvere testata.

In questo capitolo vengono inoltre riportate le metodologie di analisi granulometrica e microscopica usate per ricavare la PSD e il diametro medio delle fibre di lana.

4.2 Analisi granulometriche e microscopiche

4.2.1 Analisi granulometriche, metodologie ed esiti delle misurazioni

Allo scopo di ottenere la PSD delle diverse particelle si è sfruttato un granulometro laser, il quale per ottenere la misura sfrutta la diffrazione della luce di un raggio laser causata dal passaggio di particelle all'interno del granulometro stesso.

Il raggio laser, a lunghezza d'onda fissata, viene rifratto 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 inserito.

Si riportano di seguito gli esiti dell'analisi granulometrica svolta sui campioni tessili forniti da aziende del settore del vercellese.

Esplosioni di polveri di lana nell'industria tessile

Tabella 4.1: *Esiti dell'analisi granulometrica.*

Identificativo del Campione	Tipo di lavorazione	Luogo di campionamento	d10 [µm]	d50 [µm]	d90 [µm]
132	Filatura (filatura pettinata)	Macchinari	3,057	13,706	261,485
133	Filatura (filatura pettinata)	Ambiente di lavoro	2,528	6,588	18,463
135	Cardatura	Ambiente di lavoro	Presente setacciatura sottovaglio		
142	Tessitura (orditura)	Ambiente di lavoro	5,463	23,896	168,966
144	Finissaggio	Macchinari	Presente setacciatura sottovaglio		
150	Tessitura (orditura)	Ambiente di lavoro	Presente setacciatura sottovaglio		
151	Filatura (filatura cardata)	Aspirazione a terra	Presente setacciatura sottovaglio		
154	Tessitura (orditura)	Ambiente di lavoro	3,107	19,772	159,601
156	Filatura (filatura pettinata)	Macchinari	10,432	32,592	221,39
158	Roccatura	Ambiente di lavoro	4,887	39,801	350,489
160	Finissaggio (cimitura)	Macchinari	Presente setacciatura sottovaglio		

Esplosioni di polveri di lana nell'industria tessile

Identificativo del Campione	Tipo di lavorazione	Luogo di campionamento	d10 [µm]	d50 [µm]	d90 [µm]
163	Cardatura	Ambiente di lavoro	11,792	55,011	329,377
164	Cardatura	Macchinari	22,988	193,92	613,098
165	Cardatura	Macchinari	12,352	59,344	341,081
168	Lavaggio (lavaggio greggio)	Macchinari	11,249	52,658	234,191
177	Ritorcitura	Ambiente di lavoro	2,323	6,351	16,772
178	Ritorcitura	Ambiente di lavoro	2,607	7,228	49,025
179	Filatura	Impianto di condizionamento	4,815	34,023	334,623
181	Preparazione	Ambiente di lavoro	5,617	17,059	54,123
182	Preparazione	Ambiente di lavoro	3,528	11,767	41,275
186	Preparazione carderia	Macchinari	6,41	55,181	380,552

Esplosioni di polveri di lana nell'industria tessile

Identificativo del Campione	Tipo di lavorazione	Luogo di campionamento	d10 [µm]	d50 [µm]	d90 [µm]
203	Cardatura e pettinatura	Filtro dei locali di carderia e pettinatura	2,481	14,278	37,509
208	Preparazione filatura	Ambiente	7,209	33,624	401,048
209	Preparazione filatura	Ambiente	11,699	35,929	282,83
211	Filatura	Impianto di aspirazione del reparto	14,5	126,849	471,641
212	Preparazione filatura	Impianto di aspirazione del reparto	5,664	33,848	471,865
213	Filatura	Impianto di aspirazione del reparto	12,399	106,612	495,948
214	Roccatura	Impianto di aspirazione del reparto	2,504	6,756	53,397

Esplosioni di polveri di lana nell'industria tessile

Identificativo del Campione	Tipo di lavorazione	Luogo di campionamento	d10 [µm]	d50 [µm]	d90 [µm]
215	Roccatura	Impianto di aspirazione del reparto	2,684	7,592	63,132
216	Dipanatura	Impianto di aspirazione del reparto	8,874	31,304	143,208
227	Impianto	Macchinari	16,358	115,486	500,096
232	Impianto	Ambiente di lavoro	14,998	57,703	272,374
296	Finissaggio (Cimatura)	Macchinari		ND	
297	Spazzolatura	Ambiente di lavoro	13,157	56,174	189,651
308	Finissaggio	Ambiente di lavoro		ND	
309	Preparazione su greggio	Ambiente di lavoro		ND	
310	Finissaggio	Ambiente di lavoro		ND	
311	Non specificata	Ambiente di lavoro		ND	
312	Non specificata	Ambiente di lavoro		ND	

Esplosioni di polveri di lana nell'industria tessile

Identificativo del Campione	Tipo di lavorazione	Luogo di campionamento	d10 [µm]	d50 [µm]	d90 [µm]
319	Pettinatura	Macchinari		ND	
321	Battitura e Cardatura	Ambiente di lavoro		ND	
323	Cardatura (Burr filter)	Ambiente di lavoro		ND	
324	Lavaggio	Filtro di lavaggio		ND	
325	Asciugatura	Filtro di Lavaggio-uscita dall'essiccatore		ND	

Si può notare come non sempre sia stato possibile ricavare il PSD delle particelle prese in esame, questo in quanto le analisi granulometriche risultano precise in presenza di particelle sferiche, ma perdono in accuratezza quando il campione ha natura fibrosa, alcune misure sono invece state rese impossibili dalla presenza di setacciatura sottovaglio.

Il problema è stato risolto grazie ad una analisi microscopica dei campioni, allo scopo di misurarne il diametro medio.

4.2.2 Analisi microscopiche, metodologie ed esiti delle misurazioni

Stante l'impossibilità di caratterizzare tutti i campioni con la loro PSD si è proceduto ad una analisi microscopica dei campioni stessi, volta alla misura del diametro medio delle polveri di lana, va inoltre ricordato che buona parte dei modelli sperimentali cercano correlazioni tra il diametro medio e il Kst di una polvere [18,19], quindi la misurazione del diametro medio delle particelle risultava essere uno degli step fondamentali dell'analisi delle caratteristiche di esplosività della lana stessa.

Per ricavare il diametro medio delle particelle ci si è avvalsi di un microscopio ottico munito di fotocamera, in modo da poter fotografare i campioni e usare un opportuno software per misurare il diametro delle singole fibre di lana da cui poi si è ricavato il diametro medio.

Si riportano di seguito gli esiti dell'analisi microscopica.

