

# POLITECNICO DI TORINO

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Meccanica L-31



Tesi di laurea magistrale:

## **Analisi delle Esplosioni da Polveri in Ambienti Industriali: Rischi e Normative di Prevenzione**

**Relatore:**

Prof. Enrico Pons

**Correlatore:**

Prof. Luca Marmo

**Studente:**

Francesca Grieco

Matr. 292804

Anno Accademico 2023/2024

# INDICE

LISTA DELLE FIGURE .....	5
LISTA DELLE TABELLE .....	6
Abbreviazioni.....	7
Abstract.....	9
Introduzione .....	10
1.Generalità sulle esplosioni da polvere.....	11
1.1Analisi del processo delle esplosioni da polveri.....	12
1.2Condizioni in cui sussiste il rischio di esplosioni da polvere .....	13
1.3Parametri chiave delle esplosioni da polveri .....	14
1.3.1 Fattori determinanti della probabilità di esplodibilità .....	14
1.4 Fonti di innesco .....	25
1.4.1 Scariche elettrostatiche .....	26
1.4.2 Fiamme libere.....	28
1.4.3 Superfici calde e attrito dei componenti meccanici .....	28
1.4.4 Scintille meccaniche .....	29
1.4.5 Materiali piroforici .....	29
1.4.6 Impianti elettrici .....	29
1.4.7 Sorgenti esterne .....	29
1.5 Esplosioni di Polveri: Primarie e Secondarie.....	30
1.6 Strati di polvere .....	31
1.6.1 Pericolosità degli strati di polvere .....	31
1.6.2 Calcolo spessore strato di polvere limite .....	32
1.6.2.1 Esempio con farina di frumento .....	33
1.6.2.2 Esempio con grano .....	33
1.6.2.3 Esempio con alluminio.....	34
1.6.2.4 Esempio con cellulosa.....	34
1.6.2.5 Esempio con legno.....	35
1.6.2.6 Esempio con cotone .....	35
1.6.2.7 Lesson Learning .....	35
1.6.3 Calcolo degli elementi per la definizione delle estensioni delle zone pericolose .....	36
1.6.3.1 Distanza pericolosa $d_z$ e quota "a" .....	36
1.6.3.2 Esempi di calcolo .....	40
1.6.3.2.1 Farina di frumento.....	40
1.6.3.2.2 Grano.....	41
1.6.3.2.3 Alluminio .....	42

1.6.3.2.4 Cellulosa .....	43
1.6.3.2.5 Legno .....	44
1.6.3.2.6 Cotone .....	44
1.6.4 Determinazione dei tipi e delle estensioni delle singole zone pericolose originate da strati di polvere.....	45
1.6.5 Valutazione del Rischio di Esplosione da Polvere secondo la Guida CEI 31-56.....	46
2.Casi di esplosioni da polveri .....	49
2.1 Settori interessati da episodi di esplosioni da polvere .....	50
2.1.1 Mulini di farina di Tradeston: Scozia ,1872 .....	52
2.1.1.1 Descrizione dell'incidente.....	52
2.1.1.2 Analisi.....	52
2.1.2 Deposito per l'Esportazione di Cereali a Corpus Christi, Texas, 1981 .....	52
2.1.2.1 Descrizione dell'Incidente.....	52
2.1.2.2 Analisi.....	53
2.1.3 Tessitura di lino di Harbin 1987 .....	54
2.1.3.1 Descrizione dell'Incidente.....	54
2.1.3.2 Analisi .....	54
2.1.4 SEMABLA impianto stoccaggio cereali: Francia,1997.....	55
2.1.4.1 Descrizione dell'Incidente.....	55
2.1.4.2 Analisi.....	55
2.1.5 Azienda farmaceutica Concept Sciences ad Allentown, Pennysylvania, 1999.....	57
2.1.5.1 Descrizione dell'Incidente.....	57
2.1.5.2 Analisi.....	57
2.1.6 Molino Cordero Fossano,2007 .....	57
2.1.6.1 Descrizione dell'Incidente.....	57
2.1.6.2 Analisi.....	58
2.1.7 Pettinatura italiana ,2001 .....	58
2.1.7.1 Descrizione dell'Incidente.....	58
2.1.7.2 Analisi.....	58
2.2 Analisi delle non conformità rispetto alle norme .....	59
2.2.1 Ulteriori analisi e considerazioni .....	62
3.Normative di riferimento.....	64
3.1 Introduzione.....	64
3.2 Analisi comparativa .....	65
3.2.1 Campo di applicabilità .....	66
3.2.2 Misure tecniche per la prevenzione e la protezione contro le esplosioni.....	67
3.2.3 Mantenimento della pulizia.....	70

3.2.3.1 Livelli di efficacia dei provvedimenti di pulizia.....	70
3.2.3.1.1 60079-10-2.....	70
3.2.3.1.2 CEI 31-56.....	70
3.2.3.1.3 NFPA 499.....	71
3.2.3.1.3.1 Confronto critico tra gli ordini di grandezza degli spessori secondo la CEI 31-56 e la NFPA 499.....	73
3.2.3.1.3.2 Confronto tra la Norma CEI 31-56 e la NFPA 499 sulla Gestione del Rischio di Esplosione da Polveri.....	75
3.3 Analisi comparativa delle norme .....	77
3.3.1 Comparazione delle Normative sul Mantenimento della Pulizia .....	78
3.3.2 Classificazione delle aree a rischio esplosione .....	79
3.3.2.1 Concetti base della IEC 60079-10-2 .....	80
3.3.2.2 Classificazione aree di rischio secondo la norma IEC 60079-10-2 e la guida CEI EN 31-56.....	80
3.3.2.2.1 Procedura per la classificazione delle aree .....	84
3.3.3.1 Classificazione aree di rischio secondo la norma NFPA 499 .....	86
3.3.3.1.2 Classificazione delle aree pericolose di classe II secondo la NFPA 70.....	87
3.3.1.3 Analisi comparativa per la classificazione delle aree a rischio esplosione delle tre norme.....	87
3.3 Il problema posto dagli strati di polvere in ambienti a rischio esplosione.....	88
3.3.1 CEI EN 60079-10-2 .....	88
3.3.2 GUIDA CEI EN 31-56.....	89
3.3.3Confronto tra CEI EN 60079-10-2 E LA CEI EN 31-56.....	90
3.3.3.1 Gestione e rimozione degli strati di polvere .....	91
3.3.4 NFPA 499 .....	93
3.4 Comparazione delle norme per la gestione degli strati di polvere in ambienti a rischio esplosione	94
4.Considerazioni .....	98
4.1 Riepilogo normative.....	98
4.1.1 IEC 60079-10-2.....	101
4.1.2 CEI 31-56.....	102
4.1.3 NFPA 499 .....	103
4.2 Prevenzione e protezione dalle esplosioni da polveri .....	104
4.2.1 Misure preventive .....	104
4.2.2 Sistemi di protezione.....	105
4.3 Conclusioni.....	105
BIBLIOGRAFIA .....	107
SITOGRAFIA .....	107

# LISTA DELLE FIGURE

Figura 1 - Combustione del legno .....	12
Figura 2- Il pentagono delle esplosioni da polveri .....	14
Figura 3 - L'intervallo di concentrazioni di polvere esplosive nell'aria a temperatura normale e pressione atmosferica per una tipica polvere organica naturale. ....	16
Figura 4 - Il potenziale pericolo anche di sottili strati di polvere. ....	17
Figura 5 - Grandezza media delle particelle.....	18
Figura 6 - Illustrazione dell'aumento dell'area specifica di un solido con l'aumentare della suddivisione .....	19
Figura 7 - L'influenza del contenuto di ossigeno nel gas sulla pressione massima di esplosione e sulla massima velocità di aumento della pressione delle concentrazioni di polvere di lignite. ....	20
Figura 8 - Influenza del diametro medio delle particelle sulla concentrazione minima esplosiva. ....	22
Figura 9 - Influenza della turbolenza iniziale sulla velocità di esplosione di una nuvola di polvere.....	24
Figura 10 - L'influenza della turbolenza iniziale sull'innesco minimo di scintille elettriche nelle nubi di polvere. ....	25
Figura 11 - Scariche elettrostatiche comuni. ....	27
Figura 12 - Confronto dei range di energie minime di accensione di polveri e gas nell'aria, con le energie equivalenti di vari tipi di scariche elettrostatiche. ....	28
Figura 13 - Come l'onda d'urto da un'esplosione primaria (a) trascina e disperde uno strato di polvere, che (b) viene successivamente accesa dalla fiamma primaria della polvere. ....	30
Figura 14 - Distanza di riferimento $d_0$ per SE in prossimità del suolo da sistema in pressione (ad alta velocità) e velocità dell'aria $w \leq 0,5$ m/s.....	37
Figura 15 - Distanza di riferimento $d_0$ per SE in prossimità del suolo da sistema in pressione (ad alta velocità) e velocità dell'aria $w \leq 2$ m/s .....	38
Figura 16 - Esplosione del silo per lo stoccaggio di grano a Corpus Christi.....	53
Figura 17 - Danni nell'area di scarico ferroviario .....	54
Figura 18 - Schema dell'incidente della Harbin Linen Textile. ....	55
Figura 19 – Propagazione interna dell'esplosione .....	56
Figura 20 - Post esplosione.....	56
Figura 21 - Zona 20.....	81
Figura 22 - Zona 21.....	82
Figura 23 - Zona 22.....	82
Figura 24 - Esempio Silo di stoccaggio della farina.....	84

# LISTA DELLE TABELLE

Tabella 1 - Classificazione delle polveri in funzione della costante $k_{st}$ .....	16
Tabella 2 - ossidazione di varie sostanze per mole di $O_2$ consumata. ....	21
Tabella 3 - Proprietà polveri organiche e metalliche.....	24
Tabella 4 - Distanza $d_h$ .....	38
Tabella 5 - Coefficiente $k_d$ .....	39
Tabella 6 - Coefficiente $k_u$ .....	40
Tabella 7 - Coefficiente $k_{ta}$ .....	40
Tabella 8 - Coefficiente $k_w$ .....	40
Tabella 9 - Eventi incidentali .....	49
Tabella 10 - Comparazione dei campi di applicazione delle normative .....	67
Tabella 11 - Comparazione normativa tecniche di prevenzione e di protezione .....	68
Tabella 12 - Esempio di tabella per la definizione e la raccolta delle informazioni riguardanti la pulizia periodica .....	71
Tabella 13 - Linee guida sulla frequenza necessaria per la pulizia nelle diverse divisioni di aree per prevenire l'accumulo di polvere e i potenziali pericoli di esplosione. ....	72
Tabella 14 - Linee guida sulla frequenza necessaria per la pulizia in diverse classificazioni di aree per prevenire l'accumulo di polvere e i potenziali pericoli di esplosione. ....	73
Tabella 15- Comparazione delle Norme sul Mantenimento della Pulizia.....	79
Tabella 16 - Designazione delle zone in relazione alla presenza di polvere.....	80
Tabella 17 - Classificazione delle aree pericolose .....	83
Tabella 18 - Esempi di zone a rischio esplosione .....	83
Tabella 19 - Comparazione normative per la classificazione delle aree a rischio.....	88
Tabella 20 - Confronto problema dovuto agli strati di polvere in ambienti a rischio esplosione tra CEI EN 60079-10-2 e CEI 31-56.....	91
Tabella 21 - Comparazione normative per la gestione degli strati di polvere in ambienti a rischio esplosione.....	95
Tabella 22 - Tabella Riassuntiva delle Normative IEC 60079-10-2, CEI 31-56 e NFPA 499 .....	98

# Abbreviazioni

**MIE:** Minima Energia di Ignizione

**MIT:** la Minima Temperatura di Ignizione

**LEL:** Limite Inferiore di Esplosività

**MRPR:** Maximum Rate of Pressure Rise

**PSD:** Particle Size Distribution

**SE:** Sorgenti di emissioni

**M:** Massa di polvere

**V:** Volume della zona infiammabile

**s:** Spessore strato di polvere

**$\rho$ :** Densità della polvere

**$d_z$ :** Distanza pericolosa

**$d_z$ :** distanza pericolosa [m]

**$d_0$ :** distanza di riferimento [m]

**$d_h$ :** distanza addizionale dipendente dall'altezza della SE [m]

**$k_d$ :** coefficiente dipendente dal rapporto tra la portata di emissione  $Q_d$  della SE e il LEL della sostanza considerata

**$k_u$ :** coefficiente relativo al contenuto di umidità della polvere

**$k_{ta}$ :** coefficiente relativo al tipo di ambiente

**$k_w$ :** coefficiente che dipende dalla velocità dell'aria di ventilazione  $w$  nell'intorno della SE e dalla velocità di sedimentazione  $u_t$ .

**$u_t$ :** velocità di sedimentazione

**$t$ :** tempo di sedimentazione





# Abstract

Le esplosioni da polveri combustibili rappresentano un grave rischio per la sicurezza negli ambienti industriali, causando potenziali danni materiali e umani. Questa tesi nasce dall'esigenza di approfondire la comprensione dei fenomeni di esplosione da polveri, identificare i rischi connessi e analizzare le normative e le misure preventive esistenti per migliorare la sicurezza sul lavoro. L'obiettivo di questa tesi è fornire un quadro completo e dettagliato delle esplosioni da polveri combustibili, mettendo in luce i rischi e le misure preventive necessarie per minimizzare tali rischi. L'analisi normativa comparativa, lo studio dei casi storici e le strategie proposte contribuiscono a migliorare la consapevolezza e la preparazione nei confronti delle esplosioni da polveri, promuovendo una cultura della sicurezza più robusta e informata negli ambienti industriali.

Il primo capitolo introduce il concetto di esplosione da polveri, esplorando le condizioni necessarie affinché avvenga e delineando i parametri chiave che influenzano la probabilità e la gravità delle esplosioni. Viene fornita una classificazione delle aree a rischio e una descrizione dettagliata delle principali fonti di innesco, come le scariche elettrostatiche, le superfici calde e le scintille. Nel secondo capitolo, l'attenzione si sposta sulle normative di riferimento. Si analizzano le principali norme tecniche internazionali, tra cui la IEC 60079-10-2, la GUIDA CEI 31-56 e la NFPA 499, descrivendo il campo di applicabilità di ciascuna e confrontando le misure raccomandate per la prevenzione e la protezione contro le esplosioni.

Il terzo capitolo presenta una serie di casi di esplosioni da polveri storiche, esaminando i settori coinvolti, le cause e le conseguenze degli incidenti. Attraverso l'analisi delle non conformità alle normative, si evidenziano le lezioni apprese e si discutono ulteriori considerazioni per migliorare le pratiche di sicurezza.

Il quarto capitolo propone strategie e soluzioni per la mitigazione del rischio di esplosioni da polveri. Vengono analizzati vari approcci, tra cui il controllo della generazione di polvere, la minimizzazione della dispersione, il controllo delle sorgenti di accensione, la gestione della ventilazione e del confinamento, l'implementazione di protocolli di sicurezza e l'utilizzo di attrezzature appropriate.

# Introduzione

Il concetto di esplosione è ampio. Si trovano frequentemente molteplici interpretazioni, le quali si dividono principalmente in due gruppi: il primo concentra l'attenzione sul rumore, o "bang", causato dal rilascio repentino di una potente onda di pressione, o ondata d'urto; l'origine di tale onda di pressione, e quindi se il rilascio provenga da energia chimica o meccanica, è di minor rilevanza. Questa prima interpretazione è in armonia con il significato basilare del termine "improvvisa esplosione". La seconda categoria di interpretazioni si limita alle esplosioni conseguenti il rilascio di energia chimica. Ciò abbraccia esplosioni di gas, di polveri e di solidi esplosivi. L'enfasi spesso ricade sul rilascio intrinseco di energia chimica e, pertanto, un'esplosione viene definita come segue:

*“An explosion is an exothermal chemical process that, when occurring at constant volume, gives rise to a sudden and significant pressure rise.” [1]*

Con il fenomeno noto come esplosione di polveri qualsiasi sostanza solida che può ossidarsi in presenza d'aria, lo farà con un'intensità e una rapidità che cresceranno proporzionalmente con l'aumentare del grado di suddivisione del materiale.

L'analisi formale del concetto di esplosione di polveri, in un contesto divulgativo, si può sintetizzare come la rapida ossidazione di particelle fini di sostanze combustibili disperse nell'aria, in uno spazio parzialmente o totalmente confinato. Questo processo, caratterizzato da una reazione chimica esotermica in condizioni di transitorietà, porta alla formazione di gas a temperatura elevata. Questi gas, tendendo a espandersi secondo la legge dei gas perfetti, incontrano il limite fisico imposto dal confinamento, provocando un marcato incremento di pressione, che comunemente oscilla tra i 6 e i 10 bar. Tale aumento pressorio può indurre il fallimento strutturale delle aree limitrofe, culminando in un'esplosione.

# 1. Generalità sulle esplosioni da polvere

Le esplosioni da polveri combustibili rappresentano una minaccia serissima per la sicurezza negli ambienti industriali. Capire a fondo i meccanismi di questo fenomeno è vitale per evitare incidenti disastrosi e salvaguardare la salute e l'incolumità dei lavoratori e dell'ambiente circostante. La problematica delle esplosioni da polveri ha probabilmente avuto i primi riscontri già con l'avvento dei mulini a vento per la macinazione del grano. Tuttavia, la comprensione autentica di queste esplosioni si è sviluppata lentamente nel corso del tempo. In particolare, è stato estremamente difficile accettare, sia per il grande pubblico che per gli esperti del settore, che un'esplosione potesse essere scatenata unicamente dalla presenza di polvere, senza la contemporanea presenza di gas infiammabili. A causa di queste considerazioni, le legislazioni e le normative impongono l'obbligo di garantire la sicurezza nei luoghi di lavoro, rendendo cruciale la conoscenza dei principali fenomeni e rischi associati alle esplosioni da polveri.

Prevenire le esplosioni di polvere coinvolge diverse misure, tra cui il controllo della generazione di polvere, la minimizzazione della dispersione e dell'accumulo della polvere, il controllo delle sorgenti di accensione, la gestione della ventilazione e del confinamento, e l'implementazione di protocolli di sicurezza e attrezzature appropriate.

In generale, le esplosioni possono essere divise in varie categorie:

- **Atomiche:** risultato di trasformazioni nucleari in cui la massa si converte in energia;
- **Elettriche:** si verificano quando una grande corrente elettrica attraversa una fase gassosa, generando calore e rapida espansione.  
Esempi di esplosioni elettriche includono il fulmine e il passaggio di corrente attraverso liquidi e solidi, producendo vapore, plasma o onde d'urto;
- **Fisiche:** non coinvolgono reazioni chimiche ma sviluppano energia a partire da cambiamenti di volume o pressione, come variazioni di temperatura o cambiamenti di fase fisica;
- **Chimiche:** derivano da reazioni o decomposizioni di sostanze che accumulano energia fino a generare un'esplosione, come nel caso della combustione esotermica delle sostanze con l'ossigeno. Questo tipo di esplosione include reazioni causate da gas, vapori e polveri fini sospese nell'aria che, bruciando, causano un significativo aumento di pressione.

Queste categorie possono essere considerate ordinate approssimativamente in base alla gravità, considerando le esplosioni atomiche come le più distruttive. Tuttavia, è interessante notare che esplosioni fisiche possono essere altrettanto devastanti, come dimostra l'esplosione del Krakatoa nel 1883, un'esplosione dell'ordine di 1 Gt (corrispondenti a circa 1000 bombe H), causata da una frattura della crosta terrestre che trasformò un miglio cubico di acqua marina in vapore, con conseguenze avvertite fino a 3000 miglia di distanza.

Ogni materiale solido combustibile reagisce con l'aria, con velocità inversamente proporzionale alla sua dimensione. Esempificato nella figura 1 dalla combustione del legno, si nota come un tronco intero bruci lentamente, diffondendo calore gradualmente. Se ridotto in frammenti più piccoli, la reattività aumenta per via dell'ampliamento dell'area di contatto con l'ossigeno, facilitando così l'ignizione e la reazione. Proseguendo nella divisione fino ad ottenere particelle di dimensioni microscopiche, sospese in un volume d'aria adeguato, si assiste a un'accelerazione drastica della combustione. Questo stato, ove la polvere si incendia molto rapidamente, rappresenta un caso di esplosione di polvere. Il rischio di ignizione e la velocità della combustione si amplificano con la

diminuzione delle dimensioni delle particelle, fino a un limite specifico determinato dalla natura del materiale. L'eventualità di una simile reazione esplosiva in spazi chiusi o parzialmente chiusi, quali apparecchiature industriali o ambienti di lavoro, può causare un rapido incremento della pressione interna, rischiando di compromettere l'integrità strutturale di macchinari e edifici e mettendo in pericolo vite umane, oltre a causare la perdita di beni materiali. [1]

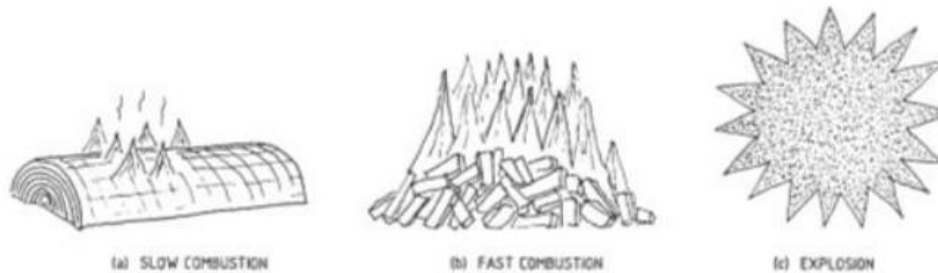


Figura 1 - Combustione del legno, immagine presente nel rif. [1]

## 1.1 Analisi del processo delle esplosioni da polveri

La stragrande maggioranza delle polveri organiche, costituente circa il 70% del totale, è combustibile e, a seconda delle condizioni in cui avviene la combustione, possono scaturire incendi o esplosioni. Affinché si verifichi un'esplosione da polvere, è essenziale che persino una minima quantità di polvere finemente dispersa nell'atmosfera sia presente in uno spazio ristretto, in concomitanza con una fonte di innesco sufficientemente energetica. Quando avviene l'innesco, la fiamma si propaga attraverso la nube di polvere, rilasciando energia sotto forma di calore nei prodotti della combustione. Questo calore genera un'espansione dei gas di combustione, principalmente  $\text{CO}_2$  e  $\text{H}_2\text{O}$  vaporizzata; se l'espansione è ostacolata, si verifica un aumento di pressione. È il rilascio improvviso nell'ambiente di questa pressione generata durante il processo di combustione che provoca il fenomeno noto come esplosione, caratterizzato da effetti barici, e lancio di proiettili. Se la combustione procede senza ostacoli, si verifica semplicemente un "flash fire" che, tuttavia, può causare gravi ustioni al personale coinvolto.

## 1.2 Condizioni in cui sussiste il rischio di esplosioni da polvere

Nei contesti di manipolazione di polveri combustibili, le possibilità di esplosione sono numerose. Numerosi materiali finemente dispersi, quali alimenti, plastiche, metalli, prodotti farmaceutici, presentano un potenziale esplosivo quando sono dispersi nell'aria e in presenza di una sorgente di accensione. Tuttavia, affinché un'esplosione possa verificarsi, devono essere soddisfatte determinate condizioni:

1. La polvere deve essere combustibile;
2. La polvere deve essere dispersa nell'aria;
3. Le particelle di polvere devono avere dimensioni e una distribuzione tale da permettere la propagazione della fiamma;
4. La concentrazione della polvere rispetto all'aria deve rientrare nell'intervallo di esplodibilità;
5. La nube di polvere deve entrare in contatto con una fonte di accensione sufficientemente energetica;
6. La nube di polvere deve essere confinata in un'atmosfera in grado di sostenere la combustione.

Queste condizioni sono generalmente riassunte nel concetto del "Triangolo del fuoco" e più specificamente nel "Pentagono dell'esplosione". Come noto, il Triangolo del fuoco identifica i seguenti elementi:

- combustibile,
- comburente (o ossidante)
- sorgente di ignizione.

Tuttavia, perché si verifichi un'esplosione di polveri, sono necessarie ulteriori due condizioni:

- Il combustibile e il comburente (o l'ossidante) devono essere mescolati nella proporzione corretta;
- La miscela risultante deve essere confinata.

Una polvere accumulata in un'area industriale può sembrare innocua, ma come dimostrano le esperienze passate, può scatenare esplosioni che causano danni considerevoli a persone e attrezzature circostanti. La pericolosità delle polveri è legata a vari parametri e fattori, e affinché possano esplodere, devono rispettare le condizioni delineate nel Pentagono dell'esplosione. Inoltre, le esplosioni da polvere spesso danno luogo alle esplosioni secondarie, poiché avvengono a catena: una prima esplosione crea l'onda di pressione necessaria per sollevare una nube di polvere stratificata formando una nuova nube di polvere, che a sua volta, in presenza di un'ignizione, può o non può generare ulteriori esplosioni[9].



Figura 2- Il pentagono delle esplosioni da polveri

## 1.3 Parametri chiave delle esplosioni da polveri

La valutazione del rischio associato alle esplosioni da polvere si basa sull'analisi di due parametri fondamentali: la probabilità di occorrenza dell'esplosione e la gravità dei danni potenziali risultanti. L'adozione di strategie di mitigazione mirate è essenziale per minimizzare la probabilità di esplosioni primarie e contenere l'entità degli eventuali danni.

Questi fattori comprendono la Minima Energia di Ignizione (MIE), la Minima Temperatura di Ignizione (MIT), la Costante di Esplosione ( $K_{st}$ ) e la Pressione massima di esplosione  $P_{max}$ . Ulteriori fattori cruciali includono il Limite Inferiore di Esplosività (LEL), la relazione tra la densità di massa dello strato di polveri e la sua granulometria e superficie specifica, che influenzano direttamente la reattività della polvere.

La classificazione delle esplosioni in eventi primari e secondari aiuta ulteriormente a comprendere e mitigare i rischi associati, evidenziando l'importanza di una gestione attenta delle polveri combustibili negli ambienti di lavoro.

### 1.3.1 Fattori determinanti della probabilità di esplodibilità

La sensibilità di un materiale all'innesco viene esaminata tramite la misura della Minima Energia di Ignizione (MIE) e della Minima Temperatura di Ignizione (MIT).

La Minima Energia di Ignizione è l'energia minima, espressa in millijoule, necessaria per innescare un'esplosione di una nube di polvere mediante un arco elettrico. Un valore basso di MIE indica una maggiore facilità di ignizione, aumentando il rischio in ambienti potenzialmente esplosivi. La MIE di una polvere è particolarmente sensibile alla dimensione delle particelle, infatti essa decresce proporzionalmente al diametro. Più avanti con l'introduzione del fattore della granulometria verrà motivato meglio il perché di questa affermazione.

Anche la contemporanea presenza di gas o vapori infiammabili ha l'effetto di diminuire la MIE. Questo parametro è fondamentale per la progettazione di sistemi di sicurezza e la valutazione del rischio di innesco elettrostatico.

La minima temperatura di ignizione (MIT) rappresenta la temperatura inferiore a cui una superficie calda può causare l'accensione di una nube di polvere. La determinazione della MIT, spesso eseguita mediante una Fornace GG, è cruciale per stabilire le condizioni di infiammabilità delle polveri. Questo parametro aiuta a stabilire le condizioni di sicurezza per evitare contatti accidentali tra polveri e superfici calde, prevenendo così l'accensione.

Dall'altra parte, si adoperano determinati parametri per descrivere la gravità dell'esplosione: la rapidità, definita come la variazione di pressione nell'unità di tempo (conosciuta come MRPR (Maximum Rate of Pressure Rise)), e la violenza dell'evento esplosivo, indicata dalla massima pressione raggiunta durante l'esplosione e dalla velocità della fiamma. In questo contesto, il percorso verso il raggiungimento di un rischio residuo accettabile è delineato dalle misure di protezione disponibili.

Generalmente è la norma ISO 80079-20-2 che classifica le polveri combustibili come esplodibili tramite il "test screening", ovvero un insieme di prove condotte in laboratorio, che determina anche le principali caratteristiche della polvere stessa, come ad esempio la Minima Energia di Innesco (MIE).

La massima velocità di aumento della pressione  $(dP/dt)_{max}$ , influenzata dal volume, viene comunemente trasformata in una "costante di esplosione" secondo la legge cubica di Bartknecht, espressa come:

$$k_{st}=V^3(dP/dt)_{max}$$

dove:

- $k_{st}$  rappresenta la costante caratteristica per una data polvere;
- $(dP/dt)_{max}$  indica la massima velocità di aumento della pressione di esplosione della nube di polvere combustibile;
- $V$  denota il volume del contenitore in cui avviene l'esplosione.

Questa formulazione permette altresì la classificazione delle polveri in base al valore assoluto del parametro  $k_{st}$ . La velocità di esplosione o il valore di  $k_{st}$  sono inoltre influenzati dal livello di turbolenza della miscela: un aumento della turbolenza comporta un significativo incremento della velocità di esplosione. Una classificazione delle polveri in base alle loro caratteristiche esplosive è fornita nella Tabella seguente[1][12].