Esplosioni di polveri di lana nell'industria tessile

Tabella 4.2: *Esiti dell'analisi microscopica*

Campione	Tipo di lavorazione	Luogo di campionamento	Diametro delle fibre [µm]
132	Filatura (filatura pettinata)	Macchinari	9
133	Filatura (filatura pettinata)	Ambiente di lavoro	15
135	Cardatura	Ambiente di lavoro	15
142	Tessitura (orditura)	Ambiente di lavoro	17
144	Finissaggio	Macchinari	19
150	Tessitura (orditura)	Ambiente di lavoro	17
151	Filatura (filatura cardata)	Aspirazione a terra	ND
154	Tessitura (orditura)	Ambiente di lavoro	20
156	Filatura (filatura pettinata)	Macchinari	16
158	Roccatatura	Ambiente di lavoro	21
160	Finissaggio (cimatura)	Macchinari	16
163	Cardatura	Ambiente di lavoro	18,62
164	Cardatura	Macchinari	22,63
165	Cardatura	Macchinari	39

Esplosioni di polveri di lana nell'industria tessile

Campione	Tipo di lavorazione	Luogo di campionamento	Diametro delle fibre [µm]
168	Lavaggio (lavaggio greggio)	Macchinari	13
177	Ritorcitura	Ambiente di lavoro	14
178	Ritorcitura	Ambiente di lavoro	17,57
179	Filatura	Impianto di condizionamento	18,71
181	Preparazione	Ambiente di lavoro	16
182	Preparazione	Ambiente di lavoro	19,83
186	Preparazione carderia	Macchinari	41
203	Cardatura e pettinatura	Filtro dei locali di carderia e pettinatura	23,242
208	Preparazione filatura	Ambiente	21,67
209	Preparazione filatura	Ambiente	20,36
211	Filatura	Impianto di aspirazione del reparto	ND
212	Preparazione filatura	Impianto di aspirazione del reparto	15,95
213	Filatura	Impianto di aspirazione del reparto	16
214	Roccatatura	Impianto di aspirazione del reparto	17,6

Esplosioni di polveri di lana nell'industria tessile

Campione	Tipo di lavorazione	Luogo di campionamento	Diametro delle fibre [µm]
215	Roccatura	Impianto di aspirazione del reparto	22,27
216	Dipanatura	Impianto di aspirazione del reparto	15,67
227	Impianto	Macchinari	23
232	Impianto	Ambiente di lavoro	19,13
296	Finissaggio (Cimatura)	Macchinari	20,7
297	Spazzolatura	Ambiente di lavoro	16,8
308	Finissaggio	Ambiente di lavoro	18,2
309	Preparazione su greggio	Ambiente di lavoro	18,4
310	Finissaggio	Ambiente di lavoro	18,7
319	Pettinatura	Macchinari	22,876
320	Finissaggio (Cimatura)	Macchinari	20,525
321	Battitura e Cardatura	Ambiente di lavoro	19,871
323	Cardatura (Burr filter)	Ambiente di lavoro	21,393
324	Lavaggio	Filtro di lavaggio	21,173
325	Asciugatura	Filtro di Lavaggio-uscita dall'essiccatore	20,588

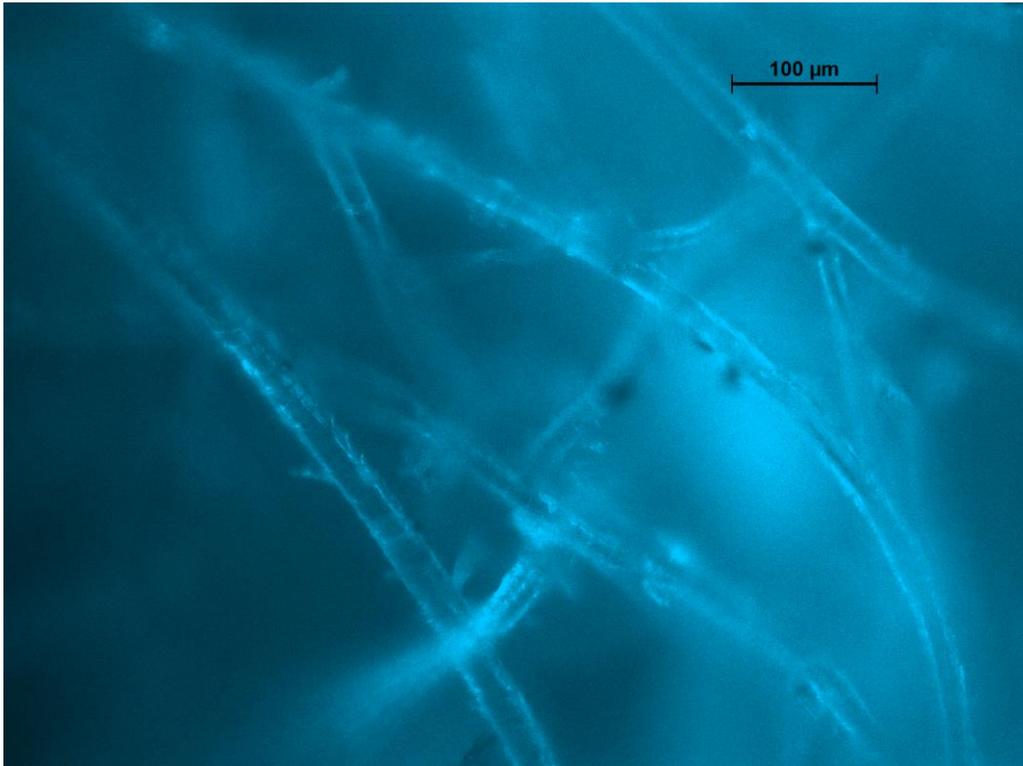


Figura 4.1: *Immagine microscopica del campione 164*

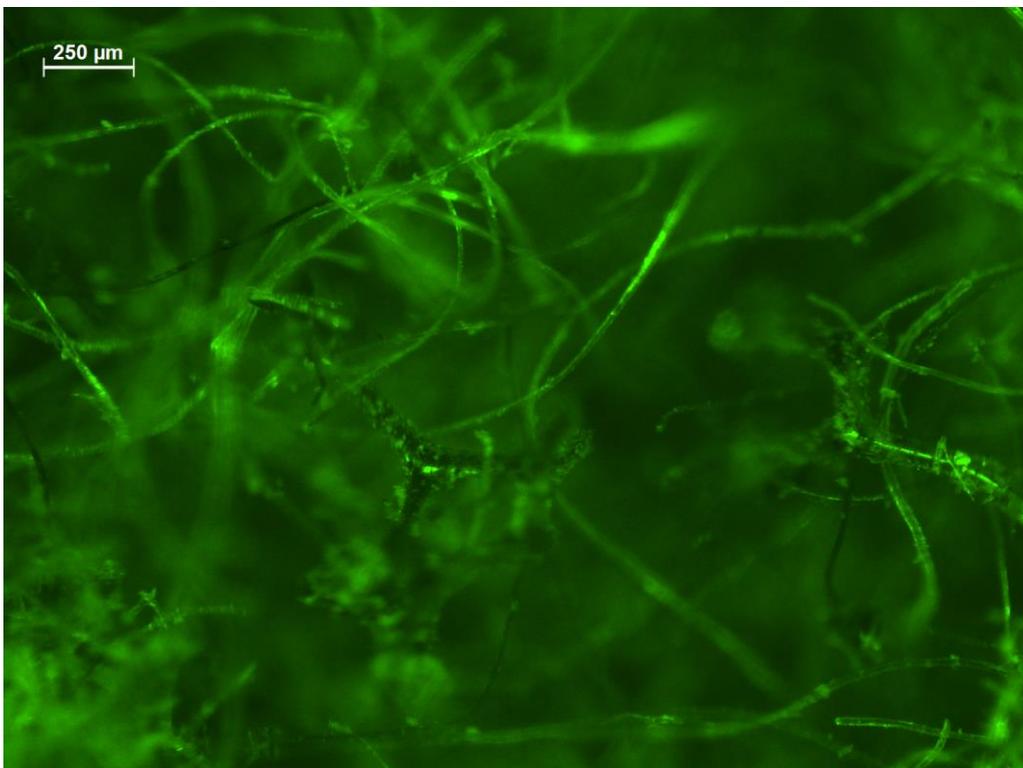


Figura 4.2: *Immagine microscopica del campione 209*

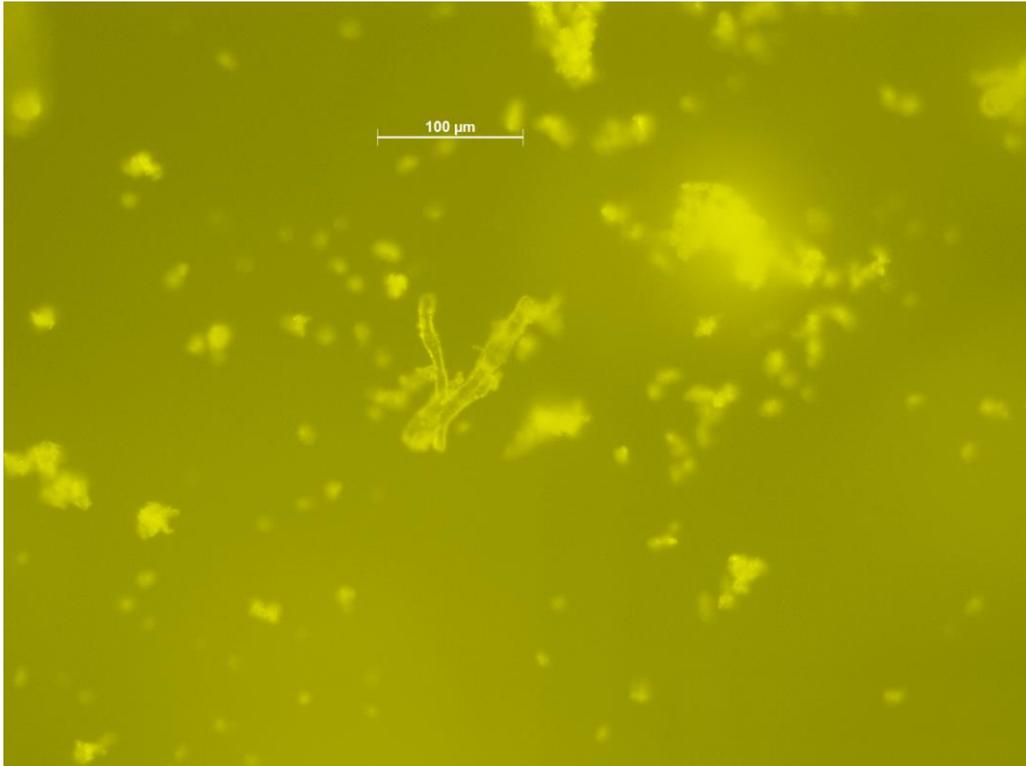


Figura 4.3: *Immagine microscopica del campione 217*

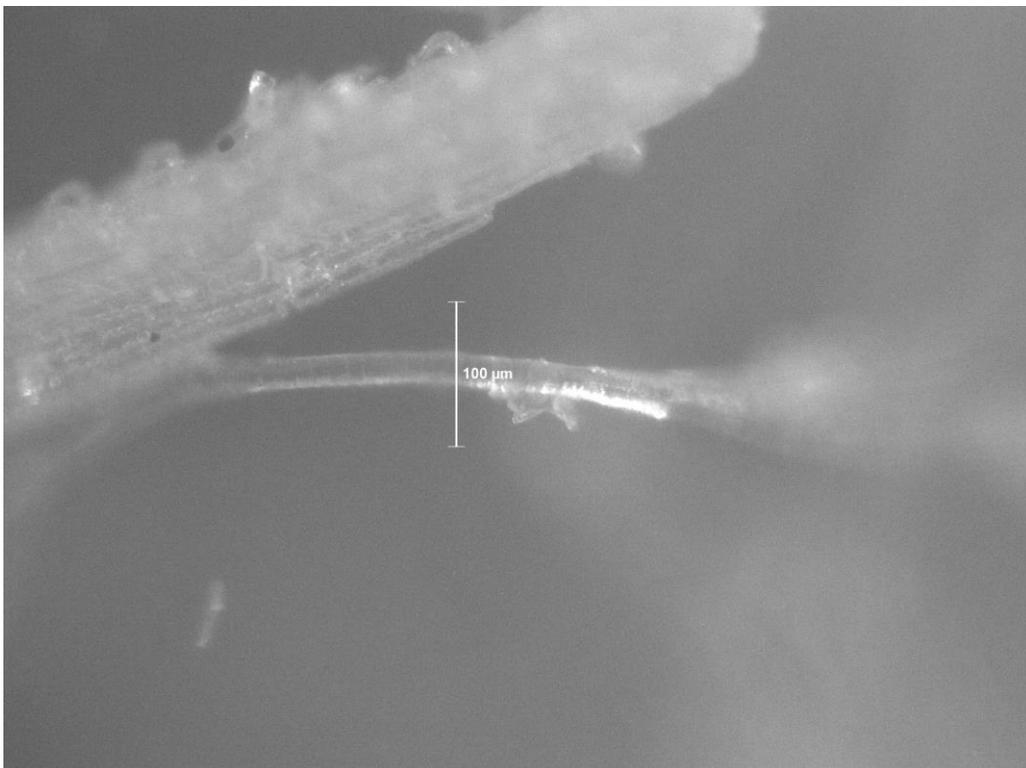


Figura 4.4: *Immagine microscopica del campione 319*

4.3 Misura dell'indice di disperdibilità-D.I. (Dustability Index)

A differenza di quanto avviene per le cosiddette “polveri convenzionali” i materiali fibrosi tendono ad aggregarsi in flock e ciò, ovviamente, va ad incidere sulla loro capacità di disperdersi in aria.

Ad oggi non esistono metodi specifici per valutare la tendenza alla dispersione in aria di quei materiali fibrosi che tendono a flocculare, si è quindi deciso di sviluppare un metodo semi-quantitativo capace di misurare la disperdibilità in nube dei particolati fibrosi o flocculenti.

Questo metodo si basa sulla valutazione di tre proprietà ovvero:

- I. Tendenza della polvere a disperdersi in particelle fini
- II. Tendenza della polvere scossa a depositarsi in aggregati o in particelle singole
- III. Comportamento della polvere sollecitata da un getto di aria in pressione

Ognuna delle tre proprietà viene valutata con un punteggio che spazia da 1 a 3 e la somma dei tre punteggi è definita Dustability Index (D.I.).

La terza proprietà viene calcolata utilizzando un tubo di Hartmann privo di innesco.

Si riportano di seguito la tabella di assegnazione del punteggio per il Dustability Index e gli esiti delle prove di misura del D.I.