Tabella 1 - Classificazione delle polveri in funzione della costante  $k_{st}$

Classe di esplosione	$K_{st}$ [bar·m·s <sup>-1</sup> ]	Commento
St 0	0	Esplosione debole
St 1	> 0 fino a 200	Esplosione moderata
St 2	> 200 fino a 300	Esplosione forte
St 3	> 300	Esplosione severa

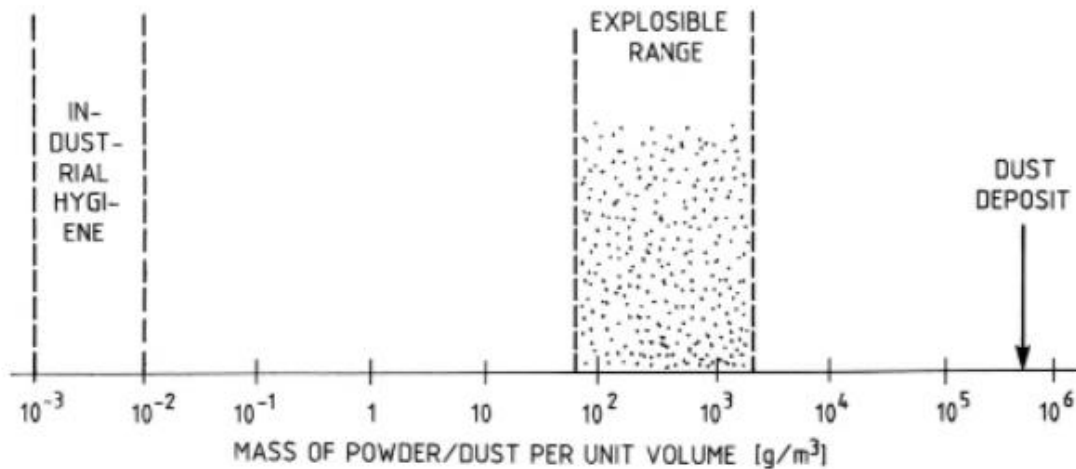


Figura 3 - L'intervallo di concentrazioni di polvere esplosive nell'aria a temperatura normale e pressione atmosferica per una tipica polvere organica naturale. Immagine presente nel rif. [1]

Come evidenziato nella Figura 3, il range di esplosività delle polveri in aria, a temperatura e pressione normali, è confrontato con il range massimo tipicamente consentito nell'ambito dell'analisi del rischio nelle aree industriali. È importante notare che tra i due intervalli vi è una differenza di circa tre ordini di grandezza. Questo è dimostrato dal fatto che le concentrazioni di polvere considerate sicure per la salute nei luoghi di lavoro sono molto più basse rispetto alle concentrazioni minime necessarie per un'esplosione. In altre parole, i livelli di polvere che possono causare fastidio e richiedere l'attenzione delle autorità sanitarie sono molto inferiori a quelli che potrebbero causare un'esplosione. Quindi, le concentrazioni di polvere che possono esplodere sono molto alte e raramente si verificano nelle fabbriche.



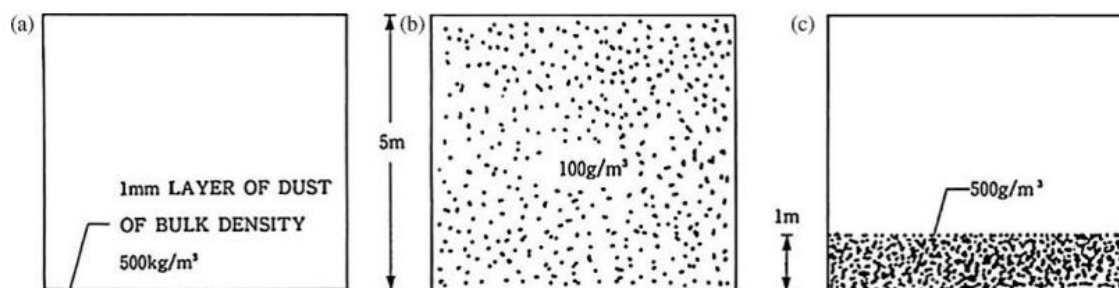


Figura 4 - Il potenziale pericolo anche di sottili strati di polvere. Immagine presente nel rif. [1]

Un ulteriore fattore determinante per le esplosioni da polvere è la densità. La relazione tra la densità di massa dello strato di polveri,  $\rho_{bulk}$ , lo spessore dello strato  $h$ , l'altezza  $H$  della nube di polvere prodotta dallo strato e la concentrazione della polvere,  $c$ , è espressa da

$$c = \rho_{bulk} * \frac{h}{H} \quad [\text{eq. 1}]$$

Andremo ora ad analizzare come la granulometria e l'area superficiale specifica rappresentano variabili critiche nell'ambito dello studio delle esplosioni di polvere.

La granulometria, che incide sull'estensione dell'area di contatto disponibile per l'ossidazione e il trasferimento termico, gioca un ruolo fondamentale, questo perché riducendo la dimensione media delle particelle di una sostanza, si incrementa il rischio di esplosione a causa della maggiore facilità di dispersione nell'aria, della riduzione dell'energia necessaria per innescare la reazione e della diminuzione della concentrazione al limite inferiore di esplodibilità. Un calo nel diametro delle particelle conduce altresì ad un aumento della pressione massima di esplosione e della velocità con cui questa pressione cresce, potenziando gli effetti nocivi.

Nella figura 4 si osserva quanto appena detto. In particolare, superata la soglia dei 500  $\mu\text{m}$ , la polvere cessa di manifestare proprietà esplosive. Si può altresì affermare che un composto di particelle (dimensione media superiore a 0,5 mm) e polvere (dimensione media inferiore a 0,5 mm) generalmente non è considerato pericoloso per la formazione di nubi esplosive, qualora la percentuale di polvere sia inferiore al 15% del totale della miscela di grani, polvere e aria.

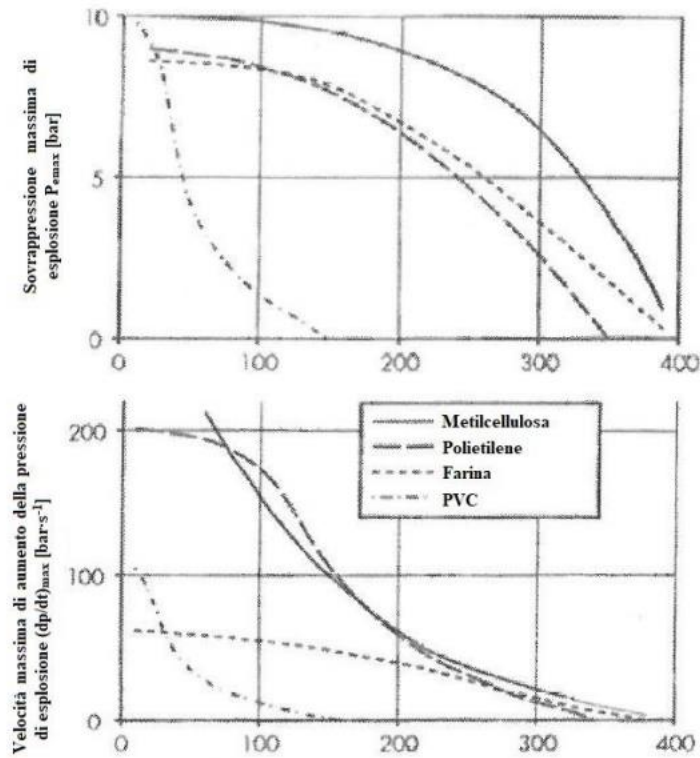


Figura 5 - Grandezza media delle particelle Immagine presente nel rif. [1]

L'area superficiale specifica di un solido frammentato si può esprimere in termini dell'estensione superficiale per unità di massa. Questa relazione è illustrata quando, ad esempio, un cubo viene diviso in otto parti uguali, raddoppiando la superficie totale e dimostrando che l'area superficiale specifica varia in modo inversamente proporzionale alle dimensioni lineari della particella.

La relazione è la seguente:

$$S = \frac{(\pi \cdot x^2)}{\frac{\pi}{6} \cdot x^3} \quad [\text{eq.2}]$$

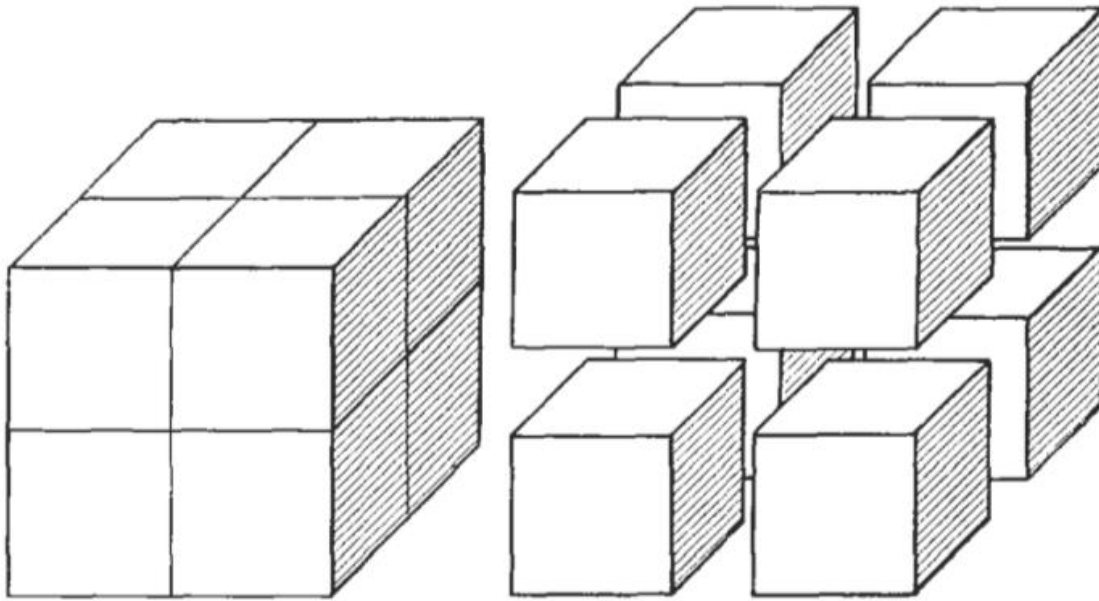


Figura 6 - Illustrazione dell'aumento dell'area specifica di un solido con l'aumentare della suddivisione. Immagine presente nel rif. [1]

Oltre a queste considerazioni, vi sono altri elementi cruciali da valutare, quali:

1. La composizione chimica della polvere e il suo tenore di umidità;
2. La composizione chimica, la pressione e la temperatura iniziali della fase gassosa;
3. La distribuzione delle dimensioni e delle forme delle particelle, che influenzano l'area superficiale specifica della polvere quando essa è completamente dispersa;
4. Il livello di dispersione o l'aggregazione delle particelle di polvere, determinante per la superficie specifica effettivamente disponibile per la combustione all'interno di una nube di polvere in contesti industriali;
5. La distribuzione della concentrazione delle polveri all'interno di una nube reale;
6. La distribuzione della turbolenza iniziale all'interno di una nube reale;
7. La potenzialità di generare esplosioni turbolente nelle parti non ancora combuste della nube;
8. La possibilità che il fronte di fiamma venga distorto da diversi meccanismi di turbolenza;
9. La probabilità di un significativo trasferimento di calore per irraggiamento, che dipende fortemente dalla temperatura della fiamma, a sua volta influenzata dalla composizione chimica delle particelle.

Nella maggior parte degli incendi o esplosioni, l'ossigeno, naturalmente presente in aria al 21%, agisce da comburente, consentendo la combustione. Diminuendo la concentrazione di ossigeno, si riduce la propensione alla combustione. La riduzione della concentrazione di ossigeno influisce notevolmente sul comportamento esplosivo della polvere, in particolare riducendo la velocità massima di aumento della pressione molto più drasticamente rispetto alla pressione massima dell'esplosione.

Nello specifico, si osserva che:

- Una riduzione del contenuto di ossigeno dall'aria al 15% può ridurre la velocità massima di aumento della pressione di un fattore 10 o più.
- La pressione massima dell'esplosione diminuisce proporzionalmente alla riduzione del contenuto di ossigeno.
- Con un contenuto di ossigeno del 15%, la velocità massima di aumento della pressione è solo il 13% di quella nell'aria.

Quindi, riducendo il contenuto di ossigeno fino al 15%, si può raggiungere un livello di infiammabilità molto basso, dove la combustione diventa significativamente meno probabile e meno violenta.

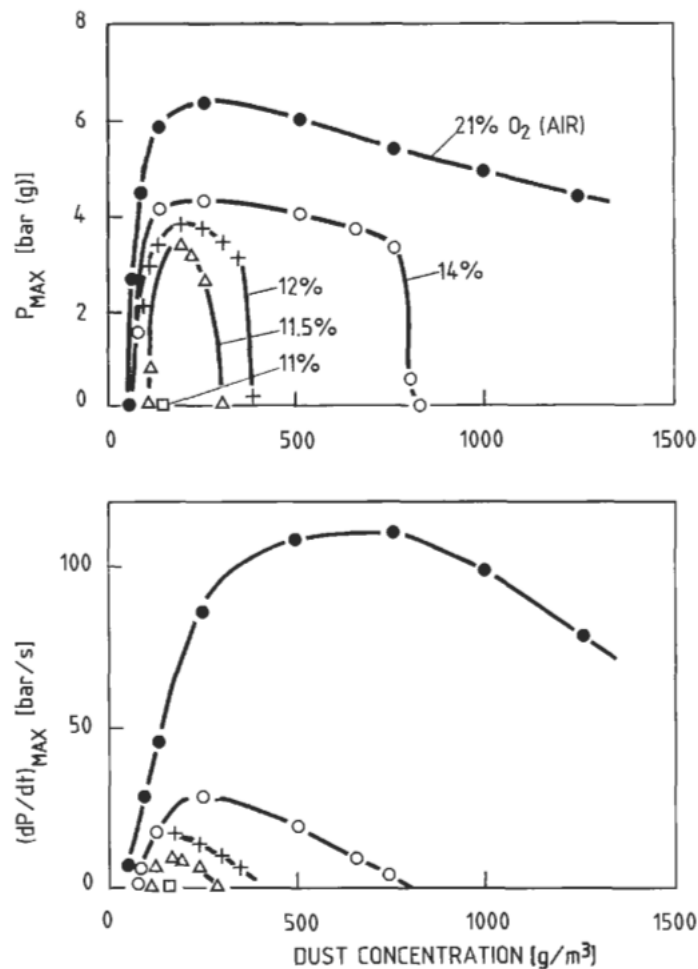


Figura 7 - L'influenza del contenuto di ossigeno nel gas sulla pressione massima di esplosione e sulla massima velocità di aumento della pressione delle concentrazioni di polvere di lignite. Immagine presente nel rif. [1]

In casi particolari, le polveri metalliche possono reagire in modo esotermico anche con l'azoto o l'anidride carbonica. Tuttavia, la reazione con l'ossigeno rimane il principale meccanismo di generazione di calore in un'esplosione di polvere. Solo i materiali che non sono ossidi stabili possono provocare esplosioni di polvere, escludendo quindi sostanze come silicati, solfati, nitrati, carbonati e fosfati, rendendo improbabili esplosioni di polvere da cemento, sabbia, calcare e materiali simili.

I materiali suscettibili di causare esplosioni di polvere includono materie organiche naturali (es. grano, lino, zucchero), materiali organici sintetici (plastiche, pigmenti organici, pesticidi) e alcuni metalli (alluminio, magnesio, zinco, ferro). Il potenziale calorifico di un materiale è un parametro chiave, poiché determina la quantità di energia che può essere rilasciata durante l'esplosione. La tabella 2 elenca il calore di combustione di varie sostanze, per mole di ossigeno consumato.

Tabella 2 - ossidazione di varie sostanze per mole di O<sub>2</sub> consumata.

Substance	Oxidation product (s)	KJ/mole O <sub>2</sub>
Ca	CaO	1270
Mg	MgO	1240
Al	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1100
Si	SiO <sub>2</sub>	830
Cr	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	750
Zn	ZnO	700
Fe	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	530
Cu	CuO	300
Sucrose	CO <sub>2</sub> and H <sub>2</sub> O	470
Starch	CO <sub>2</sub> and H <sub>2</sub> O	470
Polyethylene	CO <sub>2</sub> and H <sub>2</sub> O	390
Carbon	CO <sub>2</sub>	400
Coal	CO <sub>2</sub> and H <sub>2</sub> O	400
Sulphur	SO <sub>2</sub>	300

La dimensione delle particelle riveste un ruolo fondamentale, influenzando significativamente la velocità della reazione dovuta alla superficie reagente disponibile. Una diminuzione dell'1/8 della dimensione originaria della particella comporta un aumento di 800 volte dell'area superficiale. Le particelle di dimensioni superiori a 500 µm non contribuiscono in maniera sostanziale alla propagazione della fiamma a causa dell'inerzia termica, mentre quelle di dimensioni pari o inferiori a 75 µm presentano un rischio elevato, essendo in grado di rimanere sospese in aria per un periodo considerevole.

L'area superficiale delle particelle, misurata in cm<sup>2</sup>/g o m<sup>2</sup>/g, è un fattore cruciale che aumenta notevolmente con la polverizzazione della sostanza, influenzando la reattività in base alla forma e alle dimensioni dei granuli.

Nel contesto di un'esplosione di polvere, le reazioni chimiche coinvolgono l'interfaccia tra il solido combustibile e il gas comburente, rendendo cruciale l'area superficiale disponibile per l'ossidazione

e il trasferimento di calore. La combustione, la dispersione e la sospensione prolungata della polvere sono facilitate dalle particelle più piccole, poiché la loro riduzione comporta un notevole aumento dell'area superficiale.

La pressione massima d'esplosione e la velocità massima di aumento della pressione crescono al diminuire delle dimensioni delle particelle, mentre diminuiscono l'energia minima di accensione e la concentrazione minima esplosibile (limite inferiore). La comprensione di questi aspetti è fondamentale per valutare e gestire i rischi legati alle esplosioni di polveri.

Per quanto riguarda il contenuto di umidità, essa riduce la sensibilità all'ignizione delle polveri infiammabili e la violenza dell'esplosione. Questo avviene principalmente perché limita la tendenza della polvere a formare nubi e perché l'umidità assorbe parte del calore di combustione. Inoltre, l'umidità svolge un ruolo significativo nella modifica delle caratteristiche esplosive delle polveri combustibili, sebbene l'effetto possa variare a seconda della natura specifica della polvere. In generale, l'aumento dell'umidità agisce come un fattore limitante, riducendo la propensione della polvere a formare nubi esplosive, grazie alla coesione aumentata tra le particelle, rendendole più difficili da accendere. Inoltre, l'umidità assorbe calore durante il processo di evaporazione, contribuendo così a limitare la violenza dell'esplosione e la sensibilità all'ignizione.

Un altro parametro rilevante è la miscela aria-polvere, la quale deve trovarsi entro specifiche concentrazioni per costituire un rischio di esplosione (range di infiammabilità). Pertanto, gli impianti devono essere progettati per operare al di fuori di questo range. Il limite inferiore di infiammabilità (MEC = minima concentrazione esplosibile) varia in funzione dei tipi di polvere (granulometria e sostanza), e in mancanza di dati precisi, si considera il valore di 40-50 g/m<sup>3</sup> per assicurare condizioni operative sicure. L'uso del limite superiore di esplosibilità non è raccomandabile in pratica, poiché è difficile determinare valori specifici e le atmosfere di processo possono comunque variare nel campo di infiammabilità durante le fasi di carica, messa in marcia e arresto. In generale, il controllo delle concentrazioni fuori dal campo di infiammabilità è difficile da garantire, rendendo di scarso rilievo pratico parlare di limiti di infiammabilità (o di esplosibilità) poiché le polveri raramente formano una sospensione omogenea nelle realtà produttive.

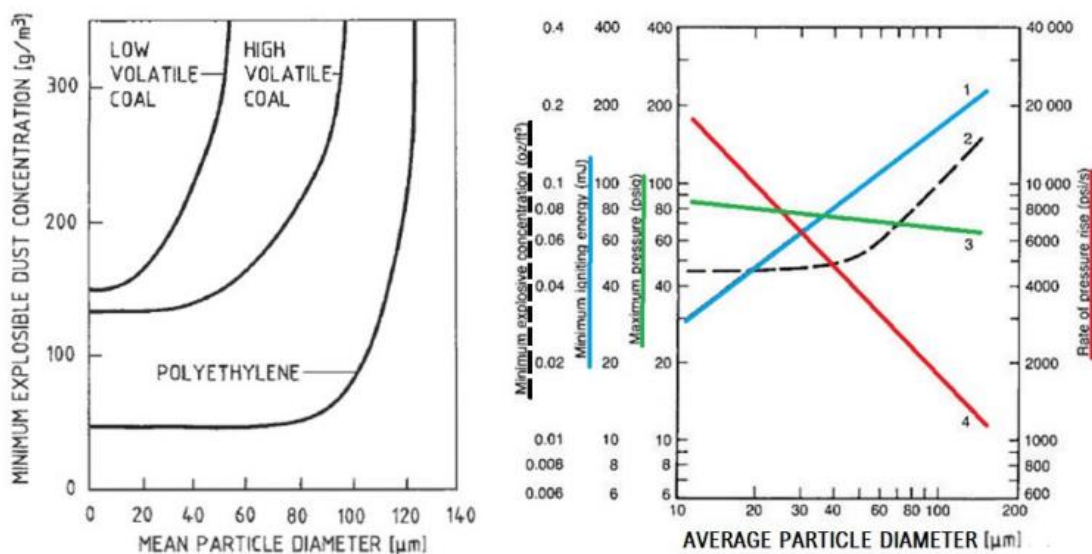


Figura 8 - Influenza del diametro medio delle particelle sulla concentrazione minima esplosiva. Immagine presente nel rif.[1]

Nella figura 8 sono illustrati esempi che evidenziano le variazioni di alcuni dei principali parametri di esplosività (come MEC, MIE,  $P_{max}$ ,  $(dP/dt)_{max}$ ) in relazione alle dimensioni delle particelle. La distribuzione granulometrica è influenzata dalla dispersione, e le caratteristiche della nuvola di polvere possono incidere sul comportamento della miscela durante la determinazione dei parametri di esplosività. Soprattutto nei processi di dispersione di intensità più elevate, la distribuzione granulometrica della polvere nell'ambiente non coincide con quella della polvere stessa. Le caratteristiche della nuvola di polvere, a causa degli effetti delle interazioni gas-particella, possono favorire o ridurre la presenza di particelle fini. Di conseguenza, sia i fenomeni di trasporto di massa che quelli di energia sono influenzati dal processo di dispersione. Inoltre, poiché i fenomeni di trasporto, che sono condizionati dalla distribuzione granulometrica, a loro volta influenzano i meccanismi di combustione dei materiali solidi, è essenziale, nell'ambito dello sviluppo dei test di infiammabilità, comprendere la PSD (Particle Size Distribution) e le sue variazioni. Inoltre, è opportuno considerare quale metodo, tra quelli disponibili, fornisce la distribuzione dimensionale più congruente con quella della nube di polvere effettivamente generabile in un contesto industriale. I diversi metodi per valutare la PSD possono fornire informazioni diverse: ad esempio, la setacciatura a secco di polveri molto fini e coesive può risultare in una PSD più grossolana rispetto a quella della stessa polvere valutata tramite un metodo di dispersione in liquido.

Un ulteriore parametro da considerare è la turbolenza. Quando la nuvola è soggetta a combustione, la turbolenza promuove il trasporto di calore e materia, di conseguenza, una nuvola turbolenta brucia più rapidamente rispetto al propagarsi di un fronte di fiamma laminare in una nuvola quieta. In caso di accensione della nuvola di polvere, sia da una scintilla elettrica che da una superficie calda, la turbolenza interferisce con il trasferimento di calore, rimuovendo calore dalla zona di innesco mediante convezione turbolenta. Di conseguenza, l'accensione di una nuvola di polvere turbolenta richiede generalmente un'energia o una temperatura maggiore rispetto a quella necessaria per accendere nuvole quiescenti.

Nel contesto delle esplosioni di polvere, è necessario considerare due tipi di turbolenza, differenziati dalla loro origine.

Il primo tipo è rappresentato dalla turbolenza generata durante il processo industriale in cui si forma la nuvola di polvere, che può derivare da dispositivi come mulini ad aria, miscelatori, cicloni, filtri a sacco, tubi di trasporto pneumatico o elevatori a tazze. Questa forma di turbolenza è comunemente denominata turbolenza iniziale, la quale dipende dalla geometria del sistema e dalla pressione di iniezione dell'aria. Il secondo tipo è generato dall'esplosione stessa, attraverso il flusso indotto dall'espansione di polvere non bruciata davanti al fronte di fiamma. Il grado di turbolenza generato in questo modo dipende dalla velocità del flusso e dalla geometria del sistema. Gli ostacoli, come i secchi all'interno di un elevatore a tazze, possono aumentare la generazione di turbolenza in queste condizioni. In condotti o gallerie di lunghezza considerevole, può instaurarsi un ciclo di feedback positivo, durante il quale la fiamma può accelerare fino a velocità molto elevate e persino trasformarsi in una detonazione.

Di seguito riportiamo in tabella le proprietà di alcune polveri organiche e metalliche:

Tabella 3 - Proprietà polveri organiche e metalliche

POLVERE	MIE [mJ]	MIT [°C]	LEL [g/l]	P <sub>max</sub> [bar]	(dP/dT) <sub>max</sub> [bar/s]	(dP/dT) <sub>medio</sub> [bar/s]
Alluminio	50	650	0.045	5.8	> 1300	240
Aspirina	16	550	0.015	6	531	-
Carbone	-	660	0.1	6	117	-
Farina di grano	50	380	0.05	7.5	255	-
Linters di cotone	1920	520	0.5	5	27	-
Zucchero	30	370	0.045	7.5	345	110

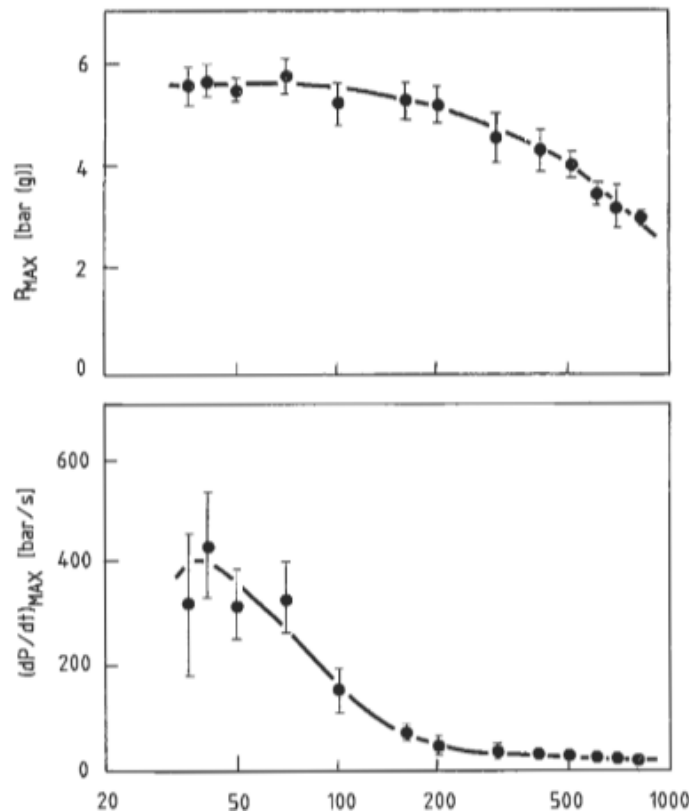


Figura 9 - Influenza della turbolenza iniziale sulla velocità di esplosione di una nuvola di polvere.

La figura 9 illustra come la turbolenza iniziale influenzi le esplosioni di polvere in recipienti chiusi. La formazione di una nuvola di polvere all'interno del recipiente avviene mediante la dispersione di polvere con aria. Inizialmente, la turbolenza è significativa ma diminuisce nel tempo una volta terminata la dispersione dell'aria. I test di esplosione con la stessa polvere in recipienti simili, ma con diverse condizioni di dispersione e accensione, mostrano variazioni nella turbolenza iniziale. Si osserva che, man mano che la turbolenza iniziale si attenua, la violenza dell'esplosione, misurata dal massimo gradiente di aumento della pressione nel tempo, diminuisce. Tuttavia, la massima pressione di esplosione rimane relativamente costante fino a circa 200 ms, poiché è principalmente una



proprietà termodinamica, mentre il tasso di aumento della pressione contiene un componente cinetico più forte.

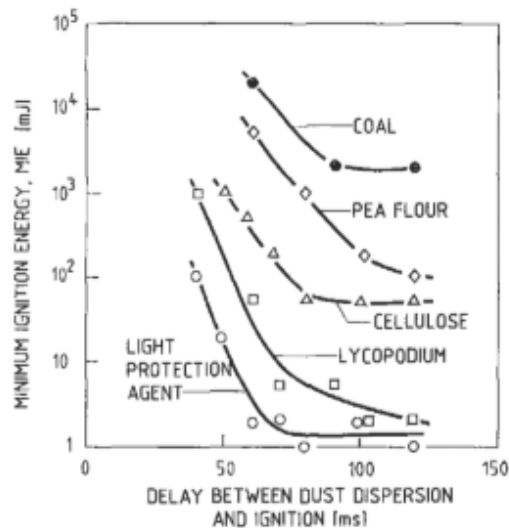


Figura 10 - L'influenza della turbolenza iniziale sull'innescio minimo di scintille elettriche nelle nubi di polvere.

Anche la figura 10 evidenzia quanto appena detto sull'importante influenza della turbolenza iniziale sulla energia minima necessaria per l'innescio delle nuvole di polvere da parte di scintille elettriche e di come quindi la turbolenza agisca a vantaggio della sicurezza, rendendo significativamente più arduo l'innescio della nuvola di polvere rispetto allo stato di quiete. Tale effetto si manifesta in modo significativo, determinando un notevole aumento dell'energia minima d'innescio, con differenze di diversi ordini di grandezza. Questo aspetto è particolarmente favorevole nel contesto delle potenziali generazioni di scariche elettrostatiche in presenza di nuvole di polvere esplosive, poiché tali scariche tendono ad essere generate durante il movimento turbolento della nuvola.[1][12]

## 1.4 Fonti di innesco

Il rischio di esplosione da polveri non è unicamente correlato alla presenza di miscele infiammabili, bensì richiede anche l'interazione con una fonte di ignizione sufficientemente energetica per avviare la combustione. Le possibili fonti di ignizione devono essere formalmente valutate come parte integrante dell'analisi dei rischi durante lo studio del processo, sia per il progetto di nuovi impianti che per la modifica di quelli esistenti. Una fonte di innesco è considerata efficace quando è in grado di fornire all'atmosfera esplosiva l'energia necessaria per provocare l'accensione.