Esplosioni di polveri di lana nell'industria tessile

Tabella 4.3: *Esiti delle prove di misura del D.I.*

Campione	Tipo di lavorazione	D.I. medio
324	Lavaggio	7
168	Lavaggio (lavaggio greggio)	7,5
325	Asciugatura	7
135	Cardatura	6
163	Cardatura	6
164	Cardatura	7
165	Cardatura	6
323	Cardatura (Burr filter)	6,5
203	Cardatura e pettinatura	8
319	Pettinatura	3
179	Filatura	6
211	Filatura	5
213	Filatura	3
151	Filatura (filatura cardata)	5
132	Filatura (filatura pettinata)	7,5
133	Filatura (filatura pettinata)	6,7
156	Filatura (filatura pettinata)	5
177	Ritorcitura	5
178	Ritorcitura	6,5
158	Roccatatura	5,5
214	Roccatatura	7
215	Roccatatura	7,5

Esplosioni di polveri di lana nell'industria tessile

Campione	Tipo di lavorazione	D.I. medio
216	Dipanatura	5,5
142	Tessitura (orditura)	6,3
150	Tessitura (orditura)	7
154	Tessitura (orditura)	7
144	Finissaggio	4
308	Finissaggio	6
310	Finissaggio	6
160	Finissaggio (cimatura)	3
296	Finissaggio (Cimatura)	6
320	Finissaggio (Cimatura)	7,5
297	Spazzolatura	8

Esplosioni di polveri di lana nell'industria tessile

Tabella 4.4: *Tabella di assegnazione del punteggio per il Dustability Index*

Score / Variabile	1	2	3
1	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
2	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	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.

4.4 Test di infiammabilità in tubo di Hartmann

Il tubo di Hartmann è una apparecchiatura costituita da un tubo di vetro cavo al cui interno è posizionato un innesco che può assumere due forme differenti: arco elettrico e filo caldo.

L'arco elettrico del tubo di Hartmann è un arco elettrico continuo creato da due elettrodi in tungsteno che creano una scarica energetica di 525 mJ.

L'innesco a filo caldo è costituito da una treccia di fili di lega di ferro, attraversati da una corrente e dunque resi incandescenti per effetto Joule.

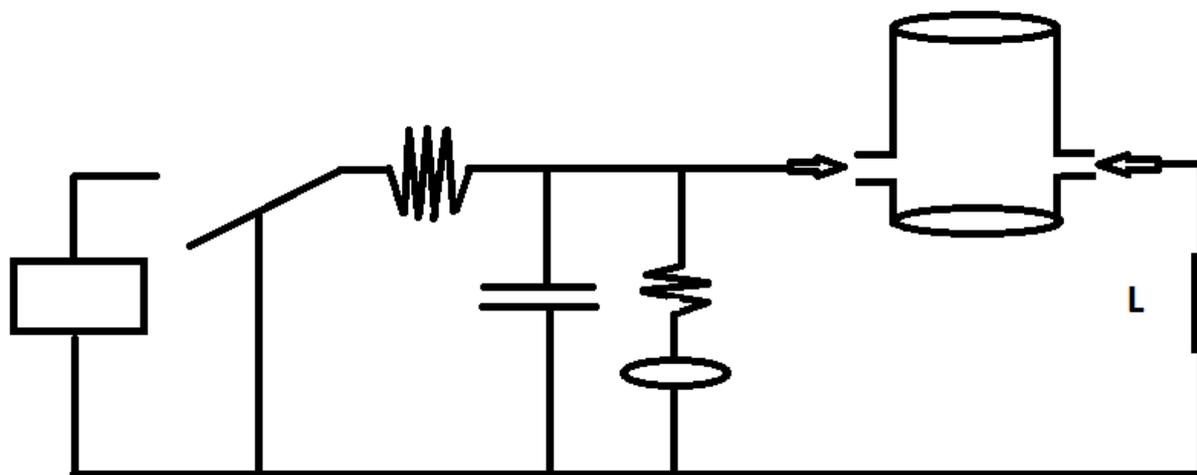


Figura 4.5: *Circuito di scarica per generare l'arco elettrico nel tubo di Hartmann*

4.5 Test di esplodibilità in sfera Siwek

La forza dell'esplosione causata da una polvere viene misurata attraverso il parametro della Kst.

Il Kst (indice di esplodibilità) rappresenta la massima forza generata dall'esplosione in termini di velocità di crescita della pressione.

Esso si riferisce alla crescita di pressione in un contenitore chiuso, posto sotto opportune condizioni operative, ed è misurato in bar·m/s.

In base al Kst misurato la polvere è classificata con un numero da 1 (basse velocità di crescita della pressione) a 3 (alte velocità di crescita della pressione).

Tabella 4.5: *classificazione dell'indice di esplodibilità delle polveri [1]*

Indice di esplosione Kst [bar·m/s]	Classe St	Esplosività
0	St-0	Assenza di esplosività
1-200	St-1	Bassa esplosività
200-300	St-2	Media esplosività
>300	St-3	Elevata esplosività

Esplosioni di polveri di lana nell'industria tessile

Allo scopo di misurare il Kst ci si avvale della sfera Siwek.

La sfera Siwek è una sfera in acciaio inossidabile di 20 litri con una camicia ad acqua per il raffreddamento 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 stessa.

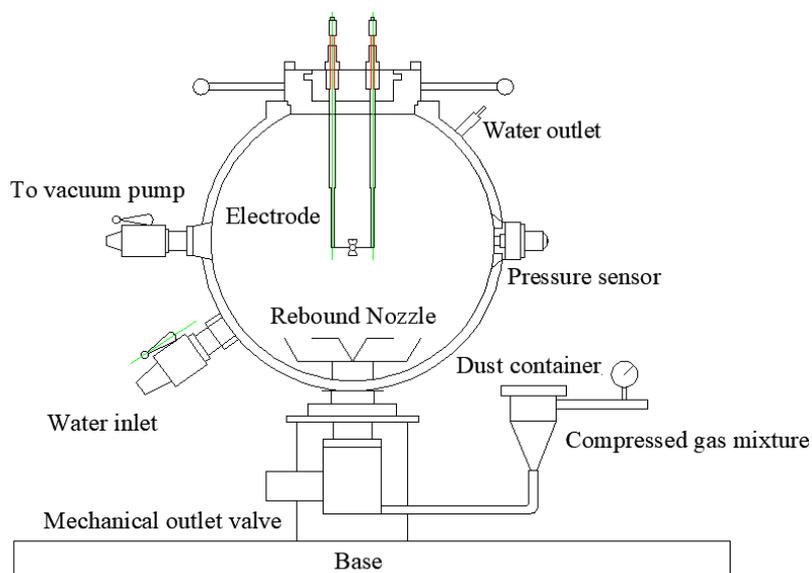


Figura 4.6: *Schema di funzionamento di una sfera Siwek da 20l*

Si riportano di seguito gli esiti delle prove di misura del Kst.