Le fonti di innesco possono includere [34]:

- Scariche elettriche, elettrostatiche e atmosferiche;
- Fiamme libere;

- Superfici calde e attrito;
- Scintille meccaniche;
- Correnti elettriche vaganti, protezione contro la corrosione catodica;
- Elettricità statica;
- Onde elettromagnetiche a radiofrequenza (RF) da  $10^4$  a  $3 \times 10^{12}$  Hz
- Onde elettromagnetiche da  $3 \times 10^{11}$  a  $3 \times 10^{15}$  Hz
- Fonti esterne come i fulmini;
- Radiazioni ionizzanti con energia associata alla radiazione assorbita;
- Ultrasuoni che riscaldano la sostanza che li assorbe;
- Compressione adiabatica e onde d'urto;
- Reazioni esotermiche, inclusa l'autoaccensione delle polveri. (materiali piroforici)

Nei seguenti paragrafi andremo ad analizzare le varie fonti di innesco che portano al fenomeno delle esplosioni. [1][12]

### **1.4.1 Scariche elettrostatiche**

Tra i principali fattori di innesco, la generazione di campi elettrostatici durante il processo produttivo o a seguito di cause esterne, come le scariche atmosferiche, riveste una notevole importanza. Le cariche elettrostatiche possono essere prodotte da varie attività industriali, quali il trasferimento di prodotti, il movimento di nastri trasportatori e pulegge, il flusso di liquidi nelle tubazioni, la nebulizzazione di liquidi e lo svuotamento di grandi quantità di materiali. Quando non è possibile evitare la generazione di cariche, è imperativo garantire la continuità elettrica mediante un sistema di messa a terra per tutte le componenti dell'impianto, in modo che le cariche possano disperdersi attraverso conduttori. Questa prassi è comunemente adottata per le parti metalliche, mediante giunti bullonati o saldati che garantiscono la continuità. L'impiego di tubazioni in materiale plastico trasparente, quali visualizzatori del flusso, è sconsigliato, mentre i condotti flessibili devono essere collegati a terra tramite conduttori a spirale, con particolare attenzione alla verifica della corretta connessione.

Il fenomeno delle cariche elettrostatiche si basa sulla trasmissione di una piccola carica tra due corpi in contatto, con accumulo di cariche di segno opposto al momento della separazione. Se almeno uno dei corpi è isolante, le cariche non si neutralizzano completamente, creando una differenza di potenziale. L'accumulo di cariche in punti specifici dell'impianto, come tubi, attrezzi manuali, personale e isolatori di conduttori elettrici, può costituire un rischio, specialmente quando vengono scaricate a terra, potenzialmente innescando gas, vapori o nubi di polvere.

Nel manipolare polveri, è difficile evitare del tutto la formazione di scariche elettrostatiche. La resistività delle polveri può essere classificata come bassa, media o alta. Le misure preventive comprendono la messa a terra dell'impianto, l'uso di pavimenti antistatici, l'evitare l'utilizzo di plastiche isolanti, la consapevolezza della formazione di cariche elettrostatiche nella manipolazione

delle polveri, e la considerazione dei flussi isolati di liquidi e degli spruzzi come possibili fonti di cariche.

Le scariche elettrostatiche si distinguono per forma ed energia liberata, come scariche distruttive, a fiocco, per effetto corona, a pennacchio e coniche. La valutazione della capacità di innesco delle scariche elettrostatiche può essere effettuata confrontando l'energia immagazzinata con l'energia minima di innesco (MIE) della polvere combustibile coinvolta.[1][9][11]

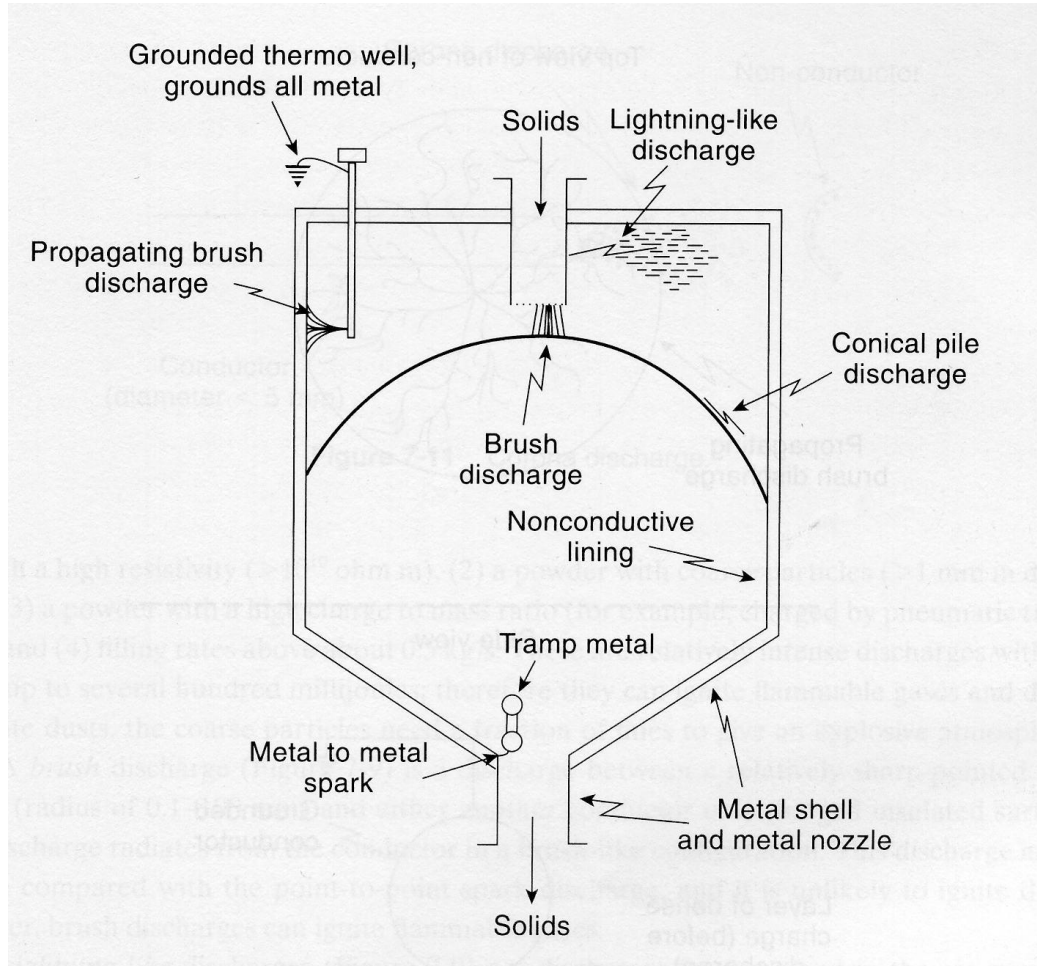


Figura 11 - Scariche elettrostatiche comuni.

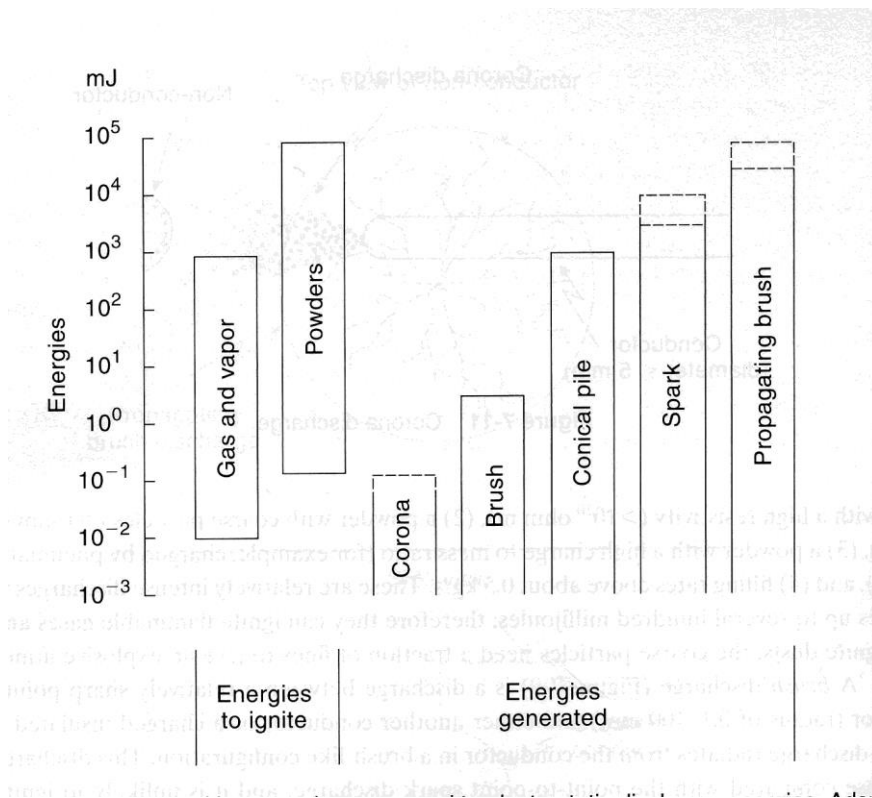


Figura 12 - Confronto dei range di energie minime di accensione di polveri e gas nell'aria, con le energie equivalenti di vari tipi di scariche elettrostatiche.

## 1.4.2 Fiamme libere

Una "fiamma libera" si riferisce a una fiamma che non è confinata o contenuta all'interno di un dispositivo chiuso. Questa caratteristica le permette di entrare in contatto diretto con materiali infiammabili o combustibili presenti nell'ambiente circostante. Inoltre, una fiamma libera può muoversi e propagarsi senza controllo, influenzata da correnti d'aria, movimento degli oggetti o altre condizioni ambientali. Essendo esposta, ha anche un facile accesso all'ossigeno presente nell'aria, il che può aumentare la sua intensità e capacità di innesco.

Le fiamme delle torce per saldatura e taglio sono esempi di fiamme libere, in quanto operano in ambienti aperti e possono fornire l'energia necessaria per innescare esplosioni in nubi di polvere. Questo tipo di fonte di innesco, che si distinguono per la loro notevole energia, devono essere gestite con attenzione e controllo. È imperativo sottoporle a rigorosi regolamenti aziendali e implementare sistemi quali i permessi di lavoro. In ultima analisi, tali precauzioni sono volte a prevenire la conduzione di operazioni ad alto rischio di formazione di atmosfere infiammabili.

## 1.4.3 Superfici calde e attrito dei componenti meccanici

Le situazioni di attrito possono verificarsi durante il movimento dei componenti meccanici, ad esempio durante la rottura di cuscinetti a rulli, e possono produrre calore, aumentando le temperature delle superfici o creando punti caldi. Questi fenomeni possono portare all'innesco di atmosfere infiammabili e al potenziale sviluppo di braci da residui di polvere a contatto con superfici calde. Fonti di superfici calde possono derivare da apparecchiature come riscaldatori, caldaie, tubi di vapore

e forni. Evidentemente, tali superfici possono interagire con le proprietà dei materiali manipolati e le condizioni termiche dell'impianto, contribuendo al rischio di incendi.

#### **1.4.4 Scintille meccaniche**

Le collisioni possono generare scintille meccaniche, capaci di innescare atmosfere infiammabili. Le atmosfere contenenti vapori infiammabili sono suscettibili all'accensione da scintille di varia natura. Tuttavia, particolare pericolo è rappresentato dalle scintille risultanti dagli impatti tra particelle di metalli leggeri come alluminio, magnesio, titanio o le loro leghe, e superfici di acciaio arrugginito. Per mitigare tale rischio, è possibile controllare la fonte di accensione evitando l'utilizzo di metalli leggeri o leghe in presenza di ruggine o atmosfere infiammabili. In alternativa, è possibile posizionare tali materiali in modo sicuro rispetto agli impatti. È importante sottolineare che le scintille prodotte da prolungate frizioni tra due metalli sono significativamente più infiammabili rispetto a quelle generate da un singolo impatto.

#### **1.4.5 Materiali piroforici**

Alcuni materiali producono calore quando esposti all'aria o presenti in specifiche miscele, costituendo una potenziale fonte di accensione. Durante l'utilizzo di tali sostanze, è essenziale adottare procedure di manipolazione scrupolose per prevenire situazioni di auto-riscaldamento o incendio. Ad esempio, polveri contaminate con olio possono subire auto-ossidazione, portando al rischio di autoaccensione a temperature inferiori rispetto all'ignizione dello strato di polvere. Allo stesso modo, elevate temperature possono causare la decomposizione di molte sostanze in vapori infiammabili, con conseguente variazione nella sensibilità all'ignizione e nella violenza dell'esplosione, differentemente da quanto osservato con una nube di polvere.

#### **1.4.6 Impianti elettrici**

Tutte le apparecchiature elettriche possono costituire potenziali sorgenti di accensione se raggiungono elevate temperature o non sono adeguatamente protette dall'ingresso di polvere, o se non sono soggette a una corretta manutenzione. Le scintille elettriche possono rappresentare sorgenti di accensione, anche a tensioni molto basse, durante l'apertura e la chiusura dei circuiti elettrici, a causa di connessioni allentate o correnti vaganti.

#### **1.4.7 Sorgenti esterne**

Le fonti esterne di potenziale accensione, come fumo e cicche, seppur rigorosamente vietate in presenza di atmosfere esplosive, possono essere presenti all'esterno degli impianti. Mentre molte di queste possono essere gestite attraverso divieti e norme comportamentali, altre, come i fulmini, rappresentano fattori di rischio accidentale. In particolare, i gas e i vapori infiammabili possono essere dotati di sistemi di arresto fiamma nei punti di emissione, ma questo non è possibile per le polveri, che richiedono un trattamento specifico per renderle inerti. La norma EN 62305 identifica il rischio

di esplosione causato dai fulmini solo in determinati contesti, escludendo implicitamente altre aree soggette a rischio di esplosione.

## 1.5 Esplosioni di Polveri: Primarie e Secondarie

Per continuare a parlare degli altri fattori che influiscono sull'esplosioni delle polveri è importante fare una distinzione in due ampie tipologie di esplosioni: primarie e secondarie. Le esplosioni primarie avvengono all'interno di apparecchiature o sistemi chiusi quando le condizioni per l'esplosione, di cui abbiamo parlato nel paragrafo 1.2 quando abbiamo introdotto il “pentagono del fuoco”, sono soddisfatte.

Le esplosioni primarie possono essere relativamente contenute se l'apparecchiatura è progettata per resistere a tali eventi o se sono in atto misure di protezione efficaci.

Le esplosioni secondarie si verificano quando un'esplosione primaria disperde polvere accumulata in altre aree, che a sua volta viene incendiata ed esplose.

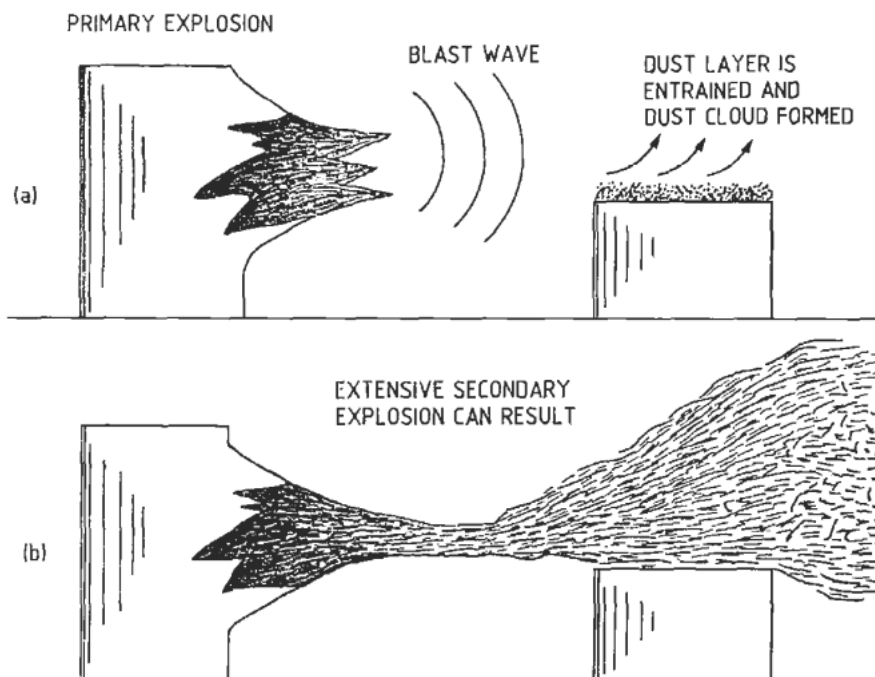


Figura 13 - Come l'onda d'urto da un'esplosione primaria (a) trascina e disperde uno strato di polvere, che (b) viene successivamente accesa dalla fiamma primaria della polvere.

Queste esplosioni sono spesso molto più devastanti delle primarie a causa della maggiore quantità di combustibile coinvolto e dell'ampia area interessata. La prevenzione delle esplosioni secondarie è una priorità nella sicurezza industriale, richiedendo la pulizia regolare per evitare l'accumulo di polvere e la progettazione di impianti che minimizzino la dispersione di polvere durante un'esplosione primaria.

Il principale obiettivo è quindi quello di mantenere un livello di igiene sufficiente a precludere la formazione di esplosioni secondarie all'interno dell'apparecchiatura.

Le esplosioni secondarie possono diffondersi su vasta scala, provocando potenziali vittime, danni strutturali significativi e interruzioni della produzione, a meno che non siano adottate misure

preventive per prevenire l'accumulo di polveri sospese nell'aria. Gli impianti dovrebbero essere concepiti per ridurre al minimo l'attrito tra le particelle, quando possibile.

## 1.6 Strati di polvere

Le polveri combustibili presenti nell'ambiente costituiscono un rischio significativo, sia come nubi disperse nell'atmosfera, capaci di creare condizioni esplosive, sia come strati depositati, che possono generare pericoli di incendio. In particolare, le polveri possono rimanere sospese in aria formando atmosfere potenzialmente esplosive; oppure possono accumularsi in strati che, se disturbati da turbolenze o movimenti meccanici, possono disperdersi nuovamente in aria generando ulteriori rischi di esplosione.

Alcuni strati di polvere, tuttavia, possono non essere facilmente disperdibili e rappresentano principalmente un rischio d'incendio tramite combustione lenta o decomposizione termica. La valutazione dei rischi in ambienti industriali deve considerare la probabilità di formazione di accumulo di strati di polveri. È fondamentale limitare l'estensione degli strati di polvere, poiché una piccola esplosione primaria può sollevare una quantità maggiore di polvere, causando un'esplosione secondaria molto più vasta, noto come effetto domino.

Per ridurre il rischio di esplosioni secondarie, come già anticipato nel paragrafo 1.4, è essenziale contenere la formazione e l'estensione degli strati di polvere. Emissioni continue o intermittenti di piccole quantità di polvere possono accumularsi nel tempo su superfici orizzontali o leggermente inclinate, formando strati potenzialmente pericolosi. Se la temperatura di un componente riscaldato supera quella di accensione della polvere, può innescare una combustione lenta o, se il materiale è più fine, può disperdersi nell'aria, creando un'atmosfera esplosiva. In certi casi, gli strati di polvere non sono in grado di disperdersi e rappresentano esclusivamente un pericolo d'incendio.

### 1.6.1 Pericolosità degli strati di polvere

Gli strati di polvere possono accumularsi in diversi punti degli impianti industriali, in particolare:

1. Superfici orizzontali elevate: come le travi del soffitto o i condotti dell'aria dove la pulizia è difficile.
2. Attrezzature industriali: come i macchinari e gli impianti di trasporto, dove la polvere può accumularsi nei punti meno accessibili.
3. Zone nascoste: come gli spazi dietro o sotto i grandi contenitori o nelle nicchie poco visibili.

La polvere in questi punti può diventare un rischio per la sicurezza se raggiunge uno spessore tale da poter supportare una reazione di combustione a brace.

Per calcolare lo spessore minimo di uno strato di polvere che potrebbe causare un'esplosione, possiamo utilizzare alcuni dati di riferimento generali e formule matematiche. Ad esempio, la densità della polvere gioca un ruolo cruciale in questi calcoli. Supponiamo una densità in cumulo tipica della polvere di  $400 \text{ kg/m}^3$  (per esempio polvere di legno).

Uno spessore critico per lo strato di polvere può essere stimato con la semplice formula 3 basata sulla densità e sulla massa minima necessaria per un'esplosione:

$$h = \frac{M}{A \cdot \rho} \quad [eq.3]$$

dove:

- $h$  è lo spessore dello strato di polvere (in metri),
- $M$  è la massa minima di polvere necessaria per un'esplosione (in chilogrammi),
- $A$  è l'area sulla quale la polvere è distribuita (in metri quadrati),
- $\rho$  è la densità della polvere (in  $\text{kg/m}^3$ ).

Per una migliore comprensione di quanto appena esposto, nel paragrafo seguente, esamineremo degli esempi illustrativi[2].

## 1.6.2 Calcolo spessore strato di polvere limite

Per calcolare lo spessore di uno strato di polvere che potrebbe causare un'esplosione, possiamo seguire questi passaggi:

1. Determinare i parametri del materiale:

- Densità della polvere ( $\rho$ ): la densità assoluta della polvere ( $\text{kg/m}^3$ );
- Limite inferiore di esplosività (LEL): la concentrazione minima di polvere nell'aria che può causare un'esplosione ( $\text{g/m}^3$ ).

2. Ipotesi sul volume della stanza:

- Supponiamo che il volume dell'ambiente sia  $V=600 \text{ m}^3$ , dove consideriamo un'altezza  $h=6\text{m}$  e l'area  $A = 100 \text{ m}^2$
- Calcolo la massa critica della polvere:

Utilizzando il LEL, possiamo calcolare la massa critica  $m_c$  di polvere che, se dispersa uniformemente nell'ambiente, potrebbe causare un'esplosione.

$$M = LEL \times V \quad [eq.4]$$

dove  $LEL$  è espresso in  $\text{kg/m}^3$ .

3. Calcolare lo spessore dello strato di polvere:

- Una volta nota la massa critica, possiamo determinare lo spessore dello strato di polvere ( $h$ ) utilizzando la densità della polvere.

$$h = \frac{M}{\rho \times A}$$

dove :



A è l'area del pavimento della stanza.

### 1.6.2.1 Esempio con farina di frumento

Prendiamo come esempio una polvere di farina da frumento (un tipico materiale combustibile):

Densità ( $\rho$ ): Supponiamo sia  $530 \text{ kg/m}^3$ .

LEL:  $60 \text{ g/m}^3$  ( $0.06 \text{ kg/m}^3$ ).

1. Massa critica della polvere

$$M = LEL \times V = \frac{0.06 \text{ kg}}{\text{m}^3} \times 600 \text{ m}^3 = 36 \text{ kg}$$

2. Area del pavimento della stanza

Se ipotizziamo che la stanza sia un parallelepipedo con altezza di 6 m,  
area del pavimento  $A = 10 \times 10 \text{ m}^2$

3. Spessore dello strato di polvere

$$h = \frac{M}{\rho \times A} = 0,68 \text{ mm}$$

Quindi, uno strato di polvere di farina di frumento spesso circa 0,68 mm potrebbe essere sufficiente per raggiungere una concentrazione critica in un ambiente con superficie in pianta di  $100 \text{ m}^2$  e volume di  $600 \text{ m}^3$ , considerando un LEL di  $60 \text{ g/m}^3$  e una densità della polvere di  $530 \text{ kg/m}^3$ .

### 1.6.2.2 Esempio con grano

Densità ( $\rho$ ): Supponiamo sia  $730 \text{ kg/m}^3$ .

LEL:  $60 \text{ g/m}^3$  ( $0.06 \text{ kg/m}^3$ ).

1. Massa critica della polvere

$$M = LEL \times V = \frac{0.06 \text{ kg}}{\text{m}^3} \times 600 \text{ m}^3 = 36 \text{ kg}$$

2. Area del pavimento della stanza

Se ipotizziamo che la stanza sia di forma parallelepipedica con altezza di 10 m e altezza pari a 6m,

area del pavimento  $A = 10 \times 10 \text{ m}^2$

3. Spessore dello strato di polvere

$$h = \frac{M}{\rho \times A} = 0,5 \text{ mm}$$

Quindi, uno strato di polvere di grano spesso circa 0,5 mm potrebbe essere sufficiente per raggiungere una concentrazione critica in un ambiente con volume di  $600 \text{ m}^3$ , considerando un LEL di  $60 \text{ g/m}^3$  e una densità della polvere di  $730 \text{ kg/m}^3$ .

### 1.6.2.3 Esempio con alluminio

Densità ( $\rho$ ): Supponiamo sia 1300 kg/m<sup>3</sup>.

LEL: 60 g/m<sup>3</sup> (0.06 kg/m<sup>3</sup>).

1. Massa critica della polvere

$$M = LEL \times V = \frac{0.06kg}{m^3} \times 600m^3 = 36kg$$

2. Area del pavimento della stanza

Se ipotizziamo che la stanza sia un parallelepipedo con altezza di 6 m,  
area del pavimento  $A = 10 \times 10 m^2$

3. Spessore dello strato di polvere

$$h = \frac{M}{\rho \times A} = 0,27mm$$

Quindi, uno strato di polvere di grano spesso circa 0,27 mm potrebbe essere sufficiente per raggiungere una concentrazione critica in un ambiente con volume di 600 m<sup>3</sup>, considerando un LEL di 60 g/m<sup>3</sup> e una densità della polvere di 1300 kg/m<sup>3</sup>.

### 1.6.2.4 Esempio con cellulosa

Densità ( $\rho$ ): Supponiamo sia 800 kg/m<sup>3</sup>.

LEL: 51 g/m<sup>3</sup> (0.051 kg/m<sup>3</sup>).

1. Massa critica della polvere

$$M = LEL \times V = \frac{0.051kg}{m^3} \times 600m^3 = 30,6kg$$

2. Area del pavimento della stanza

Se ipotizziamo che la stanza sia un parallelepipedo con altezza di 6 m,  
area del pavimento  $A = 10 \times 10 m^2$

3. Spessore dello strato di polvere

$$h = \frac{M}{\rho \times A} = 0,75mm$$

Quindi, uno strato di polvere di grano spesso circa 0,75 mm potrebbe essere sufficiente per raggiungere una concentrazione critica in un ambiente con volume di 600 m<sup>3</sup>, considerando un LEL di 51 g/m<sup>3</sup> e una densità della polvere di 800 kg/m<sup>3</sup>.

### 1.6.2.5 Esempio con legno

Densità ( $\rho$ ): Supponiamo sia 450 kg/m<sup>3</sup>.

LEL: 60 g/m<sup>3</sup> (0.06 kg/m<sup>3</sup>).

1. Massa critica della polvere

$$M = LEL \times V = \frac{0.06kg}{m^3} \times 600m^3 = 36kg$$

2. Area del pavimento della stanza

Se ipotizziamo che la stanza sia un parallelepipedo con altezza di 6 m,  
area del pavimento  $A = 10 \times 10 m^2$

3. Spessore dello strato di polvere

$$h = \frac{M}{\rho \times A} = 0,8mm$$

Quindi, uno strato di polvere di grano spesso circa 0,8 mm potrebbe essere sufficiente per raggiungere una concentrazione critica in un ambiente con volume di 600 m<sup>3</sup>, considerando un LEL di 60 g/m<sup>3</sup> e una densità della polvere di 450 kg/m<sup>3</sup>.

### 1.6.2.6 Esempio con cotone

Densità ( $\rho$ ): Supponiamo sia 20 kg/m<sup>3</sup>.

LEL: 30 g/m<sup>3</sup> (0.03 kg/m<sup>3</sup>).

4. Massa critica della polvere

$$M = LEL \times V = \frac{0.03kg}{m^3} \times 600m^3 = 18kg$$

5. Area del pavimento della stanza

Se ipotizziamo che la stanza sia un parallelepipedo con altezza di 6 m,  
area del pavimento  $A = 10 \times 10 m^2$

6. Spessore dello strato di polvere

$$h = \frac{M}{\rho \times A} = 9mm$$

Quindi, uno strato di polvere di grano spesso circa 9 mm potrebbe essere sufficiente per raggiungere una concentrazione critica in un ambiente con volume di 600 m<sup>3</sup>, considerando un LEL di 30 g/m<sup>3</sup> e una densità della polvere di 20 kg/m<sup>3</sup>.

### 1.6.2.7 Lesson Learning

Analizzando gli esempi riportati, emerge chiaramente l'importanza di comprendere e gestire la distribuzione e l'accumulo delle polveri combustibili negli ambienti industriali. La lezione chiave che possiamo trarre riguarda l'ordine di grandezza degli spessori critici degli strati di polvere necessari per raggiungere concentrazioni esplosive.

Gli esempi specifici dimostrano come anche piccoli spessori di polvere, dell'ordine di frazioni di millimetro fino a pochi millimetri, possano rappresentare un rischio significativo di esplosione se la

polvere viene sollevata e dispersa nell'aria. Questo è evidente nei calcoli per materiali come farina di frumento, grano, alluminio, cellulosa, legno e cotone, dove gli spessori critici variano in base alla densità del materiale e al limite inferiore di esplosività (LEL).

Una conclusione fondamentale è che gli impianti industriali devono implementare rigorose misure di pulizia e monitoraggio per evitare l'accumulo di polveri combustibili su superfici orizzontali e in aree nascoste. La prevenzione delle esplosioni secondarie, che possono essere innescate da una piccola esplosione primaria, richiede un'attenzione costante alla gestione degli strati di polvere. In sintesi, l'analisi dettagliata degli ordini di grandezza degli spessori di polvere critici sottolinea la necessità di una strategia di gestione della polvere ben pianificata e rigorosamente applicata, per garantire la sicurezza in ambienti industriali e prevenire incidenti catastrofici.

### 1.6.3 Calcolo degli elementi per la definizione delle estensioni delle zone pericolose

Nei seguenti paragrafi verranno definiti dei criteri di calcolo della distanza pericolosa  $d_z$ , la quota “a” delle zone con pericolo d’esplosione, la velocità di sedimentazione e il tempo del processo produttivo. Tali calcoli saranno effettuati utilizzando come riferimento la procedura e i parametri stabiliti nella Guida CEI 31-56. E’ importante chiarire che essa non è più in vigore. Tuttavia, la analizziamo comunque per comprendere meglio i criteri precedentemente utilizzati e per confrontarli con le normative attuali. [2]

#### 1.6.3.1 Distanza pericolosa $d_z$ e quota “a”

La distanza pericolosa  $d_z$  rappresenta la misura calcolata dalla sorgente di emissione (SE) utilizzando metodi matematici, nella direzione di propagazione e dispersione più probabile della nube esplosiva.