Esplosioni di polveri di lana nell'industria tessile

Tabella 4.6: *Esiti delle prove in sfera*

Campione	Tipo di lavorazione	Kst [bar·m/s]
324	Lavaggio	60,1
168	Lavaggio (lavaggio greggio)	110
325	Asciugatura	48
321	Battitura e Cardatura	40,5
135	Cardatura	44,8
165	Cardatura	46,1
203	Cardatura e pettinatura	73,8
132	Filatura (filatura pettinata)	96
133	Filatura (filatura pettinata)	52
158	Roccatura	53,1
214	Roccatura	94,5
215	Roccatura	81,7
186	Preparazione carderia	97,4
208	Preparazione filatura	86,2
209	Preparazione filatura	60,4
142	Tessitura (orditura)	126
154	Tessitura (orditura)	82,8
160	Finissaggio (cimatura)	25,7
297	Spazzolatura	110,3

5-Correlazioni, risultati e conclusioni

5.1 Correlazioni tra lavorazioni tessili, luogo di campionamento, dimensioni ed esplosibilità della fibra

Dai dati raccolti appare chiaro che la dimensione delle fibre dipende dalle lavorazioni che queste ultime hanno subito e che a luoghi di campionamento diversi corrispondono diversi diametri e diverse PSD.

Si nota infatti che le cosiddette “polveri ambientali”, ovvero tutte quelle polveri raccolte dai luoghi di lavoro o nei sistemi di ventilazione, sono caratterizzate da diametri minori e da una maggiore percentuale di fini, e di conseguenza sono correlate ad un maggiore D.I.

Al contrario le fibre raccolte nei macchinari dimostrano una maggiore tendenza all'aggregazione, con conseguente minore D.I., e un diametro maggiore.

Questa differenza comporta una maggiore pericolosità delle cosiddette “polveri ambientali” che infatti, come ci si potrebbe aspettare, mostrano dei Kst più elevati.

Non si è trovata alcuna correlazione diretta tra il diametro delle fibre ed il D.I.

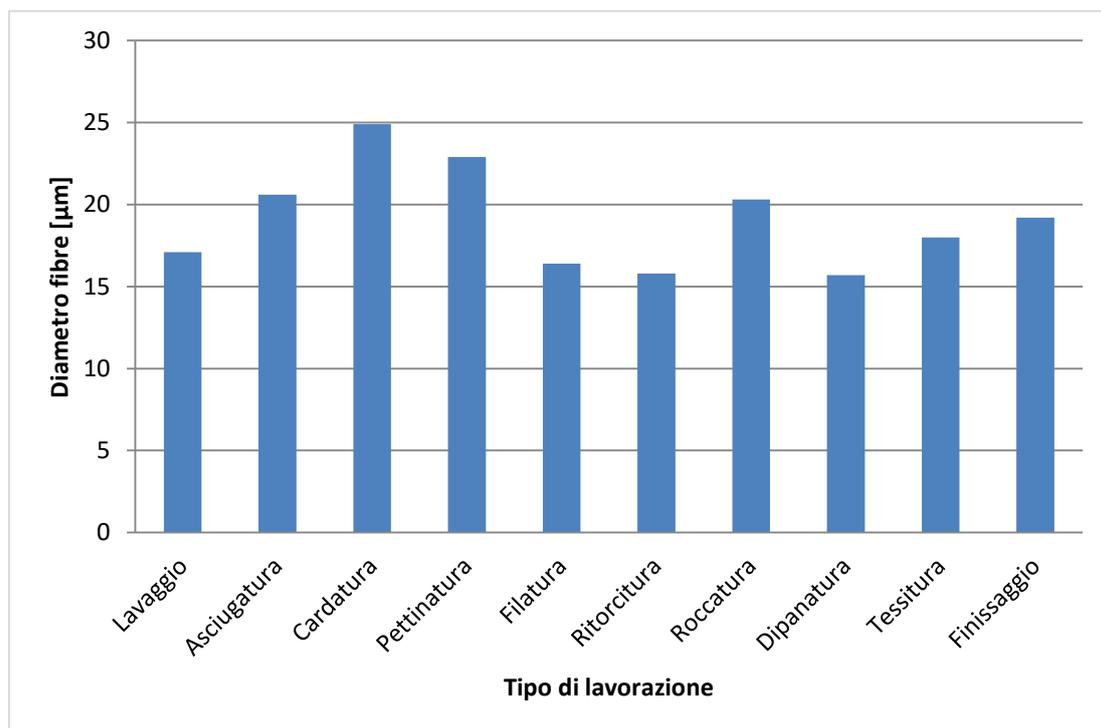


Grafico 5.1: *Correlazione tra il diametro delle fibre e il tipo di lavorazione*

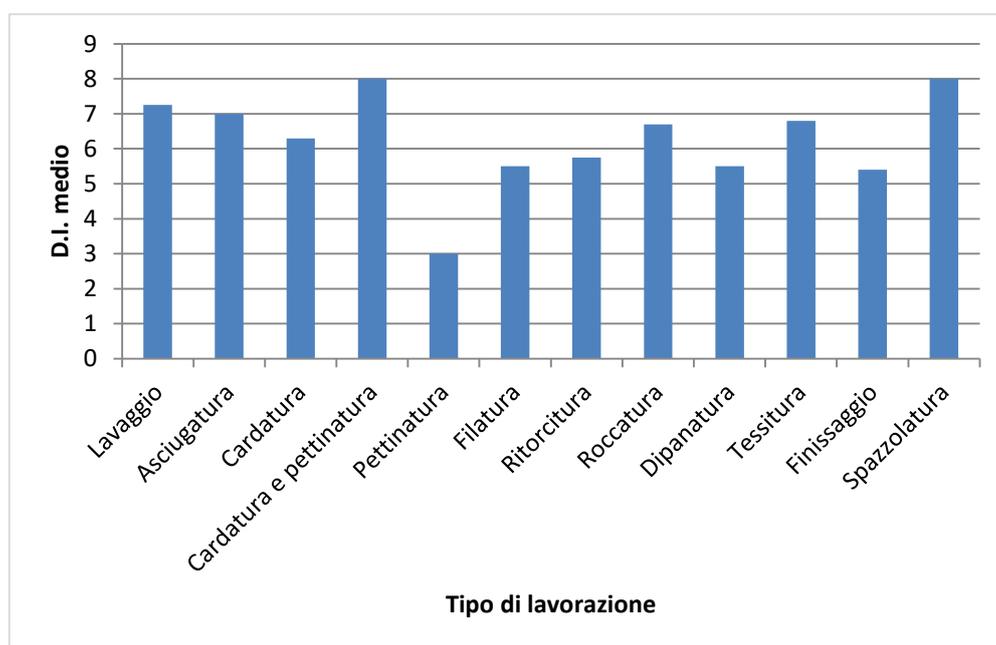


Grafico 5.2: *Correlazione tra il D.I. delle fibre e il tipo di lavorazione*

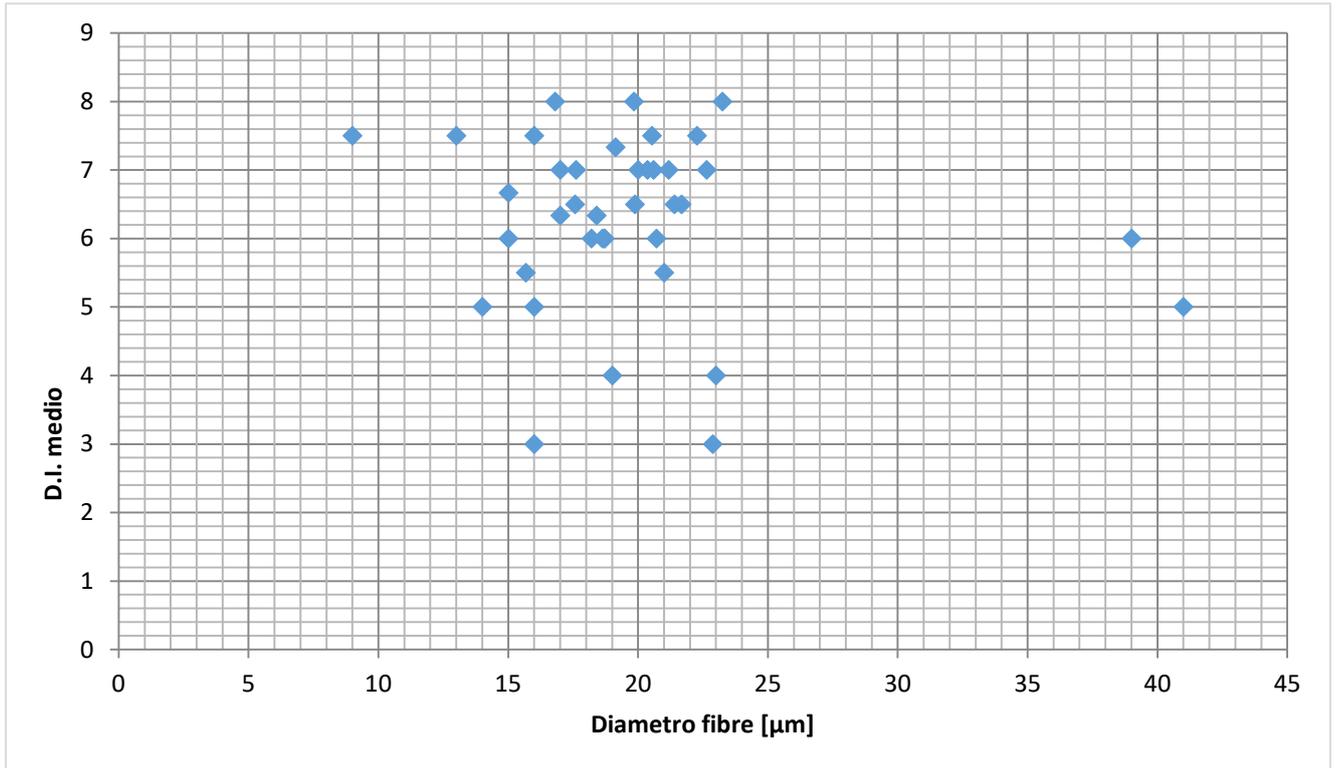


Grafico 5.3: Assenza di correlazione tra il diametro e il D.I. delle fibre

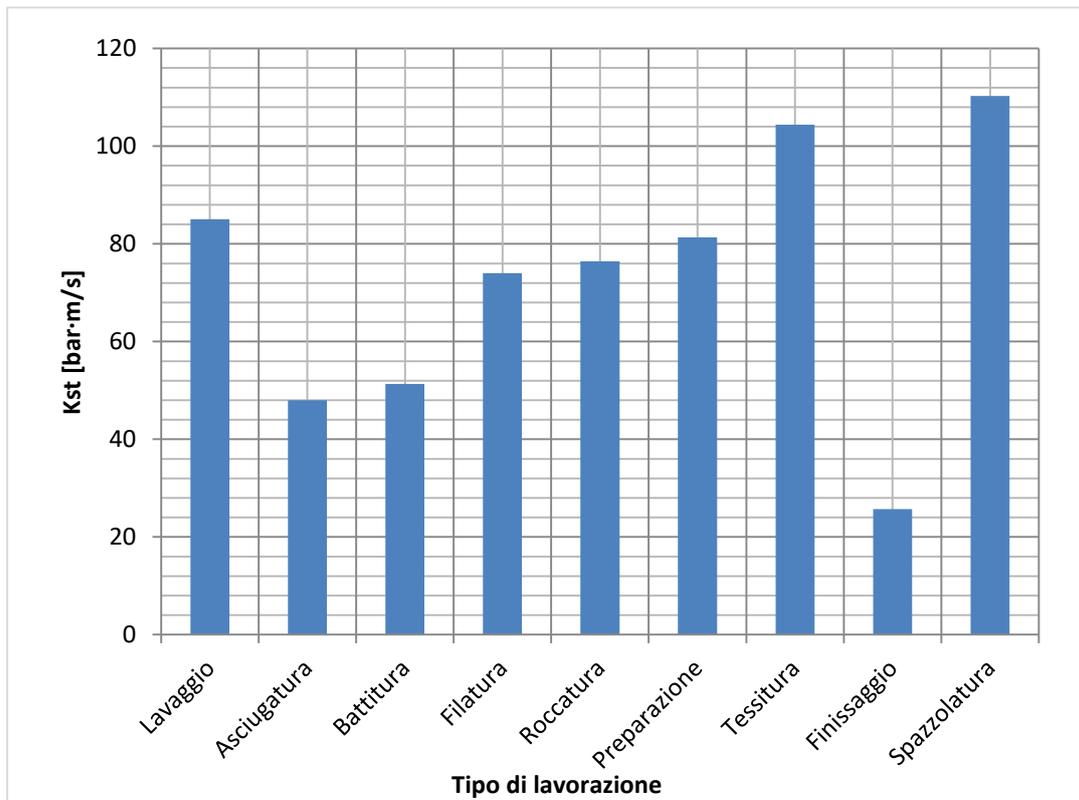


Grafico 5.4: Correlazione tra il Kst delle fibre e il tipo di lavorazione

5.2 Correlazioni tra diametro ed esplosibilità delle fibre di lana

Nelle fibre di lana non si riscontra una evidente correlazione tra diametro della particella misurato tramite microscopia e il Kst.

Come ci si potrebbe aspettare, comunque, al diminuire del diametro si misura un aumento del Kst dovuto alla maggiore superficie esposta per unità di volume.