La distanza pericolosa  $d_z$  è calcolata secondo la seguente relazione, indicata nella Guida CEI 31-56 [2]:

$$d_z = (d_o + d_n) \cdot (k_d \cdot k_u \cdot k_{ta} \cdot k_w) \quad [\text{eq.4}]$$

dove:

$d_z$  distanza pericolosa [m];

$d_o$  distanza di riferimento [m];

$d_h$  distanza addizionale dipendente dall’altezza della SE [m];

$k_d$  coefficiente dipendente dal rapporto tra la portata di emissione  $Q_d$  della SE e il LEL della sostanza considerata;

$k_u$  coefficiente relativo al contenuto di umidità della polvere;

$k_{ta}$  coefficiente relativo al tipo di ambiente;

$k_w$  coefficiente che dipende dalla velocità dell’aria di ventilazione  $w$  nell’intorno della SE e dalla velocità di sedimentazione  $u_t$ .

Per determinare la distanza di riferimento  $d_0$ , è necessario distinguere due scenari:  
 a) emissioni a bassa velocità (provenienti da sistemi a pressione atmosferica). (figura 14 presente nella CEI 31-56);  
 b) emissioni ad alta velocità (provenienti da sistemi sotto pressione). (figura 15 presente nella CEI 31-56);

Nel caso delle emissioni a bassa velocità (provenienti da sistemi a pressione atmosferica), la distanza di riferimento  $d_0$  può essere generalmente posta pari a 1 metro.

Negli altri casi, la distanza di riferimento  $d_0$  può essere determinata mediante l'utilizzo di grafici che indicano la distanza, in metri, alla quale può arrivare la polvere, considerando una sorgente di emissione (SE) situata in prossimità (fino a 3 metri) della superficie di deposito (ad esempio, suolo, pavimento o qualsiasi superficie che delimita inferiormente la caduta della polvere), in funzione della dimensione media delle particelle  $d_m$  [ $\mu\text{m}$ ] e della densità assoluta della polvere considerata.

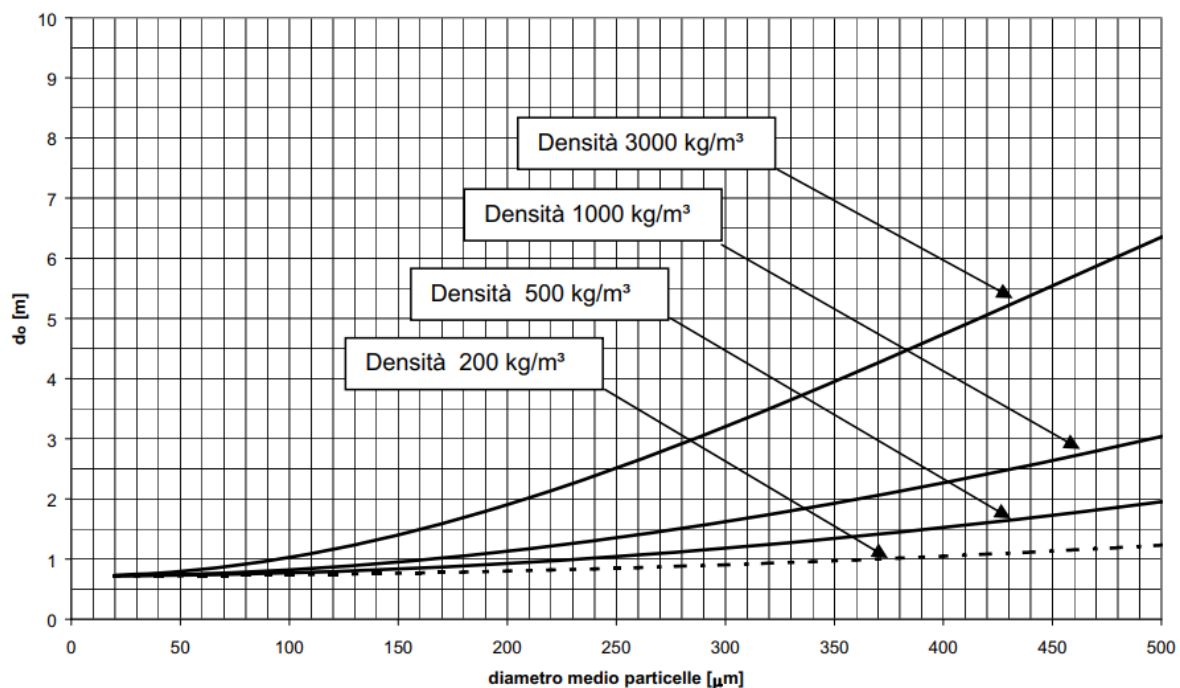


Figura 14 - Distanza di riferimento  $d_0$  per SE in prossimità del suolo da sistema in pressione (ad alta velocità) e velocità dell'aria  $w \leq 0,5$  m/s. Figura presa dalla Guida 31-56.

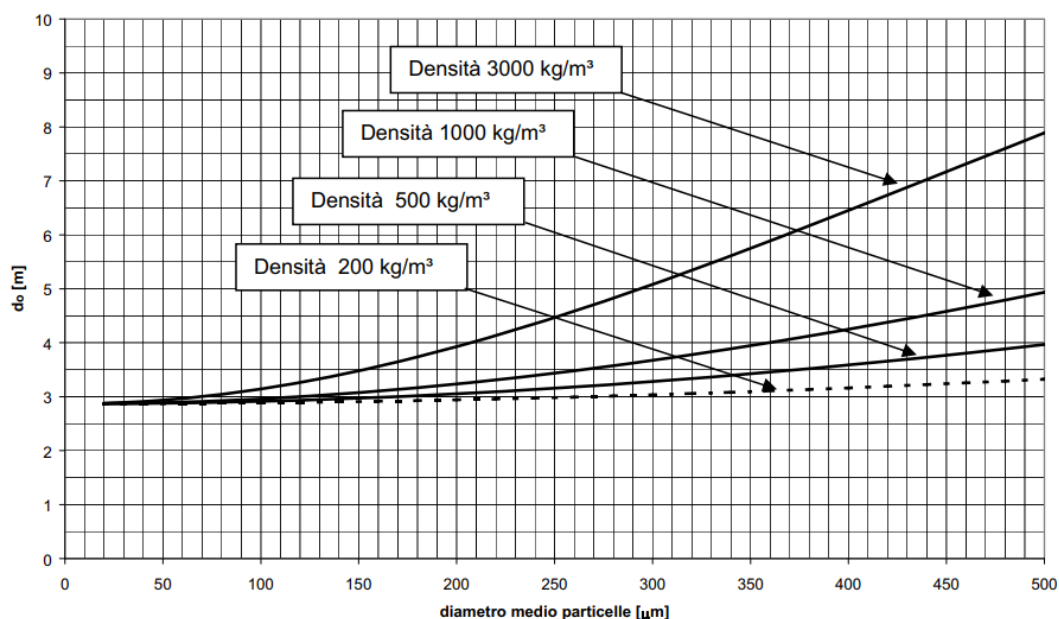


Figura 15 - Distanza di riferimento  $d_0$  per SE in prossimità del suolo da sistema in pressione (ad alta velocità) e velocità dell'aria  $w \leq 2$  m/s. Figura presa dalla Guida 31-56.

Alla distanza di riferimento  $d_0$  deve essere aggiunta la distanza  $d_h$  dipendente dall'altezza della SE, che può essere ricavata dalla Tabella seguente:

Tabella 4 - Distanza  $d_h$

Pos.	Condizione	$D_h$ [m]
1	Se $h \geq 20$ m	1,0
2	Se $20 \text{ m} > h > 3 \text{ m}$	0,5
3	Se $h \leq 3$ m	0

dove:

$h$  altezza della SE dalla superficie di deposito.

La polvere può depositarsi rapidamente oppure rimanere sospesa in aria per un lungo periodo, questo avviene in funzione della velocità di sedimentazione (velocità terminale)  $u_t$ .

La relazione per stimare la velocità terminale è la seguente:

$$u_t = \frac{\rho \cdot (d_m \cdot 10^{-6})^2 \cdot g}{18 \cdot \mu} \quad [\text{eq.5}]$$

dove:

$u_t$  è la velocità di sedimentazione della polvere [m/s];

$\rho$  è la densità (assoluta) della polvere [kg/m<sup>3</sup>]

$d_m$  è la grandezza media delle particelle [μm]

$g$  è l'accelerazione di gravità [9,81 m/s<sup>2</sup>]

$\mu$  è il coefficiente di viscosità dinamica dell'aria [1,8 10<sup>-5</sup> Ns/m<sup>2</sup>].

Il tempo di sedimentazione è espresso dalla seguente relazione:

$$t = \frac{h}{u_t} \quad [\text{eq.6}]$$

dove:

$t_t$  è il tempo di sedimentazione (caduta) della polvere [s]

$h$  è l'altezza di caduta della polvere [m]

$u_t$  è la velocità di sedimentazione della polvere [m/s].

Il coefficiente  $k_d$  è ricavato dalla seguente tabella:

Tabella 5 - Coefficiente  $k_d$

Pos.	Condizione	$k_d$
1	Se $\frac{LEL \cdot 10^{-3} \cdot u_t \cdot d_0^2}{2 \cdot Q_d} > 10$	0,5
2	Se $\frac{LEL \cdot 10^{-3} \cdot u_t \cdot d_0^2}{2 \cdot Q_d} \leq 10$	1

dove:

LEL limite inferiore di esplosibilità [g/m<sup>3</sup>];

$u_t$  velocità di sedimentazione [m/s];

$d_0$  distanza di riferimento [m];

$Q_d$  portata di emissione della SE [kg/s].

Invece, i coefficienti relativi al:

- contenuto di umidità della polvere  $k_u$ ,
- al tipo di ambiente  $k_{ta}$ ,
- alla velocità dell'aria di ventilazione  $w$  nell'intorno della SE e dalla velocità di sedimentazione  $u_t$

sono ricavati dalle seguenti tabelle: [2]

Tabella 6 - Coefficiente  $k_u$

Pos.	Contenuto di umidità della polvere, valore %	Campo di variazione del Coefficiente	$k_u$	Note
1	dal 40% al 50%	da 0,3 a 0,5	0,3	
2	dal 12% al 40%	da 0,5 a 1,0	0,8	
3	inferiore al 12%	da 1,0 a 1,2	1,0	

Tabella 7 - Coefficiente  $k_a$

Pos.	Tipo di ambiente	Campo di variazione del Coefficiente	Coefficiente consigliato	Note
1	Aperto	da 0,5 a 0,7	0,5	
2	Aperto con ostacoli	da 0,7 a 1,0	0,8	
3	Chiuso	da 1,0 a 1,2	1,0	

Tabella 8 - Coefficiente  $k_w$

Pos.	Condizione	$k_w$
1	Se $\frac{W}{u_t} > 5$	3
2	Se $5 > \frac{W}{u_t} > 3$	2
3	Se $\frac{W}{u_t} \leq 3$	1

### 1.6.3.2 Esempi di calcolo

In questo paragrafo andremo a sviluppare i calcoli fornendo esempio pratico di varie sostanze.

#### 1.6.3.2.1 Farina di frumento

La velocità di sedimentazione  $u_t$  calcolata utilizzando la formula riportata nel paragrafo precedente, dove:

$\rho = 1300 \text{ kg/m}^3$  (densità della polvere)

$d_m = 57 \text{ }\mu\text{m}$  (dimensione media delle particelle)

$g = 9.81 \text{ m/s}^2$  (accelerazione di gravità)



$\mu = 1,8 \cdot 10^{-5} \text{ Ns/m}^2$  (viscosità dinamica dell'aria)

Calcoliamo:

$$u_t = \frac{1300 \cdot (57 \cdot 10^{-6})^2 \cdot 9.81}{18 \cdot 1,8 \cdot 10^{-5}} = 0.128 \text{ m/s}$$

Ipotizziamo ora un'altezza di caduta pari a  $h = 6\text{m}$ .

Il tempo di sedimentazione, utilizzando la formula presente nel paragrafo precedente, è pari a

$$t = \frac{6 \text{ m}}{2.32 \cdot 10^{-11} \text{ m/s}} \approx 46,875 \text{ s}$$

La distanza pericolosa  $d_z$  è calcolata con la formula vista nel paragrafo precedente, Assumiamo emissioni a bassa velocità ( $d_0 = 1 \text{ m}$ ).

Per un'altezza  $h=6\text{m}$ , dalla tabella fornita precedentemente, assumiamo  $d_h = 1,5 \text{ m}$ .

Per  $LEL=60 \text{ g/m}^3$  e  $u_t$  calcolato prima:  $k_d = \frac{Q_d}{LEL} \cdot \frac{1}{U_T}$ .

Assumiamo  $Q_d = 0.1 \text{ kg/s}$  come valore esempio (flusso di emissione):

$$k_d = \frac{0,1}{0,06} \cdot \frac{1}{0.128} = 13,02$$

Assumiamo valori standard per questi coefficienti:

- $k_u=1$  (umidità standard)
- $k_{ta}=1$  (ambiente standard)
- $k_w=1$  (ventilazione standard)

Calcolo finale di

$$d_z = (1+1.5) \cdot (13,02 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1) = 2.5 \cdot 13,02 = 32,55 \text{ m}$$

### 1.6.3.2.2 Grano

La velocità di sedimentazione  $u_t$  calcolata utilizzando la formula riportata nel paragrafo precedente, Dove:

$\rho = 1300 \text{ kg/m}^3$  (densità della polvere)

$d_m = 80 \text{ }\mu\text{m}$  (dimensione media delle particelle)

$g = 9.81 \text{ m/s}^2$  (accelerazione di gravità)

$\mu = 1,8 \cdot 10^{-5} \text{ Ns/m}^2$  (viscosità dinamica dell'aria)

Calcoliamo:

$$u_t = \frac{1300 \cdot (80 \cdot 10^{-6})^2 \cdot 9.81}{18 \cdot 1,8 \cdot 10^{-5}} = 0.252 \text{ m/s}$$

Ipotizziamo ora un'altezza di caduta pari a  $h = 6\text{m}$ .

Il tempo di sedimentazione, utilizzando la formula presente nel paragrafo precedente, è pari a

$$t = \frac{6\text{ m}}{0,252\text{m/s}} \approx 23.81\text{s}$$

La distanza pericolosa  $d_z$  è calcolata con la formula vista nel paragrafo precedente, Assumiamo emissioni a bassa velocità ( $d_0 = 1\text{ m}$ ).

Per un'altezza  $h=6\text{m}$ , dalla tabella fornita precedentemente, assumiamo  $d_h = 1,5\text{ m}$ .

Per  $LEL=60\text{ g/m}^3$  e  $u_t$  calcolato prima:  $k_d = \frac{Q_d}{LEL} \cdot \frac{1}{U_T}$ .

Assumiamo  $Q_d=0.1\text{ kg/s}$  come valore esempio (flusso di emissione):

$$k_d = \frac{0,1}{0,06} \cdot \frac{1}{0.252} = 6.61$$

Assumiamo valori standard per questi coefficienti:

- $k_u=1$  (umidità standard)
- $k_{ta}=1$  (ambiente standard)
- $k_w=1$  (ventilazione standard)

Calcolo finale di

$$d_z = (1+1.5) \cdot (6,61 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1) = 2.5 \cdot 6,61 = 16,53\text{m}.$$

### 1.6.3.2.3 Alluminio

La velocità di sedimentazione  $u_t$  calcolata utilizzando la formula riportata nel paragrafo precedente, Dove:

$\rho = 2700\text{ kg/m}^3$  (densità della polvere)

$d_m = 23\text{ }\mu\text{m}$  (dimensione media delle particelle)

$g = 9.81\text{ m/s}^2$  (accelerazione di gravità)

$\mu = 1,8 \cdot 10^{-5}\text{ Ns/m}^2$  (viscosità dinamica dell'aria)

Calcoliamo:

$$u_t = \frac{2700 \cdot (23 \cdot 10^{-6})^2 \cdot 9.81}{18 \cdot 1,8 \cdot 10^{-5}} = 0.043\text{m/s}$$

Ipotizziamo ora un'altezza di caduta pari a  $h = 6\text{m}$ .

Il tempo di sedimentazione, utilizzando la formula presente nel paragrafo precedente, è pari a

$$t = \frac{6\text{ m}}{0.043\text{m/s}} \approx 139.53\text{s}$$

La distanza pericolosa  $d_z$  è calcolata con la formula vista nel paragrafo precedente, Assumiamo emissioni a bassa velocità ( $d_0 = 1\text{ m}$ ).

Per un'altezza  $h=6\text{m}$ , dalla tabella fornita precedentemente, assumiamo  $d_h = 1,5\text{ m}$ .

Per  $LEL=60\text{ g/m}^3$  e  $u_t$  calcolato prima:  $k_d = \frac{Q_d}{LEL} \cdot \frac{1}{U_T}$ .

Assumiamo  $Q_d=0.1\text{ kg/s}$  come valore esempio (flusso di emissione):

$$k_d = \frac{0,1}{0,06} \cdot \frac{1}{0,043} = 38,76$$

Assumiamo valori standard per questi coefficienti:

- $k_u=1$  (umidità standard)
- $k_{ta}=1$  (ambiente standard)
- $k_w=1$  (ventilazione standard)

Calcolo finale di

$$d_z=(1+1.5) \cdot (38,76 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1) = 2.5 \cdot 38,76 = 96.89\text{m}$$

### 1.6.3.2.4 Cellulosa

La velocità di sedimentazione  $u_t$  calcolata utilizzando la formula riportata nel paragrafo precedente, Dove:

$\rho = 1500 \text{ kg/m}^3$  (densità della polvere)

$d_m = 51 \text{ }\mu\text{m}$  (dimensione media delle particelle)

$g = 9.81 \text{ m/s}^2$  (accelerazione di gravità)

$\mu = 1,8 \cdot 10^{-5} \text{ Ns/m}^2$  (viscosità dinamica dell'aria)

Calcoliamo:

$$u_t = \frac{1500 \cdot (51 \cdot 10^{-6})^2 \cdot 9.81}{18 \cdot 1,8 \cdot 10^{-5}} = 0.12 \text{ m/s}$$

Ipotizziamo ora un'altezza di caduta pari a  $h = 6\text{m}$ .

Il tempo di sedimentazione, utilizzando la formula presente nel paragrafo precedente, è pari a

$$t = \frac{6 \text{ m}}{0,12\text{m/s}} \approx 50\text{s}$$

La distanza pericolosa  $d_z$  è calcolata con la formula vista nel paragrafo precedente, Assumiamo emissioni a bassa velocità ( $d_0 = 1 \text{ m}$ ).

Per un'altezza  $h=6\text{m}$ , dalla tabella fornita precedentemente, assumiamo  $d_h = 1,5 \text{ m}$ .

Per  $LEL=60 \text{ g/m}^3$  e  $u_t$  calcolato prima:  $k_d = \frac{Q_d}{LEL} \cdot \frac{1}{U_T}$ .

Assumiamo  $Q_d = 0.1 \text{ kg/s}$  come valore esempio (flusso di emissione):

$$k_d = \frac{0,1}{0,051} \cdot \frac{1}{0,12} = 16.34$$

Assumiamo valori standard per questi coefficienti:

- $k_u=1$  (umidità standard)
- $k_{ta}=1$  (ambiente standard)
- $k_w=1$  (ventilazione standard)

Calcolo finale di

$$d_z=(1+1.5) \cdot (16,34 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1) = 2.5 \cdot 16.34 = 40.85\text{m}$$

### 1.6.3.2.5 Legno

La velocità di sedimentazione  $u_t$  calcolata utilizzando la formula riportata nel paragrafo precedente, Dove:

$\rho = 1500 \text{ kg/m}^3$  (densità della polvere)

$d_m = 60 \text{ }\mu\text{m}$  (dimensione media delle particelle)

$g = 9.81 \text{ m/s}^2$  (accelerazione di gravità)

$\mu = 1,8 \cdot 10^{-5} \text{ Ns/m}^2$  (viscosità dinamica dell'aria)

Calcoliamo:

$$u_t = \frac{1500 \cdot (60 \cdot 10^{-6})^2 \cdot 9.81}{18 \cdot 1,8 \cdot 10^{-5}} = 0.164 \text{ m/s}$$

Ipotizziamo ora un'altezza di caduta pari a  $h = 6\text{m}$ .

Il tempo di sedimentazione, utilizzando la formula presente nel paragrafo precedente, è pari a

$$t = \frac{6 \text{ m}}{0,164 \text{ m/s}} \approx 36.58 \text{ s}$$

La distanza pericolosa  $d_z$  è calcolata con la formula vista nel paragrafo precedente, Assumiamo emissioni a bassa velocità ( $d_0 = 1 \text{ m}$ ).

Per un'altezza  $h = 6\text{m}$ , dalla tabella fornita precedentemente, assumiamo  $d_h = 1,5 \text{ m}$ .

Per  $LEL = 60 \text{ g/m}^3$  e  $u_t$  calcolato prima:  $k_d = \frac{Q_d}{LEL} \cdot \frac{1}{u_T}$ .

Assumiamo  $Q_d = 0.1 \text{ kg/s}$  come valore esempio (flusso di emissione):

$$k_d = \frac{0,1}{0,06} \cdot \frac{1}{0,164} = 10.163$$

Assumiamo valori standard per questi coefficienti:

- $k_u = 1$  (umidità standard)
- $k_{ta} = 1$  (ambiente standard)
- $k_w = 1$  (ventilazione standard)

Calcolo finale di

$$d_z = (1 + 1.5) \cdot (10,163 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1) = 2.5 \cdot 10,163 = 25,41 \text{ m}$$

### 1.6.3.2.6 Cotone

La velocità di sedimentazione  $u_t$  calcolata utilizzando la formula riportata nel paragrafo precedente, Dove:

$\rho = 1500 \text{ kg/m}^3$  (densità della polvere)

$d_m = 57 \text{ }\mu\text{m}$  (dimensione media delle particelle)

$g = 9.81 \text{ m/s}^2$  (accelerazione di gravità)

$\mu = 1,8 \cdot 10^{-5} \text{ Ns/m}^2$  (viscosità dinamica dell'aria)

Calcoliamo:

$$u_t = \frac{1500 \cdot (57 \cdot 10^{-6})^2 \cdot 9.81}{18 \cdot 1,8 \cdot 10^{-5}} = 0,147 \text{ m/s}$$

Ipotizziamo ora un'altezza di caduta pari a  $h = 6\text{m}$ .

Il tempo di sedimentazione, utilizzando la formula presente nel paragrafo precedente, è pari a

$$t = \frac{6 \text{ m}}{0,147 \text{ m/s}} \approx 40,82\text{s}$$

La distanza pericolosa  $d_z$  è calcolata con la formula vista nel paragrafo precedente, Assumiamo emissioni a bassa velocità ( $d_0 = 1 \text{ m}$ ).

Per un'altezza  $h=6\text{m}$ , dalla tabella fornita precedentemente, assumiamo  $d_h = 1,5 \text{ m}$ .

Per  $LEL=60 \text{ g/m}^3$  e  $u_t$  calcolato prima:  $k_d = \frac{Q_d}{LEL} \cdot \frac{1}{U_T}$ .

Assumiamo  $Q_d = 0.1 \text{ kg/s}$  come valore esempio (flusso di emissione):

$$k_d = \frac{0,1}{0,06} \cdot \frac{1}{0,147} = 11,38$$

Assumiamo valori standard per questi coefficienti:

- $k_u=1$  (umidità standard)
- $k_{ta}=1$  (ambiente standard)
- $k_w=1$  (ventilazione standard)

Calcolo finale di

$$d_z = (1+1.5) \cdot (11,38 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1) = 2.5 \cdot 11,38 = 28.34 \text{ m}$$

## 1.6.4 Determinazione dei tipi e delle estensioni delle singole zone pericolose originate da strati di polvere

Per determinare le estensioni delle singole zone pericolose originate da strati di polvere, si considerano vari fattori, tra cui la grandezza media delle particelle di polvere, l'estensione (dimensioni in pianta) dello strato, lo spessore dello strato e la durata della sua presenza.

Si stabilisce che quando uno strato di polvere si forma, la sua estensione può essere almeno corrispondente all'estensione in pianta della zona pericolosa originata dall'emissione dal sistema di contenimento. Questo è particolarmente vero quando lo strato non è disturbato dall'ambiente circostante.

Tuttavia, se lo strato è disturbato da disturbi o turbolenze nell'ambiente, la sua estensione può variare e dipende sia dall'estensione in pianta della zona pericolosa originata dall'emissione dal sistema di contenimento che dalle condizioni ambientali circostanti.

Se durante l'attività si accumulano strati di polvere al di fuori dei limiti definiti nella documentazione di classificazione dei luoghi con pericolo d'esplosione, tale documentazione deve essere modificata per includere gli strati riscontrati.

Per quanto riguarda i gradi di emissione e i tipi di zone pericolose originate da strati di polveri combustibili, se uno strato non è disturbato, la polvere non può essere sollevata nell'aria e quindi non

origina zone con pericolo d'esplosione, ma solo pericolo d'incendio. Tuttavia, si considera anche la possibilità che gli strati possano contribuire alle esplosioni secondarie.

Se uno strato è disturbato, la polvere può essere sollevata nell'aria, creando atmosfere esplosive. In questo caso, lo strato è considerato una sorgente di emissione con un grado di emissione dipendente dalla frequenza del disturbo.

Mentre per l'estensione delle zone pericolose originate da strati di polveri combustibili negli ambienti aperti, le zone pericolose possono essere definite in analogia con quanto indicato per le zone pericolose originate da altre fonti. Negli ambienti chiusi, l'estensione della zona pericolosa determinata dall'emissione da uno strato dipende dalla concentrazione della polvere sollevata e dalle dimensioni dell'ambiente circostante. Se la concentrazione supera il 50% LEL (Lower Explosive Limit), l'intero ambiente è considerato una zona pericolosa. Altrimenti, la zona pericolosa può estendersi solo nell'intorno della sorgente emissiva, ma in casi dubbi è consigliabile considerare l'estensione a tutto l'ambiente. Per calcolare la concentrazione della nube di polvere in un ambiente chiuso è possibile utilizzare la formula già descritta nel paragrafo 1.4.

## **1.6.5 Valutazione del Rischio di Esplosione da Polvere secondo la Guida CEI 31-56**

In precedenza, abbiamo calcolato lo spessore della polvere capace di generare un'esplosione in conformità alla Guida CEI 31-56, che dettaglia i volumi, le sorgenti di emissione (SE) e l'estensione delle zone a rischio di esplosione in ambienti aperti e chiusi.

Gli ambienti aperti limitano la zona pericolosa a un volume prossimo alla SE, considerando la dispersione naturale della polvere nell'aria, mentre negli ambienti chiusi la zona pericolosa può estendersi a tutto l'ambiente, specialmente se le emissioni di polvere sono significative. La quota "a", indicata nel paragrafo 1.6.3.1, rappresenta l'effettiva estensione della zona pericolosa nella direzione di emissione e dispersione della nube esplosiva e deve essere almeno pari alla distanza pericolosa  $d_z$ , preferibilmente maggiore, per tenere conto di specifiche situazioni valutate dal tecnico incaricato della classificazione dei luoghi pericolosi.

La concentrazione di una nube di polvere in un ambiente chiuso è calcolata utilizzando l'equazione al paragrafo 1.3.1; se tale concentrazione supera il 50% del LEL, l'intero ambiente è considerato pericoloso, mentre se è uguale o inferiore al 50%, solo l'area intorno alla SE è pericolosa. Per chiarire questi concetti, verranno presentati esempi pratici utilizzando una polvere leggera e una pesante. La norma definisce chiaramente i criteri per l'estensione e il volume delle zone 20, 21 e 22 (paragrafo 3.3.2.1), fornendo indicazioni precise da adattare caso per caso. Le zone 20 dovrebbero essere evitate o essere di piccola estensione, con una quota "a" tra 0,1 m e 1 m intorno alla SE e un'estensione verticale verso il basso fino alla superficie di deposito. Le zone 21 possono essere presenti all'esterno dei sistemi di contenimento delle polveri combustibili, vicino alle emissioni di primo grado e in presenza di strati di polvere senza adeguata bonifica. Le zone 22 sono simili alle zone 21, ma per emissioni di secondo grado. Il volume della zona pericolosa può essere considerato trascurabile quando:

- Per la zona 20 è  $< 1 \text{ dm}^3$
- Per la zona 21 è  $< 10 \text{ dm}^3$

- Per la zona 22 è  $< 100 \text{ dm}^3$
- Negli ambienti chiusi, risulta inferiore a un decimillesimo (0,01%) del volume dell'ambiente stesso.

Per fornire un esempio pratico, analizziamo due materiali di polvere combustibile: la farina di grano e la polvere di alluminio, ipotizzando lo spessore di polvere pari a 1 cm, calcoliamo il volume della zona infiammabile nel quale può avvenire l'esplosione.

### **Esempio Pratico:**

#### **Materiale di Polvere Leggera: Farina di Grano**

- Limite Inferiore di Esplosibilità (LEL):  $0.051 \text{ Kg/ m}^3$
- Dimensioni delle Particelle: 100 micrometri (0.1 mm)
- Densità della Farina di Grano: circa  $0.730 \text{ g/cm}^3$  ( $730 \text{ kg/m}^3$ )
- Spessore strato di polvere (s): 1 cm

Dimensioni della Trave di Soffitto:

- Lunghezza: 10 m
- Larghezza: 0.3 m
- $A = 10 \times 0.3 = 3 \text{ m}^2$

➤ Calcolo della Massa di polvere (M) nello strato:

$$M = s \times A \times \rho = 0,01 \text{ (m)} \times 3 \text{ (m}^2) \times 730 \text{ (kg/m}^3) = 21,9 \text{ kg}$$

➤ Calcolo del volume della zona infiammabile (V) che ottengo sollevando il quantitativo di polvere ipotizzato prima come  $s = 1 \text{ cm}$ :

$$V = \frac{M}{LEL} = \frac{21,9 \text{ kg}}{0.051 \text{ kg/m}^3} = 429,41 \text{ m}^3$$

La nube di polvere che si forma a causa dello strato di polvere distribuito su un'area di  $3 \text{ m}^2$  con uno spessore di 1 cm, ha una massa di 21,9 kg. Se questa polvere si disperde in aria raggiungendo una concentrazione pari al LEL di  $51 \text{ g/m}^3$ , il volume della zona infiammabile sarà di  $429,41 \text{ m}^3$ .