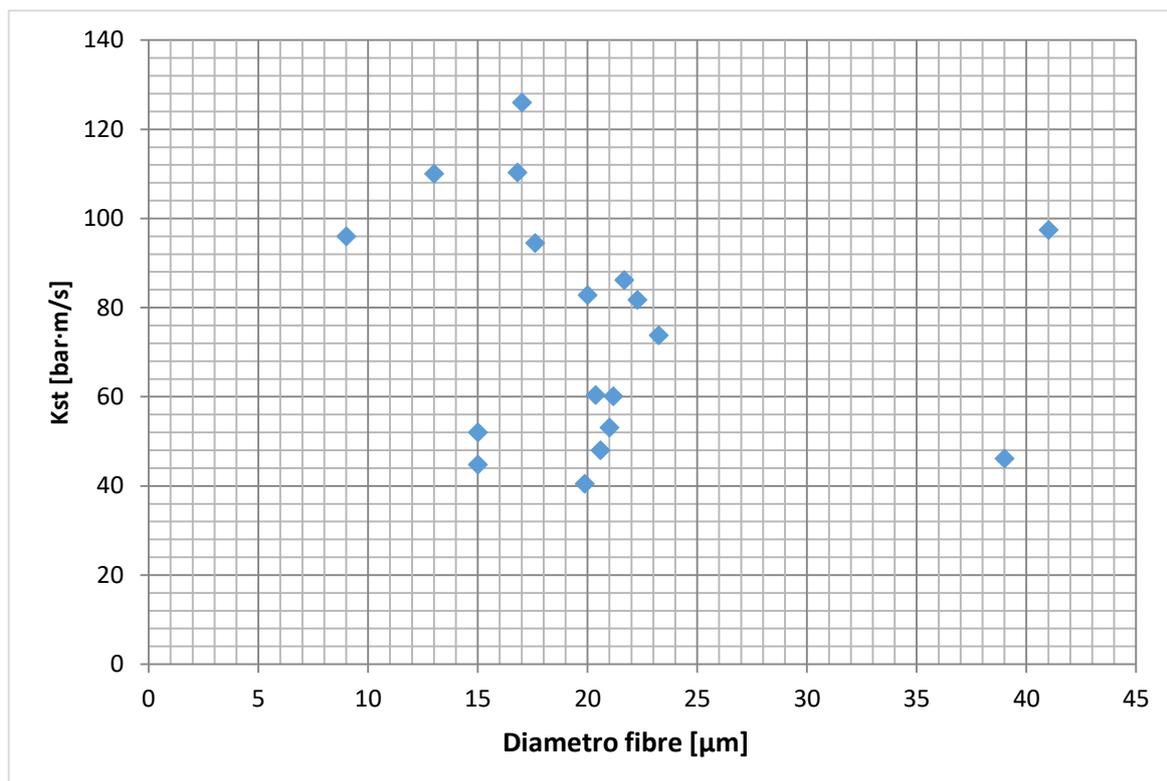


Grafico 5.5: *Correlazione tra Kst e il diametro delle fibre*

5.3 Correlazioni tra D.I. ed esplosibilità delle fibre di lana

A differenza di quanto visto per il diametro, è possibile stabilire una evidente correlazione tra il D.I. e il Kst di una polvere di lana

La distribuzione apparentemente ampia dei dati va collegata alle imprecisioni statistiche legate al numero relativamente piccolo di campioni e al fatto che il D.I. non sembra essere correlato al diametro della particella, il quale è però legato al Kst.

Pur con la necessità di ulteriori indagini pare evidente che i campioni con D.I. maggiore di 6 mostrano Kst più elevati e debbano quindi essere considerati pericolosi.

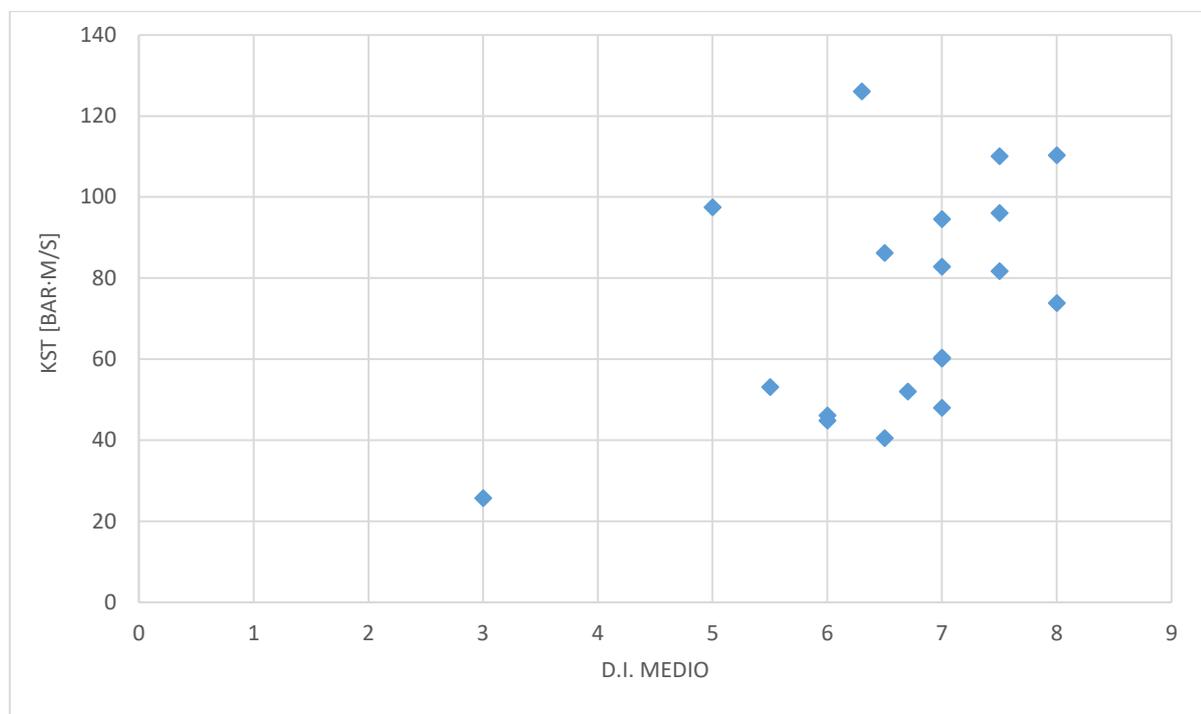


Grafico 5.6: *Correlazione tra il D.I. e l'esplosività delle fibre*

5.4 Considerazioni sul lavoro svolto e conclusioni

Nel corso della campagna sperimentale si è andati incontro ad una serie di problematiche che, nell'ottica di un futuro proseguimento delle ricerche nell'ambito dello studio delle esplosioni delle “polveri non convenzionali” vanno evidenziati, in modo da poter essere di supporto a chi si troverà a operare nello stesso ambito.

In primo luogo va sottolineata la difficoltà nel ricavare la PSD delle polveri fibrose, strumento necessario per qualunque analisi di esplodibilità in quanto, ad oggi, tutti i modelli di esplosività sono volume, e quindi diametro, correlati.

Il processo necessario a ricavare la PSD, oltre ad essere molto laborioso è spesso frustrato sia dalla tendenza all'aggregazione e alla flocculazione delle polveri studiate, sia dalla loro natura intrinsecamente fibrosa, il che porta spesso a ottenere dei risultati privi di attendibilità.

La soluzione trovata nel corso della campagna sperimentale è stata quella di affiancare all'analisi granulometrica quella microscopica, questa soluzione, per quanto consenta di ottenere risultati affidabili, è persino più laboriosa dell'analisi granulometrica.

Solo di recente stanno aparendo in letteratura nuovi metodi di calcolo del diametro delle particelle fibrose che consentirebbero di bypassare buona parte dei problemi incontrati nel corso della campagna sperimentale svolta, consentendo di trattare in maniera accurata un numero maggiore di campioni, ottenendo quindi dati e correlazioni statisticamente più affidabili. [20]

Vanno inoltre sottolineate altre problematiche legate allo studio delle polveri “non tradizionali”, in particolare di quelle tessili che, come noto, tendono a flocculare.

Nell'analizzare l'esplodibilità delle normali polveri colui che si trova ad usare apparecchiature quali il tubo di Hartmann, nella modalità con “filo caldo”, e la sfera Siwek viene avvisato che, seppur in maniera relativamente leggera, il primo sottostima l'eventuale esplodibilità di una polvere mentre la seconda, soprattutto in caso di utilizzo di inneschi particolarmente energetici, tende invece ad una leggera sovrastima della forza dell'eventuale esplosione.