Se l'area totale della stanza è molto più grande del volume calcolato di  $429,41 \text{ m}^3$ , solo questa parte sarà considerata a rischio esplosione, assumendo che la dispersione della polvere avvenga in modo omogeneo.

#### **Materiale di Polvere Pesante: Polvere di Alluminio**

- Limite Inferiore di Esplosibilità (LEL):  $0.06 \text{ g/ m}^3$
- Dimensioni delle Particelle: 50 micrometri (0.05 mm)
- Densità della Polvere di Alluminio: circa  $1.3 \text{ g/cm}^3$  ( $1300 \text{ kg/m}^3$ )

- Spessore strato di polvere (s): 1 cm

#### Dimensioni della Trave di Soffitto

- Lunghezza: 10 m
- Larghezza: 0.3 m
- $A = 10 \times 0.3 = 3 \text{ m}^2$

- Calcolo della Massa di polvere (M):

$$M = s \times A \times \rho = 0,01 \text{ (m)} \times 3 \text{ (m}^2\text{)} \times 1300 \text{ (kg/m}^3\text{)} = 39 \text{ kg}$$

- Calcolo del volume della zona infiammabile (V) che ottengo sollevando il quantitativo di polvere ipotizzato prima come  $s = 1 \text{ cm}$ :

$$V = \frac{M}{LEL} = \frac{39 \text{ kg}}{0.06 \text{ kg/m}^3} = 650 \text{ m}^3$$

La nube di polvere che si forma a causa dello strato di polvere distribuito su un'area di  $3 \text{ m}^2$  con uno spessore di 1 cm, ha una massa di 39 kg. Se questa polvere si disperde in aria raggiungendo una concentrazione pari al LEL di  $60 \text{ g/m}^3$ , il volume della zona infiammabile sarà di  $650 \text{ m}^3$ . Se l'area totale della stanza è molto più grande del volume calcolato di  $650 \text{ m}^3$ , solo questa parte sarà considerata a rischio esplosione, assumendo che la dispersione della polvere avvenga in modo omogeneo.

Dall'analisi delle dimensioni della zona infiammabile derivante dai calcoli appena svolti, risulta che dal sollevamento di polvere di farina di grano e polvere di alluminio, in un'area di  $3 \text{ m}^2$ , se sollevo uno strato di farina o alluminio pari a 1 cm, si ottiene un volume della zona infiammabile pari, rispettivamente, a  $429,41 \text{ m}^3$  e  $650 \text{ m}^3$ . Questi volumi rappresentano una potenziale zona di pericolo significativa, soprattutto in spazi confinati, dove la dispersione naturale della polvere è limitata e il rischio di esplosione è maggiore. La Guida CEI 31-56, che regola le zone di rischio esplosivo, indicano che in spazi confinati l'intero ambiente può diventare pericoloso se la concentrazione di polvere supera il 50% del Limite Inferiore di Esplosibilità (LEL). Questo esempio dimostra che in ambienti chiusi, la gestione delle polveri combustibili richiede particolare attenzione per prevenire rischi di esplosione, adottando misure preventive adeguate. Inoltre, la polvere concentrata su una trave, se sollevata, può generare una nube infiammabile che mette a rischio l'intero edificio. Anche una quantità relativamente piccola di polvere, se sollevata, può portare a un rischio di esplosione che coinvolge l'intero ambiente chiuso, sottolineando la necessità di una pulizia regolare e di un monitoraggio costante delle condizioni ambientali.



## 2.Casi di esplosioni da polveri

Il rischio di esplosione derivante dalle polveri è una problematica diffusa in numerose attività industriali, che coinvolge una vasta gamma di materiali e processi produttivi. Tale pericolo, presente in settori quali l'industria del legno, della carta, dell'estrazione e lavorazione del carbone, l'agroalimentare, la produzione di plastiche, la metallurgia e l'industria farmaceutica, richiede un'analisi approfondita per implementare misure preventive efficaci a tutela dei lavoratori e degli impianti.

Gli incidenti provocati da esplosioni di polveri, non solo causano danni significativi dal punto di vista economico ma anche gravi conseguenze in termini di perdite di vite umane e lesioni. Questi eventi sono caratterizzati da una sequenza dinamica, in cui un'esplosione primaria, innescata da una miscela di polvere e aria entro i limiti di esplosività, può generare esplosioni secondarie più dannose a causa dell'onda di pressione generata.

Analizzando i dati storici sulle esplosioni di polveri, emerge che il settore agro-industriale è il più vulnerabile seguito da altre attività industriali.

Nella seguente tabella 9 sono richiamati alcuni eventi incidentali occorsi nel mondo con conseguenze gravi o mortali.

Tabella 9 - Eventi incidentali

ANNO	LUOGO	ATTIVITÀ COINVOLTA	CONSEGUENZE
1785	Italia	Magazzino di farina	0 morti
1872	Scozia	Mulino di farina	18 morti
1970	Norvegia	Silo di stoccaggio del grano	0 morti
1972	Norvegia	Macinazione polvere di silicio	5 morti
1973	Norvegia	Miscelazione di polveri	5 morti
1975	Norvegia	Silo di stoccaggio di farina di pesce	1 morto
1976	Norvegia	Mulino a martelli	0 morti
1980	USA	Silo di stoccaggio del grano	1 morto
1981	USA	Silo di esportazione del grano	9 morti
1983	Regno Unito	Produzione di polvere di alluminio	0 morti
1987	Cina	Industria tessile	58 morti
1997	Francia	Stoccaggio di cereali	11 morti
1998	Usa	Impianto di grano	7 morti
1999	USA	Ditta farmaceutica	5 morti
2000	Italia	Pulitura di caffettiere in alluminio	0 morti
2001	Italia	Tessitura	3 morti
2007	Italia	Mulino	5 morti
2019	Argentina	Impianto di cereali	0 morti
2021	Singapore	Industria di sistemi di protezione antincendio	2 morti

## 2.1 Settori interessati da episodi di esplosioni da polvere

Per comprendere meglio la distribuzione dei rischi delle esplosioni da polveri, è utile esaminare una classifica dei settori più frequentemente interessati da tali esplosioni, ordinata in base alla frequenza degli eventi.

Per fornire una classifica accurata dei settori in cui avvengono maggiormente le esplosioni da polvere, ho consultato diversi archivi presenti online. Ecco il processo che ho seguito:

1. **Ricerca Iniziale:** ho cercato informazioni relative ai settori industriali con la più alta frequenza di esplosioni da polvere.
2. **Consultazione di Fonti Affidabili:** ho esaminato vari rapporti e articoli da fonti affidabili, inclusi Dust Safety Science, OSHA, e il CSB (Chemical Safety Board).
3. **Raccolta di Dati Percentuali:** ho estrapolato le percentuali di incidenti per settore dai rapporti trovati, concentrandomi su dati globali e specifici per gli Stati Uniti.
4. **Classificazione dei Settori:** Ho ordinato i settori in base ai settori in cui avvengono il maggior numero di esplosioni da polvere, ordinata in base alla numerosità di tali eventi, utilizzando le percentuali raccolte.

Questi dati sono ricavati da diversi archivi dati presenti in internet, ovvero : Dust Safety Science, OSHA - Combustible Dust: An Explosion Hazard e CSB - Combustible Dust Safety [38][39][40][41][42][43][44][45][46][47][48][49][50][51][52][53][54].

Questi dati coprono un periodo dal 1980 al 2023, con particolare attenzione agli incidenti segnalati negli ultimi anni. Di seguito riportiamo la classifica:

- a. **Industria agroalimentare (24.4%):** settore prevalente per gli incidenti, come quelli nei silos di cereali e nelle fabbriche di farina, dove la presenza di polvere organica è elevata;
- b. **Lavorazione del Legno e Segherie (20.2%):** le attività di taglio, levigatura e lavorazione del legno generano polvere di legno che può facilmente formare nubi combustibili.
- c. **Industria della lavorazione dei metalli (15.8%):** incidenti come l'esplosione di polvere di alluminio sono comuni a causa della lavorazione di metalli in forma di polveri fini che possono essere estremamente reattive;
- d. **Industria chimica e farmaceutica (12.6%):** coinvolge esplosioni in impianti dove si manipolano polveri fini di sostanze chimiche o farmaceutiche;
- e. **Industria della Plastica e della Gomma (10.3%):** la produzione e la lavorazione di materie plastiche e gomma creano polveri fini che possono esplodere.
- f. **Tessiture (8.7%):** la generazione di polveri fini da fibre e coloranti rappresenta un rischio elevato nel settore tessile.
- g. **Energia e Servizi Pubblici (7.4%):** le centrali elettriche, in particolare quelle a carbone, sono a rischio a causa della polvere di carbone.

Nel seguito ogni incidente verrà associato a ciascun settore industriale, e successivamente, per ognuno di essi, saranno illustrati e analizzati i casi che hanno avuto conseguenze catastrofiche maggiori.

AMBITO INDUSTRIALE	INCIDENTE
Industria agroalimentare	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Esplosione in un magazzino di farina a Torino</li> <li>- Mulini di farina di Tradeston a Glasgow</li> <li>- Esplosione nel silo di stoccaggio del grano a Stavanger</li> <li>- Esplosione nel silo di stoccaggio di farina di pesce sulla costa occidentale della Norvegia</li> <li>- Esplosione di polvere di grano (orzo/avena) in Norvegia</li> <li>- Esplosione nel silo di stoccaggio del grano a St. Joseph</li> <li>- Esplosione nel silo di esportazione del grano a Corpus Christi</li> <li>- Esplosione in un impianto di stoccaggio di cereali a Blaye</li> <li>- Esplosione in un Impianto di grano a Kansas City</li> <li>- Esplosione al Mulino Cordero di Fossano</li> <li>- Esplosione in un impianto di cereali a Rojas</li> </ul>
Industria della lavorazione dei metalli	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Esplosione in un impianto di macinazione da polvere di silicio a Bremanger</li> <li>- Esplosione in un impianto di produzione di polvere di alluminio a Awglesey</li> <li>- Esplosione in un'azienda di pulitura di caffettiere in alluminio a Gravelona Toce</li> </ul>
Industria chimica e farmaceutica	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Esplosione alla ditta farmaceutica Concept Sciences in Allentown, Pennsylvania</li> <li>- Esplosione nell'industria di produzione di sistemi antincendio alla Stars Engrg a Singapore</li> </ul>
Industria tessile	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Esplosione negli stabilimenti della Harbin Linen Textile Plant</li> <li>- Esplosione nell'industria tessile nello stabilimento della "Pettinatura Italiana" a Vigliano Biellese (BI)</li> </ul>

Questi collegamenti mostrano come diverse industrie siano vulnerabili a rischi specifici associati alle esplosioni di polvere e sottolineano l'importanza di misure di sicurezza adeguate in ciascuno di questi ambiti.

Di seguito sono illustrati studi di casi significativi, essenziali per comprendere il fenomeno in questione. Studiare gli eventi storici aiuta a distinguere gli scenari di rischio più credibili su cui concentrarsi. L'esperienza passata è fondamentale per guidare valutazioni accurate, rendendo la storia un insegnante prezioso nel contesto delle atmosfere esplosive.

## **2.1.1 Mulini di farina di Tradeston: Scozia ,1872**

### **2.1.1.1 Descrizione dell'incidente**

Il 9 luglio 1872, i mulini di farina di James Hodgson & Co. di Tradeston, situati a Glasgow, Scozia, furono teatro di un'esplosione devastante che risultò nella morte di 18 lavoratori e nel ferimento di altri sedici. L'incidente ebbe origine dall'attrito generato dalle macine operanti a secco, il quale incendiò la polvere di grano nell'atmosfera circostante. Tale polvere, una volta infiammata, fu successivamente aspirata in un collettore di scarico, innescando un'esplosione secondaria di maggiori proporzioni che distrusse l'intero edificio. [28][29]

### **2.1.1.2 Analisi**

L'inchiesta condotta evidenziò la necessità di sviluppare una norma che regolasse la gestione delle polveri e della manutenzione delle apparecchiature al fine di prevenire incidenti analoghi. La deflagrazione iniziale fu provocata dalle scintille generate dalle macine in funzione senza adeguata lubrificazione, che a loro volta accesero la polvere di grano sospesa nell'aria, la quale è stata spinta dalla deflagrazione nel collettore dove avvenne l'esplosione secondaria che devastò la struttura. Le indagini sottolinearono che le norme di sicurezza non furono adeguatamente osservate, in particolare riguardo la prevenzione dell'accumulo di polveri combustibili e la manutenzione degli impianti, elementi cruciali per evitare simili catastrofi.

Queste mancanze indicano la carenza di normative adeguate per la gestione della sicurezza nei contesti industriali di fine '800, evidenziando la mancanza di regolamenti sul controllo delle polveri e sulla manutenzione delle macchine.

## **2.1.2 Deposito per l'Esportazione di Cereali a Corpus Christi, Texas, 1981**

### **2.1.2.1 Descrizione dell'Incidente**

Nella tragica esplosione di un silo per lo stoccaggio di grano a Corpus Christi in Texas nell'aprile del 1981, nove persone persero la vita e trenta riportarono ferite. I danni materiali furono ingenti, quantificati in 30 milioni di dollari statunitensi. Si ipotizza che l'esplosione sia stata causata dalla presenza di grumi fumanti di sorgo, che, insieme al grano, furono introdotti in un elevatore a tazze. Questi grumi, nonostante le misure preventive, entrarono nell'elevatore durante lo scarico dal vagone ferroviario, innescando l'esplosione della nube di polvere accumulata. L'esplosione si propagò rapidamente agli altri elevatori e raggiunse il seminterrato principale attraverso il sistema di gestione della polvere, proseguendo nel tunnel che conduceva al complesso di silos in cemento. Nel percorso, l'onda di pressione accelerò, causando la rottura dei cappucci dei nastri trasportatori e liberando ulteriormente polvere. La fiamma incontrò quindi questa nuvola di polvere e generò una violenta combustione. L'esplosione risultante devastò diverse strutture, spostandosi attraverso il sistema di aspirazione della polvere e nei corridoi di trasporto, fino a raggiungere le aree di scarico e spedizione [18].

### 2.1.2.2 Analisi

La distruzione risultante è documentata nella Figura 16, che mostra il sito dell'esplosione immediatamente dopo l'evento, con il seminterrato del complesso di silos completamente demolito. Allo stesso modo, la Figura 17 illustra i danni nell'area di scarico ferroviario, dove i pannelli di copertura furono distrutti. Nonostante la manutenzione impeccabile della struttura di Corpus Christi, l'unica spiegazione plausibile per l'ampia diffusione dell'incendio rimane l'accumulo significativo di polvere nei sistemi di processo e di estrazione. Le indagini hanno evidenziato che, nonostante le misure preventive, i grumi fumanti di sorgo sono riusciti a entrare nel sistema, innescando una catena di eventi catastrofici. Questo incidente ha sottolineato l'importanza di una gestione rigorosa della polvere e di un monitoraggio costante delle condizioni operative per prevenire l'accumulo di polveri combustibili, dimostrando come anche strutture ben mantenute possano essere vulnerabili se non vengono adottate tutte le precauzioni necessarie.



*Figura 16 - Esplosione del silo per lo stoccaggio di grano a Corpus Christi*



*Figura 17 - Danni nell'area di scarico ferroviario*

## **2.1.3 Tessitura di lino di Harbin 1987**

### **2.1.3.1 Descrizione dell'Incidente**

L'esplosione catastrofica di polvere avvenuta nello stabilimento tessile di lino di Harbin nella Repubblica Popolare Cinese si è verificata il 15 marzo 1987, intorno alle 2:39 del mattino. Questo disastro è un esempio significativo dei pericoli industriali associati alla polvere nei contesti di produzione, in particolare nell'industria tessile. L'esplosione è stata principalmente causata dall'accensione di polvere infiammabile all'interno dello stabilimento. Le industrie tessili, come la fabbrica di lino di Harbin, generano particelle fini di fibre di tessuto, che possono diventare altamente combustibili quando sospese in aria in concentrazioni sufficienti. La fonte specifica di accensione nell'esplosione di Harbin pare essere stata una scintilla—possibilmente elettrostatica—o un piccolo incendio locale all'interno del sistema di raccolta della polvere. La sequenza dell'esplosione è stata descritta come una serie di nove esplosioni avvenute in circa otto secondi, evidenziando quanto rapidamente tali incidenti possano aumentare in ambienti con alte quantità di polvere combustibile. [1][30]

### **2.1.3.2 Analisi**

Secondo le analisi di Xu Bowen e Zhu Hailin nel 1988, è probabile che l'esplosione sia iniziata in una delle nove unità centrali di raccolta della polvere. La scintilla o il fuoco iniziale ha rapidamente incendiato l'aria circostante ricca di polvere, portando a una potente esplosione che si è rapidamente propagata attraverso le unità di raccolta della polvere interconnesse e successivamente in tutto l'area di produzione.

L'esplosione ha avuto effetti devastanti:

- Vittime: Dei 327 dipendenti al lavoro durante il turno notturno nella sezione di filatura, 58 sono stati uccisi e 177 feriti, sottolineando il grave tributo umano di tali disastri.
- Danni alle Infrastrutture: Circa 13.000 metri quadrati dell'area della fabbrica sono stati completamente demoliti, indicando l'estesa distruzione fisica causata dall'esplosione.
- Impatto Economico: La distruzione delle infrastrutture e la perdita di vite umane hanno inevitabilmente portato a significative ripercussioni economiche per la fabbrica tessile, influenzando la produttività e imponendo pesanti costi per la ricostruzione e il risarcimento.

L'esplosione di Harbin serve come tragico promemoria dell'importanza della gestione della polvere nei contesti industriali. Sottolinea la necessità di una ventilazione adeguata, di una pulizia regolare per rimuovere accumuli di polvere e dell'uso di sistemi adeguati di raccolta e soppressione della polvere per mitigare il rischio di esplosioni di polvere. Inoltre, questo evento sottolinea l'importanza dell'adozione di rigorosi protocolli di sicurezza, inclusi il monitoraggio delle potenziali fonti di accensione e la formazione dei dipendenti sulla consapevolezza dei pericoli e sulla risposta alle emergenze.

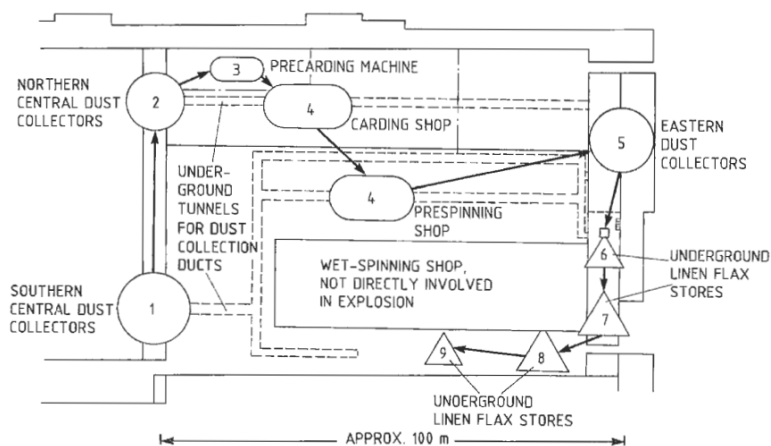


Figura 18 - Schema dell'incidente della Harbin Linen Textile.

## 2.1.4 SEMABLA impianto stoccaggio cereali: Francia,1997

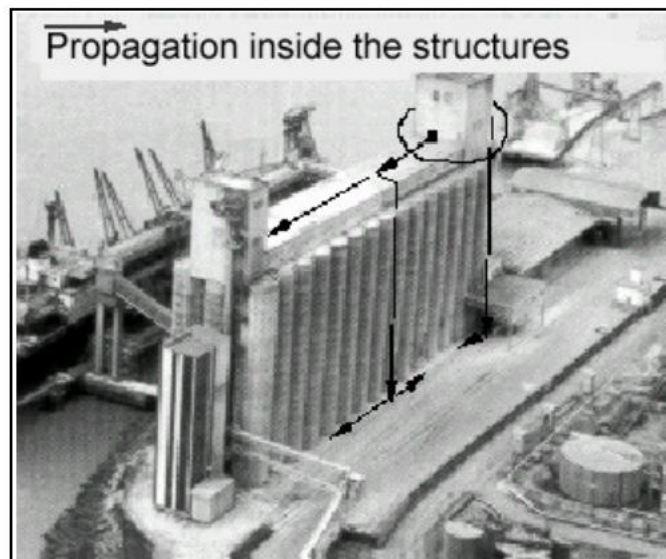
### 2.1.4.1 Descrizione dell'Incidente

Il 20 agosto 1997, un impianto di stoccaggio di cereali subì un'esplosione devastante che causò la morte di 11 persone, di cui sei erano impiegati negli uffici della struttura. Il deposito, di proprietà della Société d'Exploitation Marittima Blayaise (SEMABLA) e situato a Blaye, Francia, era composto da 44 celle cilindriche, ciascuna con un diametro di 6,2 metri e un'altezza di 36,5 metri, con una capacità complessiva di circa 37.000 tonnellate di grano, mais e orzo. Durante l'incidente, nessun lavoratore riuscì a mettersi in salvo a causa della rapidità e dell'intensità dell'esplosione, che disperse grossi frammenti di calcestruzzo fino a 140 metri di distanza[5].

### 2.1.4.2 Analisi

L'inchiesta ha esplorato diversi scenari che potrebbero aver contribuito alla formazione di atmosfere esplosive all'interno delle strutture, inclusa la produzione di gas infiammabili da autocombustione o fermentazione e la formazione di miscele esplosive di polveri e aria. L'analisi ha escluso la

formazione di gas infiammabili come causa e ha identificato come possibili fonti di innesco il surriscaldamento, l'elettricità statica, scintille elettriche e l'autocombustione dei materiali depositati. È stato poi determinato che il malfunzionamento di un ventilatore del sistema di raccolta centralizzata delle polveri, unito a una temperatura elevata locale, ha causato il surriscaldamento delle polveri, riducendo la loro energia di innesco e innescando l'esplosione. L'esplosione si è propagata attraverso il tunnel di caricamento e ha innescato ulteriori esplosioni secondarie alimentate dai depositi di polvere sui nastri trasportatori. Le fiamme hanno infine raggiunto le celle durante il caricamento, causando esplosioni che hanno portato al collasso delle strutture, che non erano equipaggiate con sistemi di sfogo per le esplosioni.



*Figura 19 – Propagazione interna dell'esplosione*



*Figura 20 - Post esplosione*



## **2.1.5 Azienda farmaceutica Concept Sciences ad Allentown, Pennsylvania, 1999**

### **2.1.5.1 Descrizione dell'Incidente**

L'esplosione presso l'azienda farmaceutica Concept Sciences ad Allentown, in Pennsylvania, nel 1999, è stata causata dall'accensione delle particelle di polvere combustibile nell'aria. L'accumulo di fini particelle di polvere provenienti dai prodotti farmaceutici, note per essere altamente combustibili in determinate condizioni, è stato il fattore scatenante. L'esplosione è avvenuta quando le particelle di polvere sono diventate sospese nell'aria e sono entrate in contatto con una sorgente di accensione, come una scintilla o il calore proveniente da attrezzature o macchinari. Una volta accesa, la nuvola di polvere ha propagato rapidamente l'esplosione in tutta l'azienda, causando danni estesi alla struttura, inclusi edifici, attrezzature e macchinari, e provocando gravi lesioni ai dipendenti, oltre a decessi [31].

### **2.1.5.2 Analisi**

Le indagini hanno determinato che la causa principale dell'esplosione era l'accumulo di particelle di polvere.

L'incidente è stato innescato da una sorgente di accensione, come una scintilla o calore da macchinari, che ha acceso la nuvola di polvere sospesa nell'aria. Le conseguenze dell'esplosione sono state significative, non solo per i danni materiali e umani, ma anche per l'impatto sull'industria farmaceutica nel suo complesso. A seguito dell'incidente, si sono intensificate le procedure e le misure operative adottate nelle strutture industriali per controllare e ridurre la quantità di polvere generata, accumulata e dispersa nell'ambiente di lavoro, introducendo nuove normative riguardanti la gestione delle polveri e le misure di sicurezza nelle strutture di produzione farmaceutica, al fine di prevenire futuri incidenti simili. Inoltre, Concept Sciences ha affrontato conseguenze legali e responsabilità finanziarie a seguito dell'esplosione. Nel complesso, l'incidente ha sottolineato l'importanza di protocolli di sicurezza adeguati e pratiche di gestione del rischio negli ambienti industriali che gestiscono materiali combustibili come la polvere farmaceutica.

## **2.1.6 Molino Cordero Fossano, 2007**

### **2.1.6.1 Descrizione dell'Incidente**

Il tragico evento verificatosi il 16 luglio 2007 presso il Molino Cordero di Fossano è stato causato principalmente da una miscela esplosiva di aria e farina, innescata da scariche elettrostatiche durante il trasferimento pneumatico della farina. Durante l'operazione, un'autocisterna, caricata oltre la sua capacità, stava scaricando l'eccesso di farina in un silos, momento in cui si è verificata un'esplosione, seguita da un secondo scoppio e un incendio che ha compromesso l'integrità strutturale dell'edificio principale. Cinque lavoratori, tra cui dipendenti del mulino e un autista, hanno perso la vita a causa delle ferite riportate [15][16].

## **2.1.6.2 Analisi**

Le indagini hanno rivelato che le cause dell'esplosione derivano da una serie di fattori critici: la mancanza di un adeguato collegamento a terra dell'autobotte, l'adozione di misure di sicurezza insufficienti per prevenire la formazione di atmosfere esplosive e la mancanza di manutenzione e pulizia adeguate degli impianti. Inoltre, è stato rilevato che il sistema di caricamento non si arrestava automaticamente al raggiungimento del limite prestabilito. Questo incidente avrebbe potuto essere evitato implementando misure di sicurezza più stringenti, quali l'installazione di sistemi per il rilevamento delle concentrazioni di farina e di dispositivi di spegnimento automatico, l'utilizzo di impianti elettrici dotati di protezioni idonee e la manutenzione regolare degli impianti per evitare accumuli di farina. L'infrastruttura del Molino Cordero è stata completamente distrutta e l'azienda ha dichiarato fallimento nel 2008. Il procedimento penale successivo ha portato alla condanna dei responsabili.

## **2.1.7 Pettinatura italiana ,2001**

### **2.1.7.1 Descrizione dell'Incidente**

Uno degli incidenti più catastrofici registrati nell'ambito dell'industria tessile in Italia si è verificato alle 17:50 del 9 gennaio 2001 presso lo stabilimento della "Pettinatura Italiana" di Vigliano Biellese (BI). Durante l'evento, tre lavoratori hanno perso la vita e altri otto hanno subito lesioni; inoltre, la struttura ha subito danni ingenti ed è attualmente in stato di abbandono. L'attività industriale prevedeva per conto terzi operazioni di lavaggio, cardatura e pettinatura della lana, circostanza che comportava la presenza di polvere di origine vegetale caratterizzata da una bassa temperatura di autoaccensione, circa 270 °C, sospesa nell'aria e accumulata in strati sulle superfici. Per eliminare gli accumuli di polvere, i locali erano dotati di un sistema di ventilazione forzata intensa. Tuttavia, questa potente ventilazione ha impedito di rilevare le minime tracce di fumo prodotte da una combustione lenta, probabilmente scatenata da un punto caldo localizzato nella sezione di stoccaggio delle lappole (materiale di scarto di origine vegetale) situata nel seminterrato. La combustione, inizialmente contenuta, si estese progressivamente a quantità maggiori di materiale, intensificando la produzione di fumo e provocando l'innesco dell'esplosione [20].

### **2.1.7.2 Analisi**

I residui di cardatura, composti da materiale vegetale e fibre di lana, erano stoccati nel seminterrato e distribuiti in diverse sezioni collegate tramite condotti di trasporto pneumatico. La combustione non più occultata dalla ventilazione forzata allertò due operai che tentarono di raggiungere i locali al piano inferiore per controllarne lo stato e sopprimere le fiamme. Prima che potessero intervenire, furono colpiti dal fronte di fiamma della deflagrazione primaria, riportando ustioni all'80% del corpo. L'onda di fiamma si propagò rapidamente negli ambienti circostanti, arricchendosi delle polveri depositate e sfogandosi all'esterno in una fiammata alta tra i 20 e i 30 metri e di breve durata (meno di 10 secondi, come riportato dai testimoni), dovuta all'esaurimento del materiale combustibile disponibile. Questo incidente ha evidenziato la necessità di rigorosi protocolli di sicurezza e sistemi di monitoraggio efficienti per prevenire accumuli di polvere combustibile e garantire una risposta tempestiva a eventuali focolai di incendio. La tragedia ha portato a una revisione delle normative di sicurezza nell'industria tessile e ha sottolineato l'importanza della manutenzione regolare e della formazione del personale per la gestione dei rischi associati alla polvere combustibile.

## 2.2 Analisi delle non conformità rispetto alle norme

La seguente analisi mira a identificare e dettagliare specifiche non conformità alle normative CEI 31-56: "Guida alla classificazione dei luoghi con pericolo di esplosione per la presenza di polveri combustibili in applicazione della Norma CEI EN 60079-10-2 e la NFPA 499: Recommended Practice for the Classification of Combustible Dusts and of Hazardous (Classified) Locations for Electrical Installations in Chemical Process Areas in relazione ai sette distinti incidenti causati da esplosioni di polveri precedentemente esposti. Questa analisi delle non conformità rispetto alle norme rappresenta un esercizio accademico. Le norme utilizzate, infatti, non sono applicabili nella maggior parte dei casi, sia perché non vigenti nel paese in cui si è verificato l'incidente, sia perché non si fa riferimento alla versione vigente all'epoca dell'incidente. Un esempio lampante è l'evento del 1800, quando la norma NFPA 499 non era ancora stata istituita.