Nelle analisi svolte su fibre tessili si è notata una tendenza diametralmente opposta: la natura flocculante delle polveri tessili tende a farle aggregare sopra il filo caldo del tubo di Hartmann, causando fiamme anche in quei campioni che non si innescherebbero semplicemente sfiorando il filo caldo.

Al contrario nella sfera Siwek si verifica una diminuzione del Kst atteso, questo problema è legato al fatto che, nonostante si utilizzi un sistema di dispersione delle polveri ad aria compressa, queste ultime tendono a rimanere comunque “aggregate” in flocculi, diminuendo la superficie esposta per unità di volume, riducendo quindi sia la tendenza all'esplosione che la forza dell'esplosione stessa.

Dai dati raccolti appare chiaro che la dimensione delle fibre dipende dalle lavorazioni che queste ultime hanno subito e che a luoghi di campionamento diversi corrispondono diversi diametri medi e dunque diverse PSD.

Nel corso della campagna sperimentale è emersa l'importanza del D.I. come strumento di misura della tendenza delle polveri fibrose a formare nubi, questa caratteristica è intuitivamente correlabile alla pericolosità della polvere stessa in quanto a differenza delle polveri che si accumulano in strato che tendono a incendiarsi, quelle disperse in nube tendono a esplodere.

Pur non essendo stata riscontrata alcuna correlazione tra il diametro della particella e il D.I. è invece riscontrabile una stretta relazione tra il D.I. e il luogo di campionamento.

Si nota infatti che le polveri ambientali, ovvero le polveri raccolte direttamente sul luogo di lavoro o nei sistemi di ventilazione sono caratterizzate da diametri relativamente piccoli, elevata percentuale di fini ed elevato D.I., quindi non stupisce che queste polveri mostrino dei Kst più elevati, a dimostrazione della loro maggiore pericolosità rispetto alle polveri raccolte direttamente sui macchinari, queste ultime infatti tendono a flocculare e a formare aggregati, con conseguente D.I. minore e dunque Kst minori.

Dai dati analizzati non si riscontra una forte correlazione tra diametro della particella misurato tramite microscopia e il Kst.

Come ci si potrebbe aspettare, comunque, al diminuire del diametro si misura un aumento del Kst dovuto alla maggiore superficie esposta per unità di volume.

Esplosioni di polveri di lana nell'industria tessile

A differenza di quanto visto per il diametro, è possibile stabilire una forte correlazione tra il D.I. e il Kst di una polvere di lana, al punto tale che, con una certa sicurezza, si può affermare che polveri il cui D.I. sia maggiore o uguale a sei debbano essere considerate come potenzialmente pericolose.

A conclusione del lavoro di tesi è importante sottolineare come, onde evitare il ripetersi di eventi incidentali come quelli riportati nel corso del testo è di vitale importanza proseguire nelle analisi sperimentali sul fenomeno che, a causa del suo essere apparentemente circoscritto viene spesso sottostimato.

Si raccomanda inoltre una corretta pulizia degli ambienti di lavoro, è infatti risultato chiaro che, salvo per la floccatura, che risulta essere intrinsecamente pericolosa per l'uso congiunto di alte temperature, grandi ricircoli d'aria, e di fibre e collanti particolarmente proni all'ignizione, alla base di quasi tutti gli eventi esplosivi ci siano stati accumuli di polvere ambientale che, una volta in preda alle fiamme per i più vari motivi (scintille elettrostatiche, scariche elettriche, combustioni in brace...), hanno fatto da innesco a nubi di polveri, dalla cui esplosione primaria sono spesso derivate per effetto domino esplosioni secondarie, causa di buona parte dei danni sia in termini materiali che di perdita di vite umane.

Risulta evidente quindi che evitare l'accumulo localizzato di polveri sia, oltre che una corretta pratica di igiene industriale, anche la prima linea di difesa contro gli eventi incidentali.

Bibliografia

- [1] *Regolamento (UE) n. 1007/2011 del Parlamento europeo e del Consiglio, del 27 settembre 2011.*
- [2] <https://imprendo.co/suddivisione-delle-fibre-tessili/>
- [3] Fondazione ACIMIT, *Quaderni di tecnologia tessile.*
- [4] T. Abbasi, S.A. Abbasi, *Dust explosions—Cases, causes, consequences, and control*, Journal of Hazardous Materials, Volume 140, Issues 1–2, 2007, 7–44.
- [5] D. A. Crowl, J. F. Louvar, *Chemical Process Safety, Fundamentals with Application*, Pearson 2011.
- [6] F.P. Lees, *Loss Prevention in the Process Industries—Hazard Identification, Assessment and Control*, vol. 2, Butterworth-Heinemann, Oxford, 2005.
- [7] R.D. Pickup, *Dust explosion case study: Bad things can still happen to good companies*, Process Safety Prog. 20 (2001) 169–172.
- [8] R. K. Eckoff, *Dust Explosions in the Process Industries*, Gulf Professional, Publishing, 1997.
- [9] <https://emars.jrc.ec.europa.eu/en/emars/content>
- [10] Investigation Report “Combustible Dust hazard Study” NO. 2006-H-1.
- [11] <https://www.aria.developpement-durable.gouv.fr>
- [12] U.S. Fire Administration/*Technical Report Series, Manufacturing Mill Fire, Methuen, Massachusetts, USFA-TR-110/December 1995, Homeland Security.*
- [13] N. Piccinini *Dust explosion in a wool factory: Origin, dynamics and consequences*, Fire Safety Journal 43 (2008) 189–204.
- [14] P. Salatino, A. Di Benedetto, R. Chirone, E. Salzano, R. Sanchirico *Analysis of an Explosion in a Wool-Processing Plant*, Ind. Eng. Chem. Res. 2012, 51, 7713–7718.

- [15] L. Marmo, A. Ferri, E. Danzi, *Dust explosion hazard in the textile industry*, Journal of Loss Prevention in the Process Industries volume 62, November 2019, 103935.
- [16] L. 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.
- [17] L. Marmo, E. Danzi, *Dust explosion hazard in the textile industry*, MCS 10.
- [18] P. Amyotte, F. Khan, S. Boilard, I. Iarossia, C. Cloneya, A. Dastidare, R. Eckhoff, L. Marmo, R. Ripley, *EXPLOSIBILITY OF NONTRADITIONAL DUSTS: EXPERIMENTAL AND MODELING CHALLENGE*, SYMPOSIUM SERIES NO. 158, Hazards XXIII, 2012 Icheme.
- [19] S. M. Worsfold, P. R. Amyotte, F. I. Khan, A. G. Dastidar, and R. K. Eckhoff, *Review of the Explosibility of Nontraditional Dusts*, Ind. Eng. Chem. Res. 2012, 51, 7651–7655.
- [20] Z. Deng, W. Ke, *A New Measuring Method of Wool Fiber Diameter Based on Image Processing*, 2010 2nd International Conference on Signal Processing Systems (ICSPS).

Ringraziamenti

Grazie a mia madre per avermi messo al mondo

A mio padre, semplice e profondo

Grazie agli amici per la loro comprensione

Ai giorni felici della mia generazione

Grazie alle ragazze, a tutte le ragazze

[Ma che film la vita, Nomadi]