Questi incidenti, avvenuti in diverse località geografiche e in vari settori industriali, mettono in luce criticità nel rispetto delle prescrizioni normative destinate a garantire la sicurezza degli impianti in presenza di polveri combustibili. L'analisi prende in esame le violazioni riscontrate sia in contesti regolati dalla norma europea CEI 31-56 che da quella americana NFPA 499, offrendo un confronto tra le misure di sicurezza adottate e quelle prescritte dalle norme, con l'obiettivo di evidenziare le carenze e i punti di miglioramento necessari per prevenire futuri incidenti di questa natura.

Segue una tabella dettagliata delle non conformità individuate per ciascun incidente, con un'attenzione particolare anche alle potenziali violazioni di normative non direttamente applicabili ma rilevanti per contesti simili.

<b>Evento Incidentale</b>	<b>Violazioni CEI 31-56</b>	<b>Violazioni NFPA 499</b>
Molino Cordero, Fossano (2007, Italia)	1. Controllo e Pulizia delle Polveri: carente controllo e pulizia delle polveri, essenziale per prevenire la formazione di atmosfere esplosive.	1. Gestione delle Aree Pericolose: gestione inappropriata delle aree pericolose, inclusa la mancata classificazione e gestione delle polveri combustibili.  2. Installazioni Elettriche Non Conformi: le installazioni elettriche non erano conformi ai requisiti per ambienti con polveri combustibili.
Pettinatura Italiana, Vigliano Biellese (2001, Italia)	1. Sistemi di Raccolta e Controllo delle Polveri Inefficaci: mancanza di sistemi efficaci per la raccolta e il controllo delle polveri di lana, che possono	1. Gestione Inadeguata delle Polveri: inadeguata gestione delle polveri e delle aree pericolose legate

	<p>formare atmosfere esplosive.</p> <p>2.Manutenzione Inadeguata: manutenzione inadeguata dei sistemi protettivi contro le atmosfere esplosive, aumentando il rischio di incidenti.</p>	<p>alla manipolazione di polveri combustibili.</p> <p>2.Precauzioni Contro le Fonti di Accensione: mancanza di precauzioni adeguate contro le fonti di accensione in aree dove le polveri sono manipolate.</p>
<p>Esplosione in un impianto di stoccaggio di cereali (1997, Francia)</p>	<p>1.Manutenzione delle Attrezzature: mancata manutenzione delle attrezzature, che ha contribuito alla formazione di condizioni pericolose.</p> <p>2.Controllo dei Livelli di Polvere: controllo inadeguato dei livelli di polvere che hanno facilitato le condizioni di innesco.</p>	<p>1.Installazioni Elettriche Non Conformi: sistemi elettrici non conformi per località pericolose, aumentando il rischio di scintille in presenza di polveri.</p> <p>2.Classificazione Inadeguata delle Aree: mancata classificazione adeguata delle aree che avrebbe potuto prevenire l'uso improprio di attrezzature elettriche in zone pericolose.</p>
<p>Terminale di grani, Corpus Christi (1981, Texas, USA)</p>	<p>1.Valutazione e Gestione Inadeguata: inadeguata valutazione e gestione degli ambienti con polveri combustibili.</p> <p>2.Impianto Elettrico Non Conforme: impianto elettrico non conforme, aumentando il rischio di scintille in presenza di polveri.</p>	<p>1.Gestione e Controllo delle Polveri: mancata gestione e controllo delle polveri combustibili.</p> <p>2.Sicurezza delle Installazioni: inadeguata sicurezza nelle installazioni, non garantendo la protezione contro le atmosfere esplosive.</p>
<p>Concept Sciences, Allentown (1999, Pennsylvania, USA)</p>	<p>1.Sistemi di Trattamento e Controllo delle Polveri Inadeguati: mancanza di sistemi adeguati per il trattamento e il controllo delle polveri.</p>	<p>1.Sistemi di Raccolta e Controllo delle Polveri Non Adeguati: sistemi di raccolta e controllo delle polveri non conformi, non</p>

	<p>2.Misure di Sicurezza Insufficienti: misure di sicurezza insufficienti per prevenire esplosioni di polvere.</p>	<p>prevenendo efficacemente le atmosfere esplosive.</p> <p>2.Protezione Inadeguata Contro le Atmosfere Esplosive: inadeguata protezione contro le atmosfere esplosive, mancando di garantire la sicurezza necessaria in ambienti a rischio.</p>
<p>Esplosione nella fabbrica di lino di Harbin (1987, Cina)</p>	<p>1.Gestione delle Polveri Combustibili: non è stata implementata una gestione adeguata delle polveri combustibili, essenziale per prevenire l'accumulo di polvere e la formazione di atmosfere esplosive.</p> <p>2.Sistemi di Ventilazione e Aspirazione: mancanza di un sistema di ventilazione adeguato per ridurre la concentrazione di polveri nell'ambiente di lavoro, fondamentale per evitare la creazione di atmosfere potenzialmente esplosive.</p>	<p>1.Identificazione e Controllo delle Fonti di Innesco: non è stata effettuata una corretta gestione delle fonti di innesco, inclusa l'identificazione e l'isolamento di possibili scintille o superfici calde che possono innescare un'esplosione.</p> <p>2.Classificazione delle Aree Pericolose: carenza nella classificazione delle aree in cui la presenza di polveri combustibili avrebbe richiesto particolari precauzioni per l'installazione e l'uso di apparecchiature elettriche.</p>
<p>Esplosione al mulino di farina a Glasgow, Scozia (1872)</p>	<p>1.Prevenzione dell'Accumulo di Polveri: assenza di misure efficaci per il controllo e la riduzione dell'accumulo di polveri di farina, le quali sono estremamente combustibili e possono facilmente creare un'atmosfera esplosiva.</p> <p>2.Manutenzione e Pulizia: inadeguata manutenzione</p>	<p>1.Sicurezza delle Installazioni Elettriche: le installazioni elettriche non erano conformi agli standard moderni per prevenire la generazione di scintille o il surriscaldamento in ambienti con presenza di polveri combustibili.</p> <p>2.Gestione e Identificazione del Rischio:</p>

	delle attrezzature e pulizia degli ambienti per eliminare gli accumuli di polvere, aumentando il rischio di esplosioni.	mancanza di un'adeguata valutazione del rischio legata alla presenza di polveri combustibili e alla loro interazione con le attrezzature elettriche e meccaniche.
--	---	---

Queste osservazioni specifiche dimostrano criticità nella gestione della sicurezza nelle industrie che manipolano polveri combustibili, sottolineando la necessità di rigorosa conformità a standard come CEI 31-56 e NFPA 499 per prevenire gravi incidenti.

## 2.2.1 Ulteriori analisi e considerazioni

La causa fondamentale di questi incidenti legati a esplosioni di polveri in vari ambienti industriali può essere ricondotta principalmente alla mancanza di una gestione efficace delle polveri combustibili, alla manutenzione inadeguata delle attrezzature e delle installazioni elettriche, nonché alla non corretta classificazione delle aree pericolose. Esaminando più in dettaglio:

- Molino Cordero, Fossano: la mancanza di adeguate installazioni elettriche sicure in atmosfere potenzialmente esplosive ha giocato un ruolo chiave. Questa mancanza evidenzia un punto non sufficientemente enfatizzato nelle normative, ovvero la necessità di verifiche e aggiornamenti costanti degli standard di sicurezza per le installazioni elettriche in ambienti con polveri combustibili.
- Pettinatura Italiana, Vigliano Biellese: la criticità maggiore che ha causato tale esplosione, era l'ignoranza, all'epoca, del fatto che le polveri di lana fossero esplosive. Oltre a questa criticità principale, in minoranza c'è anche il problema della mancata efficacia dei sistemi di raccolta delle polveri e la manutenzione inadeguata che mostrano un problema comune nella mancata implementazione delle raccomandazioni normative, che forniscono linee guida ma talvolta non entrano nel dettaglio operativo specifico necessario per alcuni ambienti industriali.
- Esplosione in un impianto di stoccaggio di cereali, Francia: L'inadeguato controllo dei livelli di polvere e la manutenzione deficitaria delle attrezzature suggeriscono che le norme potrebbero necessitare di specifiche più stringenti sulle procedure di manutenzione periodica e ispezione.
- Terminale di grani, Corpus Christi: La mancanza di una valutazione adeguata degli ambienti con polveri combustibili e di installazioni elettriche conformi solleva la questione se le normative siano abbastanza chiare e dettagliate nel prescrivere le metodologie di valutazione del rischio.
- Concept Sciences, Allentown: L'insufficienza delle misure di sicurezza per prevenire esplosioni di polvere evidenzia una possibile lacuna nelle normative riguardo alla

specificazione di standard di sicurezza per la progettazione e l'installazione di sistemi di controllo delle polveri in ambienti altamente sensibili.

- Tessitura di lino di Harbin: La mancanza di controllo efficace delle polveri e la ventilazione inadeguata mostrano che la formazione e la consapevolezza sul rischio di esplosioni di polveri potrebbero non essere adeguatamente trattate o enfatizzate nelle normative.
- Mulino di farina a Glasgow: Data la sua antichità, questo incidente prefigura l'importanza della modernizzazione e aggiornamento continuo delle norme tecniche per adattarsi alle nuove tecnologie e metodologie di prevenzione del rischio.

La ricorrenza di tali incidenti suggerisce che esiste una necessità critica di rafforzare gli aspetti delle normative CEI 31-56 e NFPA 499 riguardanti la formazione continua, le ispezioni regolari, e l'aggiornamento delle installazioni elettriche e dei sistemi di controllo delle polveri. Inoltre, molti di questi incidenti si sarebbero potuti evitare con una migliore formazione del personale sulla gestione del rischio di esplosione e sulla corretta manutenzione delle attrezzature. Un'altra considerazione importante è che, mentre le normative forniscono una struttura fondamentale, la loro applicazione pratica può a volte non essere sufficientemente rigorosa o dettagliata per affrontare tutte le specificità di ogni ambiente industriale.

## 3. Normative di riferimento

### 3.1 Introduzione

Nel contesto dell'analisi delle normative riguardanti la classificazione delle aree a rischio di esplosione, è opportuno intraprendere una disamina comparativa dei principali aspetti che caratterizzano le linee guida sviluppate dalle due eminenti organizzazioni, precedentemente descritte: l'International Electrotechnical Commission (IEC) e l'American National Standards Institute/National Fire Protection Association (ANSI/NFPA).

La copertura geografica delle normative costituisce un primo punto di distinzione rilevante: l'IEC si posiziona come un'entità di portata internazionale, le cui norme godono di un'ampia adozione su scala globale, riflettendo un approccio universalistico alla sicurezza. Al contrario, l'ANSI/NFPA, pur essendo maggiormente incentrata sul contesto statunitense, ha visto le proprie linee guida essere riconosciute e applicate anche al di fuori dei confini degli Stati Uniti, sebbene in maniera meno pervasiva.

Le esplosioni di polveri, come affermato più volte in questa tesi, costituiscono un rischio significativo negli ambienti industriali in presenza di sostanze altamente infiammabili o combustibili sotto forma di polvere fine. Le conseguenze di tali eventi possono essere gravi, comportando danni materiali, lesioni personali e persino perdite umane. Pertanto, è cruciale implementare misure preventive efficaci per ridurre il rischio di esplosioni di polveri.

La norma IEC 60079-10-2 fornisce linee guida dettagliate per la classificazione delle aree pericolose soggette a esplosioni di polveri.

La International Electrotechnical Commission (IEC) è un'organizzazione internazionale che sviluppa norme per le tecnologie elettriche, elettroniche e affini. Tali standard, adottati a livello mondiale, sono progettati per garantire la compatibilità e l'interoperabilità delle tecnologie elettriche ed elettroniche, fornendo requisiti tecnici e procedure di prova per garantirne la sicurezza, l'efficienza e l'affidabilità.

La Guida CEI 31-56 è stata sviluppata per fornire indicazioni sulla classificazione dei luoghi con pericolo di esplosione a causa della presenza di polveri combustibili. Questa guida offre una metodologia per valutare i rischi associati e per determinare le misure di sicurezza necessarie per prevenire incidenti in ambienti industriali e produttivi dove possono formarsi atmosfere esplosive. È importante notare che la Guida CEI 31-56 non è più in vigore, essendo stata sostituita da normative più recenti, come la CEI EN 60079-10-2. Tuttavia, i contenuti tecnici della guida possono ancora essere utilizzati come riferimento utile per le parti non in contrasto con le nuove normative, offrendo una base di conoscenza consolidata per la gestione dei rischi associati alle polveri combustibili. Questo documento fornisce indicazioni dettagliate sulle caratteristiche tecniche e le procedure da seguire per garantire la compatibilità e la sicurezza delle apparecchiature utilizzate in tali contesti. La NFPA 499 offre una guida specifica per valutare e gestire il rischio di esplosioni da polvere. Questo standard americano stabilisce i requisiti per l'analisi dei materiali, la valutazione del rischio e la pianificazione delle misure preventive e di emergenza per ridurre al minimo il potenziale di esplosioni da polvere e i danni ad esse associati. La NFPA pubblica la NFPA 499, una norma che fornisce linee guida per la classificazione delle polveri combustibili e dei luoghi pericolosi per le installazioni elettriche nelle aree di processo chimico, facilitando così la prevenzione del rischio di



esplosioni e garantendo la sicurezza degli impianti e delle persone.

Dopo aver esaminato le normative IEC 60079-10-2, GUIDA CEI 31-56 e NFPA 499, procederemo con un'analisi comparativa per individuare le differenze e le somiglianze tra di esse, al fine di identificare le migliori pratiche e sviluppare strategie efficaci per gestire il rischio di esplosioni da polvere.

In termini di approccio alla classificazione delle aree a rischio, entrambe le normative adottano metodologie simili, miranti a delineare con chiarezza le zone dove il rischio di esplosione è presente. Nonostante le definizioni e i metodi di classificazione possano presentare lievi variazioni, l'intento ultimo di assicurare la sicurezza rimane un denominatore comune inderogabile.

Quanto all'applicazione pratica delle norme, si riconosce frequentemente un'equivalenza tra le direttive dell'IEC e quelle dell'ANSI/NFPA, pur sottolineando l'importanza di aderire alle specificità normative vigenti nel luogo di operatività. Questo aspetto sottolinea la necessità di una verifica accurata delle regolamentazioni locali per assicurare una piena conformità.

Entrambe le organizzazioni si impegnano inoltre in un costante processo di aggiornamento delle proprie normative, al fine di incorporare le evoluzioni tecnologiche e elevare continuamente gli standard di sicurezza. Tale impegno dimostra la consapevolezza dell'importanza di mantenere le linee guida all'avanguardia, per rispondere efficacemente alle sfide emergenti nel campo della sicurezza industriale e della prevenzione dei rischi in atmosfere potenzialmente esplosive. In conclusione, le norme IEC e ANSI/NFPA, pur emergendo da contesti e prospettive differenti, condividono l'obiettivo fondamentale di promuovere la sicurezza in ambienti industriali a rischio di esplosione. Sebbene vi possano essere specificità e dettagli implementativi diversi, la loro analisi comparativa evidenzia una sostanziale convergenza verso principi comuni di precauzione e protezione. È, dunque, imperativo, per gli operatori del settore, consultare attentamente le normative applicabili e avvalersi dell'expertise di professionisti qualificati nel campo della sicurezza industriale, per garantire la massima sicurezza e conformità normativa.

## **3.2 Analisi comparativa**

Le normative IEC e ANSI/NFPA condividono l'obiettivo fondamentale di garantire la sicurezza negli ambienti a rischio di esplosione, attraverso la definizione di criteri per la classificazione delle aree pericolose e l'impiego sicuro di apparecchiature elettriche in tali contesti. Entrambe adottano un sistema di classificazione zonale basato sulla probabilità di occorrenza di atmosfere esplosive, distinguendo le zone 0, 1 e 2 per gas e vapori, e le zone 20, 21 e 22 per polveri, le quali sono definite successivamente nel paragrafo 3.3.1.2, mentre la norma americana utilizza un sistema di classificazione per divisioni, come vedremo nel paragrafo 3.3.3.1.2.

Le metodologie di classificazione proposte da entrambe le normative enfatizzano l'analisi della frequenza e della durata della presenza di atmosfere esplosive, e sottolineano l'importanza del monitoraggio continuo e dell'implementazione di misure di protezione per prevenire incidenti. Questo approccio comune riflette una visione condivisa sulla necessità di un attento controllo delle aree a rischio e sull'uso di dispositivi e sistemi di sicurezza adeguati per mantenere elevati standard di protezione nei luoghi di lavoro.

Tuttavia, emergono differenze significative nell'applicazione e nell'interpretazione delle due norme, attribuibili principalmente al contesto geografico di riferimento e alle specificità tecniche. Come accennato nell'introduzione precedente, mentre la norma IEC è adottata su scala internazionale, ANSI/NFPA trova prevalente applicazione negli Stati Uniti, il che può portare a

divergenze nell'applicazione delle norme in diverse regioni. Le definizioni e i requisiti tecnici dettagliati, come le specifiche per le apparecchiature elettriche, variano, introducendo potenziali sfide nell'armonizzazione degli standard di sicurezza. Inoltre, i cicli di aggiornamento normativo differiscono tra IEC e ANSI/NFPA, influenzando la rapidità con cui vengono integrate nuove tecnologie o affrontate emergenti sfide di sicurezza. Queste divergenze sottolineano l'importanza di una valutazione accurata delle normative specifiche applicabili in ciascun contesto, per assicurare la conformità alle migliori pratiche di sicurezza e prevenzione degli incidenti.

### **3.2.1 Campo di applicabilità**

Inizialmente, si procederà con un esame comparativo dei campi di applicazione delle normative IEC 60079-10-2, della guida CEI 31-56 e della NFPA 499, al fine di delineare le loro specificità, ambiti di impiego e le direttive fornite per la sicurezza in ambienti soggetti a rischio di esplosione a causa di polveri combustibili.

La norma IEC 60079-10-2 si rivolge specificatamente a contesti in cui è presente il rischio di atmosfere esplosive causate da polveri o strati di polvere combustibile, operando in condizioni atmosferiche standard. Questa norma si distingue per un approccio metodico nella classificazione delle aree pericolose, basato su una serie di parametri che includono la combustibilità della polvere e le proprietà dei materiali presenti, richiedendo talvolta verifiche attraverso prove di laboratorio o dati derivanti da fonti esterne.

D'altro canto, la guida CEI 31-56 trova applicazione nei luoghi industriali ove si manifesta il pericolo di esplosioni dovute a miscele di polveri combustibili e aria, estendendo la sua validità a contesti non specificamente regolamentati da norme tecniche armonizzate. Tuttavia, esclude esplicitamente situazioni quali le miniere sotterranee, ambienti con rischi esclusivamente legati a gas o vapori infiammabili e circostanze conseguenti a guasti catastrofici che eccedono le situazioni di anormalità considerate.

La NFPA 499, invece, si concentra sul fornire linee guida per la classificazione delle polveri combustibili e dei luoghi pericolosi (classificati) per le installazioni elettriche nelle aree di processo chimico. Questa norma è progettata per aiutare nella selezione di sistemi e apparecchiature elettriche sicure da utilizzare in ambienti classificati come Classe II, dove sono presenti polveri combustibili, in accordo con gli standard imposti dalla National Electrical Code (NEC), chiamata anche NFPA 70, ovvero la norma che stabilisce i requisiti per l'installazione sicura degli impianti elettrici negli edifici residenziali, commerciali e industriali negli Stati Uniti, mirando a un'ampia comprensione dei criteri che definiscono l'estensione e il livello di pericolo delle aree classificate. La sua applicabilità è indirizzata verso ambienti in cui si gestiscono sostanze combustibili in forma di polvere, ponendo attenzione alla scelta di attrezzature elettriche che possano prevenire l'insorgere di potenziali esplosioni.

Analizzando i loro campi di applicabilità, emerge che, benché tutte e tre le normative abbiano come obiettivo la sicurezza in ambienti a rischio di esplosione per la presenza di polveri combustibili, differiscono significativamente nell'ambito di applicazione e nelle specificità dei requisiti. La IEC 60079-10-2 e la NFPA 499 condividono un approccio focalizzato sulla classificazione delle aree e sulla sicurezza delle apparecchiature elettriche, mentre la CEI 31-56 estende la sua applicabilità a un contesto più ampio di attività industriali, pur escludendo specifici ambienti e situazioni di rischio.

Queste differenze sottolineano l'importanza di selezionare la norma più adeguata in base al contesto operativo specifico, garantendo la massima sicurezza possibile in ambienti a rischio [2][3][4].

Tabella 10 - Comparazione dei campi di applicazione delle normative

<b>Caratteristica</b>	<b>IEC 60079-10-2</b>	<b>CEI 31-56</b>	<b>NFPA 499</b>
Campo di applicazione	Atmosfere esplosive causate da polveri o strati di polvere combustibile in condizioni atmosferiche standard	Luoghi industriali con pericolo di esplosioni da miscele di polveri combustibili e aria, esclusi miniere sotterranee e ambienti con rischi da gas o vapori	Aree pericolose per la selezione di attrezzature elettriche in conformità con NFPA 70
Direttive per la sicurezza	Approccio metodico con verifica attraverso prove di laboratorio o dati esterni	Applicazione in contesti non regolamentati da norme tecniche armonizzate, esclusione di miniere sotterranee e ambienti con rischi da gas o vapori	Criteri per la scelta di attrezzature elettriche per prevenire inneschi di esplosioni
Specificità	Parametri includono combustibilità della polvere e proprietà dei materiali presenti	Esclusione di miniere sotterranee, rischi da gas o vapori e guasti catastrofici	Ampia comprensione dei criteri di estensione e livello di pericolo delle aree classificate

### 3.2.2 Misure tecniche per la prevenzione e la protezione contro le esplosioni

In questo paragrafo, invece, analizziamo le misure tecniche indicate in ciascuna norma per poi confrontarle.

I sistemi di prevenzione delle esplosioni devono essere concepiti affinché operino in modo autonomo rispetto ai sistemi di monitoraggio e controllo del processo, assicurando una sicurezza intrinseca (fail-safe).

La norma IEC 60079-10-2 enfatizza l'importanza di precludere la formazione di atmosfere potenzialmente esplosive e di eliminare le fonti di innesco attive. È essenziale definire i parametri relativi alle potenziali fonti di innesco, specificando sia i valori operativi standard che quelli critici, prevedendo allarmi o disattivazioni automatiche in caso di superamento di tali valori. Si raccomanda la sostituzione di sostanze infiammabili con alternative meno pericolose e il controllo delle concentrazioni di sostanze pericolose. L'inertizzazione, benché onerosa, può essere impiegata per le

miscele esplosive aria/polveri, attraverso l'uso di polveri inerti compatibili. Una gestione diligente degli impianti, che comprenda una manutenzione appropriata e un approvvigionamento sicuro dei materiali, è fondamentale per minimizzare il rischio di esplosione. Per le polveri, è essenziale evitare accumuli che possano generare atmosfere esplosive. Tecniche di bonifica, quali l'aspirazione dell'aria, la rimozione delle polveri dalle singole fonti, il contenimento in depressione e l'eliminazione degli strati di polvere, pur efficaci, richiedono una progettazione attenta.

In merito alla CEI 31-56, questa distingue tra misure preventive, finalizzate all'eliminazione delle condizioni favorevoli alla formazione di miscele esplosive e delle potenziali cause di innesco, e misure di protezione, intese a limitare gli effetti delle esplosioni.

Nella guida, è sottolineata l'importanza di garantire un livello di sicurezza equivalente almeno pari a 3 per i dispositivi di protezione contro le esplosioni, mediante l'utilizzo di sistemi indipendenti da cause comuni di fallimento.

La NFPA 499 implementa una varietà di misure tecniche per prevenire e proteggere dalle esplosioni causate da polveri combustibili, al fine di ridurre il rischio di esplosioni e assicurare la sicurezza negli ambienti industriali. Queste misure affrontano diversi aspetti, dalla valutazione della pericolosità delle polveri alla progettazione sicura delle installazioni elettriche, e includono dettagliate indicazioni sui criteri di accensione, sull'importanza di conoscere le temperature di accensione e sui test di combustibilità ed esplosività [2][3][4].

Tabella 11 - Comparazione normativa tecniche di prevenzione e di protezione

<b>Caratteristica</b>	<b>IEC 60079-10-2</b>	<b>CEI 31-56</b>	<b>NFPA 499</b>
Sistema di prevenzione	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Classificazione delle Zone;</li> <li>- Mantenimento della pulizia;</li> <li>- Documentazione;</li> <li>- Gestione delle sorgenti di emissione</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Classificazione delle zone ;</li> <li>- Mantenimento della pulizia;</li> <li>- Dispositivi di sicurezza;</li> <li>- Formazione e addestramento del personale e procedure operative</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Classificazione delle zone ;</li> <li>- Mantenimento della pulizia;</li> <li>- sistemi di ventilazione;</li> <li>- Tecnica di protezione: Pressurizzazione;</li> <li>- Test di combustibilità e esplosività;</li> <li>- Formazione e addestramento del personale e procedure operative</li> </ul>
Inertizzazione	Uso di polveri inerti compatibili per miscele esplosive aria/polveri	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Aumento della grandezza delle particelle (es. maggiore di 500 µm).</li> <li>- Impiego di prodotti pastosi in sostituzione delle polveri.</li> <li>- Umidificazione delle polveri, se la sostanza lo tollera. L'umidificazione</li> </ul>	N/A

		<p>riduce la possibilità di sollevamento della polvere nell'aria e la formazione di un'atmosfera esplosiva, anche se rimane il pericolo d'incendio dello strato</p>	
Tecniche di bonifica	<p>Asportazione Continua delle Polveri:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• I sistemi di ricambio dell'aria sono previsti per proteggere le persone dalle polveri disperse nell'aria. Essi possono prevenire la formazione di strati di polvere dovuti a piccole emissioni continue se correttamente dimensionati e attivi durante il funzionamento normale</li> <li>• È necessario prestare particolare attenzione ai filtri, ai punti di raccolta delle polveri e ai punti di scarico del sistema di asportazione</li> <li>• La velocità dell'aria deve essere contenuta entro valori accettabili stabiliti dalle norme o dalle disposizioni legislative per il benessere delle persone (entro 0,1</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Asportazione continua delle polveri combustibili disperse nell'aria con sistemi di ricambio dell'aria ambiente.</li> <li>• Asportazione delle polveri combustibili emesse da singole sorgenti di emissione (SE).</li> <li>• Contenimento in depressione delle polveri combustibili.</li> <li>• Rimozione degli strati di polveri combustibili presenti nell'ambiente.</li> <li>• Inertizzazione dell'atmosfera dell'ambiente (un locale o un contenitore).</li> <li>• Inertizzazione delle polveri combustibili.</li> <li>• Pressurizzazione dei locali o edifici</li> </ul>	N/A

	m/s a 15°C e fino a 0,3 m/s a 25°C)		
--	-------------------------------------	--	--

### 3.2.3 Mantenimento della pulizia

La probabilità che uno strato provochi un incendio può essere controllata da una scelta corretta dell'apparecchiatura e da un efficace mantenimento della pulizia.

#### 3.2.3.1 Livelli di efficacia dei provvedimenti di pulizia

##### 3.2.3.1.1 60079-10-2

La norma 60079-10-2 stabilisce che la frequenza della pulizia non è sufficiente per determinare se uno strato di polvere costituisce un rischio. La portata di deposito della polvere e l'efficacia della pulizia stessa sono elementi cruciali. Un'emissione di secondo grado con un'elevata portata di deposito può creare uno strato pericoloso molto più rapidamente rispetto a un'emissione di primo grado con una portata di deposito inferiore. Pertanto, la presenza e la durata di uno strato di polvere dipendono dal grado di emissione della polvere, dalla portata di deposito e dall'efficacia della pulizia. La norma descrive tre livelli di mantenimento della pulizia:

- **Buono:** Gli strati di polvere sono mantenuti a spessori trascurabili o inesistenti, indipendentemente dal grado di emissione. Questo livello elimina il rischio di nubi esplosive e incendi.
- **Adeguato:** Gli strati di polvere non sono trascurabili, ma sono di breve durata (tipicamente meno di un turno di lavoro). La polvere è rimossa prima che possa causare incendi, riducendo i rischi associati.
- **Scarso:** Gli strati di polvere non sono trascurabili e persistono per un periodo di tempo lungo (tipicamente più di un turno di lavoro). Questo livello presenta un rischio significativo di incendio ed esplosione secondaria.

Un mantenimento della pulizia scarso, combinato con condizioni che possono creare una nube di polvere da uno strato, dovrebbe essere evitato. La classificazione dei luoghi pericolosi deve considerare qualsiasi condizione che possa creare una nube di polvere, come l'ingresso di persone in un locale [3].

##### 3.2.3.1.2 CEI 31-56

L'efficacia delle misure di pulizia degli ambienti si valuta in base al livello di mantenimento della pulizia. Sono individuati tre livelli di mantenimento della pulizia:

- **Buono:** La polvere è mantenuta a livelli trascurabili o assente, indipendentemente dalle emissioni, oppure è rimossa rapidamente se si forma raramente. Questo livello elimina il rischio di nubi di polveri esplosive e di incendi causati dagli strati di polvere.
- **Adeguato:** La polvere è presente in strati non trascurabili ma di breve durata, inferiore a un turno di lavoro di circa 8 ore. La polvere può essere rimossa prima dell'inizio di qualsiasi incendio, considerando la stabilità termica della polvere e la temperatura superficiale del prodotto.
- **Scarso:** La polvere è presente in strati non trascurabili e persiste oltre un turno di lavoro. Il rischio di incendio può essere controllato selezionando le apparecchiature in base allo spessore degli strati di polvere, definito caso per caso. In questo livello, il rischio di esplosioni e incendi non è escluso.

Per stabilire criteri efficaci di rimozione della polvere e definire il livello di efficacia delle misure di pulizia, il datore di lavoro deve adottare procedure scritte parte delle disposizioni aziendali relative alla manipolazione di sostanze infiammabili e polveri combustibili. La pulizia, oltre a garantire l'igiene, deve assicurare la sicurezza contro incendi ed esplosioni, interessando pavimenti e superfici dove si accumula polvere, incluse le superfici difficilmente visibili o accessibili.

Le procedure di pulizia devono essere note agli incaricati, siano essi dipendenti o esterni. Per prevenire esplosioni o incendi, si raccomanda l'uso di sistemi di aspirazione centralizzati o aspiratori industriali mobili senza fonti di accensione, conformi alle specifiche di sicurezza (almeno Gruppo II, Categoria 2D).

Il piano di mantenimento della pulizia degli ambienti deve indicare gli ambienti a rischio di polvere e quelli che non lo sono, considerando l'efficacia delle misure di pulizia da raggiungere. È preferibile un piano che garantisca un livello di mantenimento buono, per escludere il rischio di esplosioni e incendi.

Il piano deve tenere conto della diversa velocità e frequenza di accumulo della polvere, stabilendo modalità e periodicità di pulizia specifiche. Le modalità di pulizia devono considerare la sicurezza del personale, la peculiarità degli ambienti e le attrezzature presenti.

Il piano deve includere una tabella per raccogliere informazioni sulla pulizia periodica e prevedere interventi tempestivi in caso di guasti o rotture che causino emissioni di polvere. Deve indicare il personale incaricato, le modalità e i mezzi di intervento.

Tabella 12 - Esempio di tabella per la definizione e la raccolta delle informazioni riguardanti la pulizia periodica

Reparto	Zona	Frequenza	Periodo	Operazioni	Mezzi e/o attrezzi utilizzati	Sostanze utilizzate	Personale incaricato	Livello di mantenimento della pulizia

Il datore di lavoro, inoltre, è responsabile dell'applicazione delle procedure di pulizia e della sicurezza del personale incaricato. Deve definire un responsabile, garantire la formazione del personale, fornire mezzi e attrezzi adeguati e stabilire il piano di pulizia. In caso di coinvolgimento di imprese esterne, il datore di lavoro deve selezionare l'impresa appropriata, verificare il rispetto delle procedure e garantire la formazione del personale esterno.[2]

### 3.2.3.1.3 NFPA 499

Come per le norme descritte precedentemente, anche la NFPA 499 evidenzia l'importanza di una manutenzione regolare e sistematica per prevenire condizioni che possano favorire esplosioni da polvere combustibile, in quanto come ampiamente affermato diverse volte nell'attuale tesi una buona gestione della pulizia è essenziale in tutte le aree dove si maneggia la polvere per prevenire accumuli pericolosi che potrebbero causare esplosioni.

La frequenza e l'efficacia della pulizia influenzano la presenza e il controllo degli accumuli di polvere, per cui procedure di pulizia regolari e sistematiche sono fondamentali per mantenere le aree sicure.

Inoltre, le apparecchiature devono essere progettate in modo da impedire l'accumulo di polvere e da contenere eventuali scintille o fonti di calore che potrebbero causare ignizioni. Di seguito riportiamo le tabelle che forniscono linee guida sulla frequenza necessaria e le azioni per la pulizia in diverse classificazioni di aree per prevenire l'accumulo di polvere e i potenziali pericoli di esplosione.

Tabella 13 - Linee guida sulla frequenza necessaria per la pulizia nelle diverse divisioni di aree per prevenire l'accumulo di polvere e i potenziali pericoli di esplosione.

Depth of Dust Accumulation on Equipment (1)	Area Classification (2)	Release Frequency (3)	Housekeeping Activity (4)
Negligible, up to <1 mm (1/32 in.) Up to 3 mm (1/8 in.)	Unclassified Class II, Division 2	Infrequent Infrequent	Clean as appropriate Clean as necessary to maintain less than 3 mm (1/8 in.)
Up to 3 mm (1/8 in.) or occasional cloud formation	Class II, Division 1 or Class II, Division 2	Occasional	Clean at frequency appropriate to minimize additional dust accumulations or formation of a cloud
>3 mm (1/8 in.) to layer test value, or presence of dust cloud	Class II, Division 1	Continuous/ frequently	Clean at frequency appropriate to minimize additional dust accumulations
Exceeds layer test value, or presence of extensive dust cloud	Class II, Division 1	Infrequent	Immediately shut down and clean equipment

La tabella 13 tratta dalla norma NFPA 499 fornisce raccomandazioni per la frequenza di pulizia basata sullo spessore dell'accumulo di polvere sull'attrezzatura e sulla classificazione dell'area. Dalla tabella 13 si evince che un accumulo di polvere sull'attrezzatura:

- fino a <1 mm (1/32 pollice) è trascurabile, non è classificata come area, per cui non segue delle indicazioni precise sulla frequenza e sul come gestire la pulizia dell'area;
- fino a 3 mm (1/8 pollice) è trascurabile, l'area è classificata come Classe II, Divisione 2, non segue delle indicazioni precise sulla frequenza e risulta opportuno pulire secondo necessità per mantenere meno di 3 mm di spessore;
- fino a 3 mm (1/8 pollice) o formazione occasionale di nuvole, l'area è classificata come Classe II, Divisione 1 o 2, la frequenza di rilascio è occasionale ed è consigliabile pulire frequentemente per ridurre al minimo ulteriori accumuli di polvere o la formazione di una nuvola;
- Superiore a 3 mm (1/8 pollice) fino al valore del test di stratificazione, o presenza di nuvola di polvere la classificazione dell'Area è Classe II, Divisione 1 con frequenza di Rilascio: Continuo / Frequente e risulta consigliabile pulire frequentemente per ridurre al minimo ulteriori accumuli di polvere
- Superiore al valore del test di stratificazione, o presenza di estesa nuvola di polvere la classificazione dell'Area è Classe II, Divisione 1, mentre la frequenza di Rilascio risulta essere Rara e l'attività di pulizia prevede di chiudere immediatamente e pulire l'attrezzatura.



Tabella 14 - Linee guida sulla frequenza necessaria per la pulizia in diverse classificazioni di aree per prevenire l'accumulo di polvere e i potenziali pericoli di esplosione.

Table A.6.7(b) Class II Division Recommended Frequency of Housekeeping for Zones

Depth of Dust Accumulation on Equipment (1)	Area Classification (2)	Release Frequency (3)	Housekeeping Activity (4)
Negligible, up to <1 mm ( $\frac{1}{32}$ in.) Up to 3 mm ( $\frac{1}{8}$ in.)	Unclassified Zone 22	Infrequent Infrequent	Clean as appropriate Clean as necessary to maintain less than 3 mm ( $\frac{1}{8}$ in.)
Up to 3 mm ( $\frac{1}{8}$ in.) or occasional cloud formation	Zone 21 or Zone 22	Occasional	Clean at frequency appropriate to minimize additional dust accumulations or formation of a cloud
>3 mm ( $\frac{1}{8}$ in.) to layer test value, or presence of dust cloud	Zone 20 or Zone 21	Continuous/ frequently	Clean at frequency appropriate to minimize additional dust accumulations
Exceeds layer test value, or presence of extensive dust cloud	Zone 20	Infrequent	Immediately shut down and clean equipment

In questa tabella, invece, si fanno le medesime considerazioni della precedente, facendo corrispondere alla classificazione per Divisioni, la corrispettiva zona usata nella normativa europea [4].

### 3.2.3.1.3.1 Confronto critico tra gli ordini di grandezza degli spessori secondo la CEI 31-56 e la NFPA 499

In questo paragrafo verrà effettuato un confronto degli ordini di grandezza ricavati dalla Guida CEI 31-56, in funzione dei calcoli sviluppati nel capitolo 1.6.2 della tesi e della tabella NFPA 499 sopra citata.

Confrontando questi valori con le raccomandazioni della NFPA 499, si osserva che:

- **Spessori fino a 1 mm:** Secondo la NFPA, tali accumuli sono trascurabili e non classificati; pertanto, non richiedono misure di pulizia specifiche. Tuttavia, i calcoli mostrano che anche spessori minori, ( es. 0,27 mm per l'alluminio), possono essere critici in determinate condizioni, suggerendo che anche piccoli accumuli debbano essere monitorati attentamente.
- **Spessori fino a 3 mm:** La NFPA classifica queste aree come Classe II, Divisione 2, suggerendo una pulizia necessaria per mantenere lo spessore sotto i 3 mm. Gli esempi CEI indicano spessori critici più bassi per polveri come il grano (0.5 mm) e la cellulosa (0.75 mm), suggerendo che la frequenza di pulizia potrebbe dover essere aumentata rispetto alle raccomandazioni NFPA.
- **Spessori oltre 3 mm:** Classificati come Classe II, Divisione 1, richiedono pulizie frequenti per ridurre ulteriori accumuli di polvere o la formazione di nuvole. Gli esempi CEI indicano che polveri come il cotone con spessore critico di 9 mm necessiterebbero un'attenzione ancora più alta e procedure di gestione dei rischi molto rigorose. I calcoli mostrano che per alcuni materiali, gli spessori critici sono già molto più bassi di 3 mm, evidenziando la necessità di una gestione ancora più rigorosa.

Questa analisi evidenzia che, mentre la NFPA 499 fornisce linee guida utili, i risultati dei calcoli specifici per vari materiali indicano che anche spessori di polvere relativamente bassi possono essere

pericolosi e richiedere una gestione più stringente di quanto suggerito. È essenziale considerare le specificità del materiale e le condizioni operative nel piano di gestione della polvere per prevenire rischi di esplosione e incendi.

Analizziamo, ora, come ciascun materiale considerato nei calcoli del paragrafo 1.6.2 verrebbe gestito se dovesse seguire le raccomandazioni della NFPA 499:

- **Farina di Frumento:**

Spessore critico calcolato: 0.68 mm

Gestione secondo NFPA 499: Accumulo inferiore a 1 mm è considerato trascurabile. Quindi, in un contesto in cui lo spessore di polvere di farina è inferiore a 1 mm, non sarebbero necessarie azioni specifiche. La pulizia seguirebbe una routine regolare senza necessità di interventi immediati.

- **Grano:**

Spessore critico calcolato: 0.5 mm

Gestione secondo NFPA 499: Anche per il grano, uno spessore critico di 0.5 mm rientra nella categoria trascurabile (<1 mm). La pulizia sarebbe effettuata secondo una normale routine di manutenzione senza interventi specifici frequenti.

- **Alluminio:**

Spessore critico calcolato: 0.27 mm

Gestione secondo NFPA 499: Con uno spessore critico di 0.27 mm, che è inferiore a 1 mm, la polvere di alluminio sarebbe considerata trascurabile. Tuttavia, data l'alta densità e potenziale pericolosità, potrebbe essere prudente effettuare pulizie regolari anche se non strettamente richiesto dalla NFPA 499.

- **Cellulosa:**

Spessore critico calcolato: 0.75 mm

Gestione secondo NFPA 499: Con uno spessore di 0.75 mm, la polvere di cellulosa sarebbe trascurabile secondo la NFPA 499. La gestione includerebbe pulizie di routine senza indicazioni precise di frequenza aumentata.

- **Legno:**

Spessore critico calcolato: 0.8 mm

Gestione secondo NFPA 499: Anche il legno, con uno spessore critico di 0.8 mm, rientra nella categoria trascurabile. La pulizia seguirebbe il normale ciclo di manutenzione senza necessità di interventi frequenti specifici.

- **Cotone:**

Spessore critico calcolato: 9 mm

Gestione secondo NFPA 499: Questo spessore supera di gran lunga il limite di 3 mm. Secondo la NFPA 499, uno spessore superiore a 3 mm classifica l'area come Classe II, Divisione 1. La gestione richiederebbe pulizia frequente per ridurre al minimo ulteriori accumuli di polvere e prevenire la formazione di nuvole di polvere.

In sintesi, l'analisi comparativa tra la norma NFPA 499 e i calcoli della norma Guida CEI 31-56 evidenzia l'importanza di un approccio prudente e proattivo nella gestione degli accumuli di polvere negli ambienti industriali. Sebbene la NFPA 499 consideri trascurabili gli spessori di polvere inferiori a 1 mm, è essenziale adottare misure di pulizia regolari e frequenti per materiali con spessori critici bassi, garantendo così un ambiente di lavoro sicuro e minimizzando i rischi di esplosioni secondarie.

### 3.2.3.1.3.2 Confronto tra la Norma CEI 31-56 e la NFPA 499 sulla Gestione del Rischio di Esplosione da Polveri

Secondo la NFPA 499, uno spessore di polvere inferiore a 1 mm non è considerato pericoloso, il che differisce significativamente dalla CEI 31-56, dove spessori di polvere molto inferiori sono considerati critici, come in questo caso per la farina di grano e l'alluminio. Va considerato, però, che la NFPA, per strati di polvere inferiori a 1 mm, classifica l'area come non classificata, per cui non segue delle indicazioni precise. Se riconsiderassimo entrambe le polveri, sia di farina di grano che di polvere di alluminio, con i medesimi parametri, in un'area confinata possiamo fare delle considerazioni riguardo la concentrazione effettiva della polvere in aria in funzione della zona di infiammabilità. Iniziamo quindi con i soliti esempi della farina di grano e di alluminio dove, ipotizzando di avere uno strato di polvere pari a 1 mm, andiamo a calcolare la concentrazione effettiva della polvere per poi confrontarla con il LEL.

#### ESEMPIO PRATICO:

#### FARINA DI GRANO:

Dati forniti:

- Densità apparente ( $\rho_{app}$ ): 730 kg/m<sup>3</sup>
- Spessore dello strato di polvere (s): 1 mm = 1 x 10<sup>-3</sup> m
- Volume della zona (V): 100 m<sup>3</sup>
- Area della zona (A): 30 m<sup>2</sup>

Prima di tutto, per facilitare i calcoli consideriamo una variabile di appoggio pari a H:

$$H = \frac{V_{polvere}}{A} = 3.33\text{m}$$

Partendo dall'equazione 3, usata per trovare lo spessore dello strato di polvere, che in questo caso ipotizziamo essere 1 mm, attraverso la formula inversa ricaviamo la concentrazione effettiva in aria di polvere (X):

$$s = \frac{X \cdot H}{\rho_{app}}$$

$$X = \frac{s \cdot \rho_{app}}{H}$$

Sostituendo i valori:

$$X = \frac{1 \times 10^{-3} \text{ m} \times 730 \text{ kg/m}^3}{3.33 \text{ m}} = 0.219 \text{ kg/m}^3 = 219.21 \text{ g/m}^3$$

Il Limite Inferiore di Esplosibilità (LEL) della farina di grano per i dati forniti è 51g/m<sup>3</sup>, il quale risulta minore della concentrazione effettiva in aria appena calcolata. Questo significa che tutta la nube si disperde in tutto il locale.

Dati forniti:

- Densità apparente ( $\rho_{app}$ ): 730 kg/m<sup>3</sup>
- Spessore dello strato di polvere (s): 0,2 mm = 0,2 x 10<sup>-3</sup> m
- Volume della zona (V): 100 m<sup>3</sup>
- Area della zona (A): 30 m<sup>2</sup>

Prima di tutto, calcoliamo l'altezza H:

$$H = \frac{V}{A} = 3,33 \text{ m}$$

Partendo dall'equazione 3, usata per trovare lo spessore dello strato di polvere, che in questo caso ipotizziamo essere 1 mm, attraverso la formula inversa ricaviamo la concentrazione effettiva in aria di polvere (X):

$$s = \frac{X \cdot H}{\rho_{app}}$$

$$X = \frac{s \cdot \rho_{app}}{H}$$

Sostituendo i valori:

$$X = \frac{0,2 \times 10^{-3} \text{ m} \times 730 \text{ kg/m}^3}{3,33 \text{ m}} = 0,044 \text{ kg/m}^3 = 44 \text{ g/m}^3$$

Il Limite Inferiore di Esplosibilità (LEL) della farina di grano per i dati forniti è 51g/m<sup>3</sup>, il quale risulta maggiore della concentrazione effettiva in aria appena calcolata. Questo non significa che il locale non è a rischio esplosione, ma che ci possono essere zone locali con concentrazioni più elevate che può causare una esplosione solo in una determinata zona dell'intero locale.

## **FARINA DI ALLUMINIO:**

Dati forniti:

- Densità apparente ( $\rho_{app}$ ): 1300 kg/m<sup>3</sup>
- Spessore dello strato di polvere (s): 1 mm = 1 x 10<sup>-3</sup> m
- Volume della zona (V): 100 m<sup>3</sup>
- Area della zona (A): 30 m<sup>2</sup>

Prima di tutto, calcoliamo l'altezza H:

$$H = \frac{V}{A} = 3,33 \text{ m}$$

Partendo dall'equazione 3, usata per trovare lo spessore dello strato di polvere, che in questo caso ipotizziamo essere 1 mm, attraverso la formula inversa ricaviamo la concentrazione effettiva in aria di polvere (X):

$$s = \frac{X \cdot H}{\rho_{app}}$$

$$X = \frac{s \cdot \rho_{app}}{H}$$

Sostituendo i valori:

$$LEL = \frac{1 \times 10^{-3} \text{ m} \times 1300 \text{ kg/m}^3}{3,33 \text{ m}^3} = 0.39 \text{ kg/m}^3 = 390 \text{ g/m}^3$$

Il Limite Inferiore di Esplosibilità (LEL) della farina di grano per i dati forniti è  $60 \text{ g/m}^3$ , il quale risulta minore della concentrazione effettiva in aria appena calcolata. Questo significa che tutta la nube si disperde in tutto il locale.

Secondo la norma NFPA 499, la valutazione del rischio di esplosione da polvere richiede un'attenzione particolare alle concentrazioni di polvere che superano i limiti di esplosibilità, anche per strati di polvere inferiori a 1 mm. Ad esempio, la concentrazione di polvere di farina di grano calcolata è di  $219,21 \text{ g/m}^3$ , nettamente superiore al Limite Inferiore di Esplosibilità (LEL) di  $51 \text{ g/m}^3$ . Sebbene la NFPA 499 consideri trascurabili gli strati di polvere inferiori a 1 mm, in questo caso specifico, anche uno strato di 1 mm porta a una concentrazione in aria che supera il LEL, indicando che l'ambiente deve essere classificato come Classe II Divisione 1, richiedendo frequenti pulizie per ridurre il rischio di esplosione. Analogamente, la concentrazione di polvere di alluminio calcolata è di  $390 \text{ g/m}^3$ , che supera il LEL di  $60 \text{ g/m}^3$ , rappresentando un rischio significativo. Pertanto, l'ambiente sarebbe considerato a rischio di esplosione anche secondo la NFPA 499, richiedendo una classificazione di maggiore pericolosità e l'adozione di procedure di pulizia regolari e sistematiche per minimizzare gli accumuli di polvere e prevenire potenziali esplosioni. Questo approccio implica che, nonostante le linee guida generali della NFPA, i calcoli appena svolti dimostrano che situazioni particolari richiedono una valutazione più approfondita e un'applicazione rigorosa delle misure preventive per garantire la sicurezza.

### 3.3 Analisi comparativa delle norme

Le norme IEC 60079-10-2, CEI 31-56 e NFPA 499 condividono l'obiettivo comune di mitigare il rischio di esplosioni in ambienti a rischio per la presenza di polveri combustibili. Tutte e tre enfatizzano l'importanza delle misure preventive per evitare la formazione di atmosfere esplosive e l'eliminazione delle fonti di innesco. Inoltre, raccomandano la sostituzione di materiali infiammabili con altri meno pericolosi e il controllo delle concentrazioni di sostanze potenzialmente pericolose. Le similitudini includono anche l'adozione di sistemi di bonifica e la gestione attenta degli impianti per ridurre il rischio di esplosione. La pulizia e la manutenzione sono considerate essenziali in tutte e tre le normative per il controllo degli accumuli di polvere.

Le differenze si manifestano principalmente nel grado di dettaglio e nella specificità delle misure tecniche raccomandate. La norma IEC tende a concentrarsi su principi generali di sicurezza, mentre la NFPA 499 fornisce una guida più dettagliata su test di combustibilità ed esplosività, nonché sulla classificazione delle aree pericolose. La CEI 31-56, d'altro canto, distingue chiaramente tra misure preventive e di protezione.

	<b>Caratteristica</b>	<b>IEC 60079-10-2</b>	<b>CEI 31-56</b>	<b>NFPA 499</b>
<b>UGUAGLIANZE</b>	Obiettivo	Mitigazione del rischio di esplosioni per polveri combustibili	Mitigazione del rischio di esplosioni per polveri combustibili	Mitigazione del rischio di esplosioni per polveri combustibili
	Misure preventive	Evitare atmosfere esplosive, eliminare fonti di innesco	Evitare atmosfere esplosive, eliminare fonti di innesco	Evitare atmosfere esplosive, eliminare fonti di innesco
	Sostituzione materiali infiammabili	Raccomandata	Raccomandata	Raccomandata
	Controllo concentrazioni pericolose	Raccomandato	Raccomandato	Raccomandato
	Sistemi di bonifica	Adottati	Adottati	Adottati
	Gestione e manutenzione impianti	Essenziale per il controllo degli accumuli di polvere	Essenziale per il controllo degli accumuli di polvere	Essenziale per il controllo degli accumuli di polvere
<b>DIFFERENZE</b>	Livello di dettaglio misure tecniche	Principi generali di sicurezza	Distinzione tra misure preventive e di protezione	Guida dettagliata su test di combustibilità ed esplosività e classificazione delle aree pericolose

### 3.3.1 Comparazione delle Norme sul Mantenimento della Pulizia

Le norme 60079-10-2, CEI 31-56 e NFPA 499 forniscono, come spiegato ampiamente, anche linee guida specifiche sul mantenimento della pulizia per prevenire incendi ed esplosioni in ambienti dove si manipolano polveri combustibili, condividendo l'obiettivo comune di ridurre i rischi associati agli accumuli di polvere attraverso la pulizia efficace.

La norma NFPA 499 si concentra su una manutenzione regolare e sistematica per prevenire accumuli pericolosi di polvere, fornendo linee guida dettagliate sulla frequenza di pulizia basata sulla profondità degli accumuli e la classificazione delle aree. Questa norma specifica anche le azioni da intraprendere in base alla quantità di polvere accumulata.

Questo confronto viene riassunto nella seguente tabella, che evidenzia le differenze nelle specifiche di pulizia e le responsabilità, ma anche le similitudini nell'importanza data alla prevenzione di incendi ed esplosioni attraverso una gestione efficace della pulizia.

Tabella 15- Comparazione delle Norme sul Mantenimento della Pulizia

<b>Aspetto</b>	<b>Norma 60079-10-2</b>	<b>Norma CEI 31-56</b>	<b>NFPA 499</b>
Frequenza della Pulizia	Non sufficiente, conta la portata di deposito e l'efficacia della pulizia	Valutata in base all'efficacia delle misure di pulizia	Frequenza e profondità degli accumuli determinano la necessità di pulizia
Livello di Pulizia – Buono	Polvere a spessori trascurabili o inesistenti, eliminando rischi	Polvere mantenuta a livelli trascurabili o rimossa rapidamente	Strati di polvere non sono classificati come rischiosi se <1 mm
Livello di Pulizia – Adeguato	Strati di breve durata, meno di un turno di lavoro	Strati rimossi entro un turno di lavoro (8 ore)	Accumuli fino a 3 mm richiedono pulizia frequente
Livello di Pulizia – Scarso	Strati persistenti oltre un turno di lavoro con rischio significativo	Strati persistenti oltre un turno di lavoro con rischio significativo	Accumuli oltre 3 mm richiedono chiusura e pulizia immediata
Criteri di Pulizia	Condizioni per creare una nube di polvere devono essere considerate	Procedure scritte per la manipolazione di sostanze infiammabili	Linee guida sulla frequenza di pulizia basate sulla profondità degli accumuli
Procedure Scritte	Non specificamente menzionato	Devono essere note agli incaricati, dipendenti o esterni	Linee guida dettagliate sulla pulizia regolare e sistematica
Responsabilità del Datore di Lavoro	Non specificamente menzionato	Responsabile della pulizia e sicurezza del personale, formazione e selezione imprese esterne	Deve garantire che le procedure di pulizia siano seguite correttamente

### 3.3.2 Classificazione delle aree a rischio esplosione

Nel contesto dell'analisi delle normative riguardanti la classificazione la zonizzazione delle aree soggette a rischio di esplosione è di fondamentale importanza esaminare attentamente le modalità attraverso le quali le polveri infiammabili possono essere rilasciate nell'ambiente di lavoro. Una valutazione precisa di queste modalità di emissione è cruciale per garantire una classificazione accurata delle zone a rischio.

### 3.3.2.1 Concetti base della IEC 60079-10-2

L'analisi per la classificazione delle aree di rischio esplosione prevede un'accurata valutazione della probabilità e della durata delle emissioni di polveri, considerando il grado di rilascio delle stesse. La classificazione del grado di rilascio in continuo, primo e secondo grado, implica la considerazione di molteplici variabili, tra cui il tasso di emissione, la concentrazione di polveri, la velocità di rilascio, il livello di ventilazione presente e altri parametri significativi. Questo processo di valutazione costituisce un elemento cruciale per stabilire la probabile presenza di atmosfere potenzialmente esplosive e per determinare l'estensione e la natura delle zone a rischio che circondano l'area di emissione.

Il grado di rilascio continuo si associa a emissioni costanti, quali quelle che si verificano all'interno di contenitori utilizzati per la miscelazione o silos che sono frequentemente riempiti e svuotati. Le emissioni possono originarsi da accumuli di polvere presenti in diversi dispositivi, inclusi mulini, frantumatori, essiccatoi e altri sistemi meccanici.

Per quanto concerne il primo grado di emissione, esso si riferisce a rilasci che sono prevedibili con una certa periodicità o che si manifestano occasionalmente durante le operazioni standard, come ad esempio nelle vicinanze di punti di carico o scarico di sacchi non sigillati. A questo tipo di emissione contribuiscono apparecchiature aperte, unità di carico/scarico e sacchi ermeticamente chiusi. Il secondo grado di emissione caratterizza quelle situazioni in cui le polveri sono maneggiate in modo tale da generare emissioni non previste durante l'attività ordinaria, verificandosi solo occasionalmente e per brevi lassi di tempo. Questo scenario può includere unità di carico/scarico dotate di sistemi di prevenzione, macchinari impiegati per l'imballaggio e punti di discontinuità nei sistemi di trasporto.

In sintesi, la valutazione dettagliata dei gradi di emissione riveste un ruolo essenziale nella definizione e nella gestione ottimale delle aree esposte a potenziali atmosfere esplosive. È inoltre importante ricordare che la presenza di strati di polvere rappresenta una potenziale fonte di emissione, la cui pericolosità può essere mitigata sia mediante la selezione di apparecchiature con superfici a temperatura controllata sia attraverso la gestione della pulizia dell'ambiente. Le zone possono quindi essere determinate come definite nel seguito: [3]

Tabella 16 - Designazione delle zone in relazione alla presenza di polvere

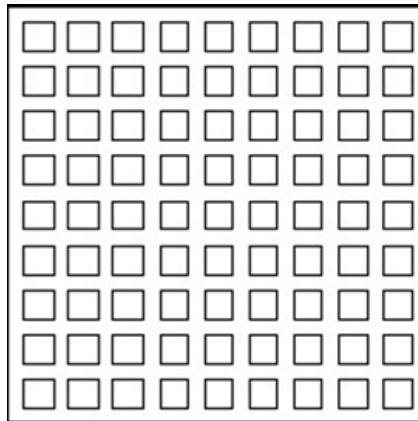
Presenza di polvere	Classificazione della Zona di un luogo con presenza di nubi di polvere
Grado di emissione CONTINUO	20
Grado di emissione PRIMO	21
Grado di emissione SECONDO	22

### 3.3.2.2 Classificazione aree di rischio secondo la norma IEC 60079-10-2 e la guida CEI EN 31-56

Nel contesto della classificazione delle zone in funzione del rischio di atmosfere esplosive la definizione delle Zone 20, 21 e 22 segue criteri specifici basati sulla frequenza e sulla durata della presenza di atmosfere esplosive da polvere, nonché sulla probabilità di emissione di tali sostanze. La Zona 20 è caratterizzata da un'area in cui le atmosfere esplosive di polvere sono presenti in modo continuativo, per periodi prolungati o con frequenza elevata. Tale zona comprende l'interno di



canalizzazioni, apparecchiature di produzione e movimentazione, oltre a situazioni in cui un'atmosfera esplosiva da polvere persiste all'esterno di contenitori per la polvere.



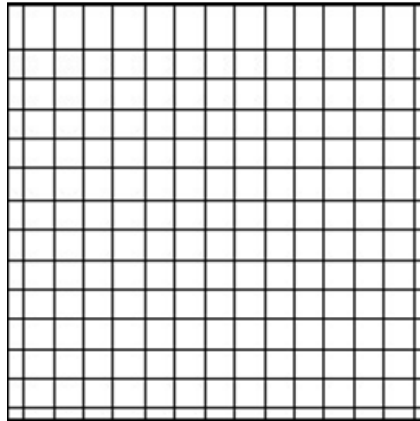
*Figura 21 - Zona 20*

La Zona 21 viene delineata in base alla valutazione delle fonti di emissione di polvere e alla loro interazione con l'ambiente circostante, che favorisce la formazione di atmosfere esplosive. Questa zona include aree in cui è probabile la presenza periodica di atmosfere esplosive da polvere, come all'interno di determinate apparecchiature durante le fasi di avvio e spegnimento. La presenza esterna di tali atmosfere, determinata da fonti di emissione di primo grado, è valutata in relazione a parametri quali quantità, velocità di emissione, dimensioni delle particelle di polvere e contenuto di umidità. È essenziale considerare attentamente queste fonti di emissione per stabilire l'esatta estensione della zona, tenendo conto anche delle barriere fisiche (muri, ecc.), che possono definire i limiti della stessa.

Una Zona 21 non confinata, situata all'interno di un ambiente chiuso senza delimitazioni fisiche, è generalmente adiacente a una Zona 22.

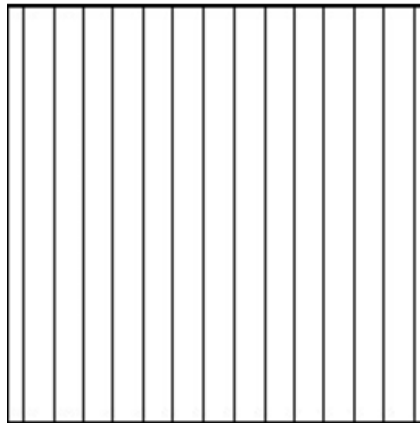
Oltre quanto appena detto, ci sono ulteriori considerazioni da tener presente:

1. Laddove si identifichino accumuli di polvere all'esterno dell'originaria Zona 21, può rendersi necessario estendere la classificazione a Zona 22, considerando l'ampiezza degli accumuli e l'interazione con gli stessi capaci di generare nuvole di polvere.
2. La determinazione del confine tra Zona 21 e Zona 22 può presentare difficoltà, richiedendo un'accurata valutazione delle condizioni specifiche.



*Figura 22 - Zona 21*

La Zona 22 si identifica attraverso la stima delle fonti di emissione di secondo grado e il loro impatto sull'ambiente, che può favorire la creazione di atmosfere esplosive di polvere. Questa area comprende luoghi in cui le fonti di emissione di secondo grado possono determinare la presenza di atmosfere esplosive, con variazioni basate su fattori quali quantità di polvere, portata, dimensioni delle particelle e contenuto di umidità. Le barriere fisiche limitanti possono agire da confini della zona. L'osservazione di accumuli di polvere all'esterno della Zona 22 originale può implicare la necessità di un'estensione della classificazione, tenendo conto dell'estensione degli accumuli e delle interazioni capaci di produrre nuvole di polvere.



*Figura 23 - Zona 22*

In conclusione, la precisa definizione di queste zone è fondamentale per la corretta implementazione di misure di sicurezza atte a prevenire l'insorgere di atmosfere esplosive e garantire la protezione degli ambienti di lavoro.

Tabella 17 - Classificazione delle aree pericolose

Gas, vapori e nebbie	Polveri	Definizione
<b>Zona 0</b>	<b>Zona 20</b>	Area in cui è presente in permanenza o per lunghi periodi o frequentemente un'atmosfera esplosiva. In generale, le condizioni relative ad una zona 0 o 20 interessano l'interno delle apparecchiature di processo, di serbatoi di stoccaggio, tubazioni di trasferimento, recipienti chiusi, ecc.
<b>Zona 1</b>	<b>Zona 21</b>	Area in cui è probabile che avvenga occasionalmente durante le normali attività la formazione di un'atmosfera esplosiva. La zona 1 o 21 può comprendere, ad esempio, i luoghi nelle immediate vicinanze della zona 0, delle aperture di riempimento e svuotamento e di apparecchi, sistemi di protezione, ecc.
<b>Zona 2</b>	<b>Zona 22</b>	Area in cui durante le normali attività non è probabile la formazione di un'atmosfera esplosiva o, qualora si verifichi, sia unicamente di breve durata. La condizione relativa alla zona 2 o 22 può comprendere, tra gli altri, luoghi circostanti le zone 0/1 o 20/21, in prossimità di apparecchi, sistemi di protezione e componenti.

Si illustrano di seguito alcuni esempi di zone a rischio di esplosione, conformemente alla classificazione prevista per atmosfere di tipo aria/polveri, riscontrabili in specifici ambienti e apparecchiature utilizzate per le attività di macinazione dei cereali per produrre farina.

Tabella 18 - Esempi di zone a rischio esplosione

<b>CLASSIFICAZIONE</b>
<p><b>ZONA 20:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Fossa di scarico grano</li> <li>• Interno dei sistemi di contenimento delle polveri combustibili: <ul style="list-style-type: none"> <li>- tubazioni per il trasporto pneumatico</li> <li>- coclea</li> <li>- elevatore a tazze</li> <li>- mulino di macinazione</li> <li>- filtro depolveratore lato aria sporca</li> <li>- Silos</li> </ul> </li> </ul>
<p><b>ZONA 21:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Stazione di scarico del grano (intorno griglia fossa e autotreno) non aspirata</li> <li>• Macchina taglia sacchi e riempi/svuota big-bags non aspirata</li> <li>• Stazione carico rinfusa farina e sottoprodotti in tunnel chiuso ai lati</li> </ul>
<p><b>ZONA 22:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Stazione di scarico del grano (intorno griglia fossa e autotreno) aspirata</li> </ul>

- Macchina taglia sacchi e riempi/svuota big-bags aspirata
- Stazione carico rinfusa farina e sottoprodotti in ambiente aperto
- Esterno manichette di connessione in materiale tessile
- Estremità elevatori a tazze, trasportatori.
- Scarico in ambiente di filtro dove la polvere può essere emessa solo per malfunzionamento o rottura del filtro

Esempio Silo di stoccaggio della farina e relativa coclea:

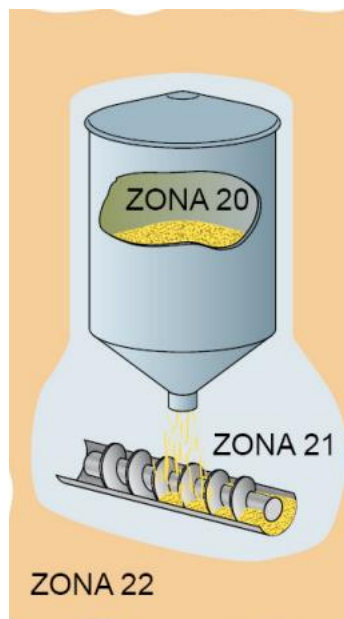


Figura 24 - Esempio Silo di stoccaggio della farina

### 3.3.2.2.1 Procedura per la classificazione delle aree

La metodologia per la classificazione di aree a rischio a causa della presenza di gas, vapori o nebbie infiammabili si articola in una procedura strutturata, che si sviluppa attraverso due fasi principali, come anticipato precedentemente:

- la determinazione del tipo di zona di rischio;
- la definizione dell'estensione della zona di rischio.

Per quanto riguarda la definizione dell'estensione della zona a rischio bisogna tener presente che ;

- la distanza pericolosa "dz" si definisce come la misura dalla fonte di emissione lungo la direzione più probabile di dispersione dell'atmosfera esplosiva,
- la quota "a" specifica l'effettiva estensione della zona pericolosa lungo la direzione di emissione,
- la quota "b" ne descrive l'estensione lungo la direzione ortogonale alla direzione di emissione.

Queste fasi si suddividono ulteriormente in una serie di passaggi dettagliati, necessari per una valutazione approfondita del sito in questione:

1. Raccolta e analisi delle informazioni generali relative al progetto per verificare l'applicabilità delle normative vigenti;
2. Identificazione degli ambienti interessati e delle relative condizioni ambientali;
3. Riconoscimento delle sostanze infiammabili presenti e delle loro specifiche caratteristiche, per ciascun ambiente;
4. Localizzazione delle sorgenti di emissione di tali sostanze, per ogni ambiente considerato;
5. Valutazione del rischio di fuoriuscite di materiale infiammabile (grado di emissione), per ogni sorgente identificata;
6. Identificazione delle sorgenti di emissione che possono essere considerate rappresentative di altre sorgenti;
7. Analisi dell'impatto delle diverse emissioni sulla classificazione dell'area in esame;
8. Controllo del tipo e dell'efficacia dei sistemi di ventilazione presenti, per ogni grado di rischio associato alle singole sorgenti di emissione o a quelle rappresentative;
9. Calcolo della quantità massima di emissione prevista in condizioni di massima cautela;
10. Assegnazione del tipo di zona di rischio generata dalle emissioni;
11. Calcolo della distanza di sicurezza ( $d_z$ ) e delle dimensioni "a" e "b" rilevanti per la valutazione del rischio;
12. Definizione della forma e dell'estensione delle zone a rischio, per l'ambiente analizzato;
13. Creazione di una mappatura che includa tutte le zone a rischio identificate;
14. Determinazione della posizione delle aperture e in relazione alle zone di rischio individuate.

Correlato alla classificazione delle aree è il concetto di grado di sicurezza di un dispositivo di protezione, il quale riflette la sua capacità di scongiurare rischi quali l'accumulo di polveri combustibili e il loro contatto con fonti di innesco. Quando dispositivi di protezione indipendenti sono utilizzati in sequenza e non soggetti a fattori comuni di fallimento, il loro grado di sicurezza combinato offre una protezione globale contro incidenti. Sistemi di sicurezza che aderiscono agli standard normativi per il controllo di polveri combustibili devono garantire un grado di sicurezza minimo di 3, tenendo conto della probabilità di formazione di atmosfere esplosive e del rischio di malfunzionamento dei dispositivi di sicurezza, come delineato nel DPR 126/98.

Un dispositivo standard, valutato con un grado di sicurezza 1, è progettato per resistere alle condizioni operative previste. L'implementazione di più dispositivi in serie, ciascuno con grado 1, implica che solo il fallimento simultaneo di tutti potrebbe condurre a un incidente. Con ogni dispositivo aggiunto, la probabilità complessiva di fallimento si riduce significativamente, diventando trascurabile per configurazioni con più di due dispositivi.

È possibile incrementare il grado di sicurezza attraverso il sovradimensionamento dei dispositivi per resistere a sollecitazioni superiori a quelle ordinarie, equiparando potenzialmente l'efficacia di un

dispositivo sovradimensionato a quella di due dispositivi standard. Tuttavia, il sovradimensionamento generalmente si applica a un unico dispositivo. L'uso corretto dei dispositivi secondo le specifiche di progetto è cruciale per mantenere l'efficacia prevista. La strategia di sicurezza basata sulla ridondanza mira a preservare l'integrità del sistema anche in presenza di fallimenti individuali.

Per prevenire incidenti esplosivi, è essenziale eliminare lacune di sicurezza dovute a negligenza, comprendere le dinamiche degli incidenti e identificare misure protettive adeguate. La sicurezza affidabile contro esplosioni, con un grado minimo di 3, richiede:

- a) l'adozione di dispositivi di sicurezza indipendenti in serie per evitare incidenti esplosivi;
- b) l'impiego di dispositivi supplementari che fungano da backup reciproco, considerando la possibilità di cause comuni di malfunzionamento.

Fattori esclusi da eventi catastrofici, quali la corrosione, vibrazioni, urti meccanici e manutenzione impropria, possono compromettere l'efficacia dei dispositivi. La presunzione di indipendenza da cause comuni di fallimento, se indebitamente trascurata, aumenta il rischio di fallimenti simultanei, compromettendo la validità del sistema di protezione.[2]

### **3.3.3.1 Classificazione aree di rischio secondo la norma NFPA 499**

La norma NFPA 499 stabilisce criteri per la classificazione delle zone a rischio di esplosione, attribuendo particolare rilievo alla presenza di polveri combustibili tra gli altri elementi pericolosi. Tale classificazione si rivela cruciale nell'orientare le strategie di sicurezza e le specificazioni tecniche per l'installazione di sistemi elettrici in ambienti a potenziale rischio. Di seguito è fornita una sintesi delle categorie di pericolo esplosivo come delineate dalla NFPA 499:

Classe I (Ambienti con Gas Infiammabili): Comprende zone in cui la concentrazione di gas infiammabili può costituire un rischio di esplosione. La Classe I si articola ulteriormente in:

- Divisione 1: indica aree dove la presenza di gas infiammabili è regolarmente probabile durante l'operatività standard.
- Divisione 2: fa riferimento a zone in cui i gas infiammabili si manifestano solo in situazioni non standard, ad esempio a seguito di perdite.

Classe II (Ambienti con Polveri Infiammabili): Riguarda le aree a rischio a causa della presenza di polveri combustibili.

Analogamente alla Classe I, anche questa è suddivisa in:

- Divisione 1: per aree dove la presenza di polveri combustibili è una condizione ordinaria.
- Divisione 2: per zone in cui le polveri combustibili compaiono in circostanze atipiche.

Classe III (Ambienti con Fibre Infiammabili): Include aree con potenziale accumulo di fibre infiammabili sufficienti a generare un rischio esplosivo. La suddivisione di questa classe prevede:

- Divisione 1: indica aree con una probabilità regolare di presenza di fibre infiammabili durante il funzionamento normale.
- Divisione 2: riguarda zone in cui le fibre infiammabili si verificano in condizioni non standard.

La corretta individuazione delle classi di pericolo è fondamentale per assicurare un'adeguata protezione, progettazione e manutenzione delle installazioni elettriche in contesti a rischio.[4]

### **3.3.3.1.2 Classificazione delle aree pericolose di classe II secondo la NFPA 70**

L'articolo 500 della NFPA 70 fornisce linee guida per la classificazione dei luoghi esposti a rischi di incendi o esplosioni dovuti a gas infiammabili, vapori, polveri combustibili o fibre infiammabili. Specificamente, la Classe II si occupa di ambienti a rischio per la presenza di polvere combustibile, suddividendosi in due divisioni principali:

- Classe II, Divisione 1: caratterizza luoghi dove la polvere combustibile è costantemente presente nell'aria in quantità tali da formare miscele pericolose, spesso dovute a malfunzionamenti o anomalie operative.
- Classe II, Divisione 2: comprende ambienti in cui le polveri combustibili possono accumularsi a seguito di condizioni operative insolite, ma generalmente non incidono sull'operatività ordinaria delle apparecchiature. In questi luoghi, la presenza di polveri vicino a dispositivi elettrici potrebbe influenzare la dissipazione termica o presentare rischi di infiammabilità in caso di guasti.

Riassumendo la NFPA sottolinea la necessità di evitare l'utilizzo di dispositivi elettrici in aree dove potrebbero innescare polveri combustibili, mentre per quanto riguarda le normative nazionali le zone pericolose si classificano in Zona 20, Zona 21 e Zona 22, ciascuna riflettendo differenti livelli di rischio basati sulla frequenza e durata della presenza di materiali combustibili.

Queste classificazioni sono indispensabili per progettare impianti industriali sicuri, mirando alla prevenzione di incidenti legati a polveri combustibili [4].

### **3.3.1.3 Analisi comparativa per la classificazione delle aree a rischio esplosione delle tre norme**

Nell'analisi delle tre normative riguardanti la sicurezza nelle aree a rischio di esplosione dovute a polveri combustibili, emergono similitudini significative che riflettono un impegno comune verso la prevenzione degli incidenti in ambienti industriali. Sia il DPR 126/98 italiano, sia le norme internazionali NFPA 499 e IEC 60079-10-2 condividono la priorità di garantire la sicurezza dei lavoratori e la protezione delle infrastrutture. Ciò è evidente nel loro comune approccio alla classificazione delle aree, che viene realizzato mediante una valutazione della probabilità e della durata della presenza di atmosfere potenzialmente esplosive. Inoltre, le tre normative sottolineano l'importanza di implementare dispositivi di sicurezza specificamente progettati per prevenire le esplosioni, promuovendo l'adozione di soluzioni tecniche avanzate e di strategie di sicurezza proattive.

Nonostante queste fondamentali similitudini, le norme presentano anche differenze sostanziali che rispecchiano variazioni nel focus, nei criteri di classificazione delle aree e nelle metodologie di prevenzione.

La IEC 60079-10-2 si distingue per la sua attenzione nei confronti delle procedure di valutazione delle aree a rischio, proponendo metodi sistematici per l'identificazione e la mitigazione dei pericoli, un aspetto che viene trattato in maniera meno esauriente nella NFPA 499. Questa focalizzazione sulla valutazione dettagliata e sulle misure preventive specifiche sottolinea l'approccio metodologico rigoroso adottato a livello internazionale per affrontare i rischi di esplosione.

La diversità nei metodi e nelle priorità di queste normative evidenzia l'importanza di un approccio bilanciato e integrato alla sicurezza, che consideri sia le strategie globali che le esigenze locali. L'adozione di pratiche di sicurezza efficaci richiede una comprensione dettagliata sia delle linee guida generali sia delle specifiche tecniche, allo scopo di realizzare ambienti di lavoro sicuri e resilienti di fronte ai rischi di esplosione. La sfida per gli operatori del settore è quella di navigare tra queste diverse normative, integrandone i principi per sviluppare un regime di sicurezza che sia al contempo conforme alle leggi, efficace nella prevenzione degli incidenti e flessibile di fronte alle continue innovazioni tecnologiche e ai cambiamenti normativi.

La sfida principale, quindi, rimane l'implementazione pratica di queste misure, che richiede una conoscenza approfondita delle specifiche tecniche e una costante attenzione alla manutenzione e all'adeguamento dei sistemi di sicurezza in base alle evoluzioni tecnologiche e normative.

Tabella 19 - Comparazione normative per la classificazione delle aree a rischio

<b>Caratteristica</b>	<b>IEC 60079-10-2</b>	<b>CEI 31-56</b>	<b>NFPA 499</b>
Obiettivo comune	Mitigazione del rischio di esplosioni per polveri combustibili	Mitigazione del rischio di esplosioni per polveri combustibili	Mitigazione del rischio di esplosioni per polveri combustibili
Grado di rilascio	Continuo, primo e secondo grado basato su tasso di emissione, concentrazione e ventilazione	N/A	Divisioni 1 e 2 basate su condizioni operative e frequenza di rilascio
Strategie di sicurezza	Approccio metodologico rigoroso, valutazione delle aree e mitigazione pericoli	Approccio basato su misure preventive e protezione	Orientamento alla sicurezza elettrica, classificazione dettagliata e test specifici
Classificazione delle Aree di Rischio	Valutazione della probabilità e durata delle emissioni di polveri. Classificazione delle aree in Zone 20, 21 e 22 basata su criteri specifici (frequenza e durata della presenza di atmosfere esplosive da polvere).	Classificazione delle zone pericolose in Zone 20, 21 e 22 con criteri specifici per frequenza e durata della presenza di atmosfere esplosive da polvere. Valutazione delle fonti di emissione e interazione con l'ambiente.	Classificazione delle zone a rischio di esplosione in Classe I (gas infiammabili), Classe II (polveri combustibili), e Classe III (fibre infiammabili). Divisione 1 (condizioni ordinarie) e Divisione 2 (condizioni atipiche).

## 3.3 Il problema posto dagli strati di polvere in ambienti a rischio esplosione

### 3.3.1 CEI EN 60079-10-2

Dalla norma CEI EN 60079-10-2 si evidenzia un approccio dettagliato e strutturato per affrontare il problema degli strati di polvere in ambienti a rischio di esplosione dovuto alla presenza di polveri



combustibili. Questo approccio include la valutazione e la classificazione delle aree, la considerazione delle sorgenti di emissione e le misure preventive per la gestione degli strati di polvere.

La norma CEI 31-56 e la CEI EN 60079-10-2 affrontano entrambe il problema degli strati di polvere in ambienti a rischio di esplosione, ma con approcci e dettagli specifici per ciascuna. Per quanto riguarda la norma CEI EN 60079-10-2 le informazioni principali del problema delle esplosioni causate da strati di polvere sono:

1. Fenomeni che originano le esplosioni da strati di polvere: le esplosioni possono originarsi quando gli strati di polvere combustibile presenti in un ambiente vengono disturbati e la polvere viene sospesa nell'aria, formando un'atmosfera esplosiva. Questo può avvenire a causa di movimenti d'aria o di altre perturbazioni. Gli strati di polvere possono anche autoaccendersi se raggiungono la temperatura di accensione a causa di fonti di calore vicine.
2. Conseguenze delle esplosioni da strati di polvere: le esplosioni da strati di polvere possono causare danni significativi non solo per l'onda d'urto generata dall'esplosione stessa, ma anche attraverso la proiezione di particelle ad alta velocità, che possono danneggiare macchinari e ferire le persone. Possono inoltre innescare ulteriori incendi.
3. Misure preventive: la norma sottolinea l'importanza di mantenere puliti gli ambienti di lavoro per prevenire l'accumulo di polvere. Le pratiche di buona pulizia sono essenziali e dovrebbero essere eseguite regolarmente per ridurre la probabilità che gli strati di polvere raggiungano uno spessore tale da rappresentare un rischio.
4. Classificazione delle aree: gli spazi in cui la polvere si deposita devono essere classificati come zone a rischio di esplosione (Zone 20, 21, 22) a seconda della frequenza e della durata della presenza di atmosfere esplosive potenziali. Questo aiuta a determinare il livello appropriato di misure preventive e di sicurezza da adottare.
5. Formazione e consapevolezza: il personale deve essere formato regolarmente sui rischi associati alla polvere e sulle procedure corrette per lavorare in modo sicuro in ambienti polverosi. Deve essere garantito che comprendano l'importanza di evitare l'accumulo di polvere e di seguire le procedure di pulizia.
6. Sistemi di ventilazione: l'installazione di sistemi di ventilazione efficaci per controllare la distribuzione della polvere nell'aria e per mantenerla al di sotto delle soglie di concentrazione esplosiva [3].

### **3.3.2 GUIDA CEI EN 31-56**

La CEI 31-56 affronta specificamente il problema degli strati di polvere e le relative misure preventive contro le esplosioni. Di seguito vengono elencate le informazioni più rilevanti estratte dalla norma riguardo agli strati di polvere:

1. Formazione di strati di polvere: gli strati di polvere si formano quando le particelle di polvere si depositano su superfici orizzontali e verticali. Questi strati possono diventare una fonte significativa di rischio di esplosione se la polvere è combustibile. La norma specifica che la presenza di strati di polvere combustibile può portare alla formazione di atmosfere esplosive se questi strati vengono disturbati e le particelle vengono sospese nell'aria.

2. Pericoli associati agli strati di polvere: gli strati di polvere possono prendere fuoco e bruciare rapidamente, dando origine a un'esplosione se esiste una fonte di innesco. Inoltre, uno strato di polvere può aumentare la superficie attraverso cui può propagarsi un incendio, amplificando l'effetto di un'eventuale esplosione.
3. Misure preventive contro gli strati di polvere: per prevenire le esplosioni causate dagli strati di polvere, la norma raccomanda diverse misure preventive, tra cui:
  - Pulizia regolare: rimuovere gli strati di polvere per evitare l'accumulo;
  - Controllo delle emissioni: minimizzare la formazione di polvere durante i processi produttivi mediante sistemi di aspirazione e filtraggio;
  - Limitazione dell'accumulo: evitare l'accumulo di polvere su superfici e attrezzature dove possibile;
  - Bonifica degli ambienti: mantenere gli ambienti puliti e liberi da depositi di polvere tramite procedure regolari di pulizia.
4. Procedure di classificazione dei luoghi: per la classificazione dei luoghi a rischio a causa della presenza di strati di polvere, la norma suggerisce di valutare la possibilità che gli strati di polvere presenti possano generare atmosfere esplosive. In particolare, è importante determinare le aree dove gli strati di polvere sono più probabili e applicare misure di controllo adeguate in queste zone.
5. Considerazioni aggiuntive: la norma enfatizza l'importanza di un'accurata valutazione dei rischi, considerando non solo la presenza di polveri combustibili, ma anche le condizioni operative e le caratteristiche specifiche del sito. Le misure preventive e di protezione devono essere adattate alle specifiche esigenze del luogo di lavoro e alla natura delle polveri presenti.

Queste disposizioni sono parte integrante di una gestione del rischio che mira a minimizzare la probabilità di esplosioni legate agli strati di polvere in ambienti lavorativi [2].

### **3.3.3 Confronto tra CEI EN 60079-10-2 E LA CEI EN 31-56**

Nel seguente paragrafo, ci concentreremo sull'analisi e sul confronto delle due normative esaminandone gli aspetti più rilevanti. Attraverso questo confronto, miriamo a fornire una visione chiara e dettagliata delle similitudini e delle differenze tra le due normative, al fine di supportare una migliore comprensione dei requisiti normativi e delle best practice per la gestione della sicurezza in ambienti potenzialmente pericolosi.

Il primo aspetto è l'enfasi sulla bonifica: la CEI EN 60079-10-2 mette in risalto la necessità di bonifica degli ambienti con particolare attenzione alla rimozione degli strati di polveri combustibili, suggerendo misure specifiche e dettagliate. La CEI 31-56, pur trattando il tema della classificazione dei luoghi pericolosi a causa delle polveri combustibili, non entra nel dettaglio delle procedure di bonifica come la norma CEI EN 60079-10-2.

Per quanto riguarda, invece, l'approccio alla classificazione precedentemente analizzato ampiamente, entrambe le norme concordano sull'importanza della classificazione dei luoghi pericolosi eseguita da personale esperto. Tuttavia, la CEI EN 60079-10-2 fornisce una guida più specifica sulla gestione e la bonifica degli strati di polvere, mentre la CEI 31-56 si concentra più ampiamente sul processo di classificazione e valutazione del rischio.

In sintesi, mentre entrambe le norme riconoscono l'importanza della gestione delle polveri

combustibili in ambienti a rischio di esplosione, la CEI EN 60079-10-2 fornisce indicazioni più dirette e dettagliate sulle pratiche di bonifica, inclusa la rimozione degli strati di polvere. La CEI 31-56, d'altra parte, si concentra sulla valutazione e classificazione del rischio, sottolineando l'importanza dell'uso di procedure e strumenti idonei senza dettagliare specificamente le pratiche di bonifica.

Tabella 20 - Confronto problema dovuto agli strati di polvere in ambienti a rischio esplosione tra CEI EN 60079-10-2 e CEI 31-56

<b>Aspetto Comparativo</b>	<b>CEI EN 60079-10-2</b>	<b>CEI EN 31-56</b>	<b>Analisi Comparativa</b>
Enfasi sulla bonifica	Necessità di bonifica degli ambienti con particolare attenzione alla rimozione degli strati di polveri combustibili, suggerendo misure specifiche e dettagliate.	Tratta la classificazione dei luoghi pericolosi a causa delle polveri combustibili, ma non entra nel dettaglio delle procedure di bonifica.	CEI EN 60079-10-2 fornisce indicazioni dettagliate sulle pratiche di bonifica, mentre CEI 31-56 non le specifica.
Approccio alla classificazione	Fornisce una guida specifica sulla gestione e bonifica degli strati di polvere.	Si concentra sul processo di classificazione e valutazione del rischio.	Entrambe concordano sull'importanza della classificazione da parte di personale esperto, ma CEI EN 60079-10-2 è più dettagliata sulla gestione degli strati di polvere.
Gestione delle polveri combustibili	Fornisce indicazioni dirette e dettagliate sulle pratiche di bonifica, inclusa la rimozione degli strati di polvere.	Si concentra sulla valutazione e classificazione del rischio, sottolineando l'importanza di procedure e strumenti idonei.	CEI EN 60079-10-2 è più dettagliata nelle pratiche di bonifica, mentre CEI 31-56 si concentra su valutazione e classificazione del rischio.

### 3.3.3.1 Gestione e rimozione degli strati di polvere

Per approfondire ulteriormente il confronto tra le normative CEI EN 60079-10-2 e CEI 31-56 riguardo al trattamento degli strati di polvere in ambienti a rischio di esplosione, possiamo esaminare alcuni aspetti chiave che emergono dall'analisi delle due normative.

Iniziamo con il parlare della CEI EN 60079-10-2, analizzandone i seguenti aspetti:

- **Identificazione e Valutazione:** enfatizza l'importanza di identificare e valutare accuratamente le aree dove gli strati di polvere possono costituire un rischio di esplosione. Viene richiesta un'analisi dettagliata delle condizioni operative che potrebbero favorire l'accumulo di polveri e la loro potenziale dispersione nell'aria.

- **Misure di Controllo:** specifiche misure di controllo per la gestione degli strati di polvere, compresa la necessità di mantenere un regime di pulizia adeguato per minimizzare la presenza di polveri combustibili e ridurre il rischio di esplosione. Queste misure possono includere l'uso di sistemi di ventilazione, la pulizia regolare delle superfici e l'impiego di tecniche di confinamento e raccolta delle polveri.
- **Classificazione Dettagliata:** fornisce linee guida dettagliate per la classificazione delle aree a rischio in base alla presenza e alla concentrazione di polveri combustibili, facilitando l'identificazione delle zone che richiedono misure di sicurezza specifiche.
- **Ruolo del Personale Esperto:** enfatizza il ruolo cruciale del personale esperto nella valutazione dei rischi e nella classificazione delle aree, assicurando che le decisioni siano basate su una comprensione approfondita delle proprietà delle polveri combustibili e delle dinamiche di processo.

Per quanto riguarda, invece, la CEI 31-56 ci concentreremo sui seguenti aspetti:

- **Approccio alla Sicurezza:** anche se non dettaglia specificatamente le procedure per la rimozione o la gestione degli strati di polvere, sottolinea l'importanza di un approccio sistematico alla sicurezza che tenga conto di tutti gli aspetti legati al rischio di esplosione causato dalle polveri combustibili.
- **Riferimenti a Pratiche di Bonifica:** menziona l'esigenza di adottare misure appropriate per mitigare i rischi, implicitamente includendo la bonifica degli strati di polvere come parte delle strategie di gestione del rischio.
- **Valutazione del Rischio:** incoraggia una valutazione comprensiva del rischio che consideri vari fattori di pericolo legati alle polveri combustibili, senza entrare nel dettaglio delle metodologie specifiche per la classificazione delle aree.
- **Importanza della Conoscenza:** pur non dettagliando il ruolo del personale come la CEI EN 60079-10-2, implica l'importanza di una solida comprensione dei rischi associati alle polveri combustibili per implementare efficacemente misure di sicurezza [2].

<b>Aspetto Comparativo</b>	<b>CEI EN 60079-10-2</b>	<b>CEI 31-56</b>	<b>Analisi Comparativa</b>
Identificazione e Valutazione	Enfatizza l'importanza di identificare e valutare accuratamente le aree dove gli strati di polvere possono costituire un rischio di esplosione. Richiede un'analisi dettagliata	Sottolinea l'importanza di un approccio sistematico alla sicurezza che tenga conto di tutti gli aspetti legati al rischio di esplosione.	CEI EN 60079-10-2 richiede un'analisi dettagliata delle condizioni operative, mentre CEI 31-56 adotta un approccio più generale.

	delle condizioni operative.		
Misure di Controllo	Specifiche misure di controllo per la gestione degli strati di polvere, inclusa la pulizia regolare, l'uso di sistemi di ventilazione e tecniche di confinamento.	Menziona l'esigenza di adottare misure appropriate per mitigare i rischi, senza entrare nei dettagli delle metodologie.	CEI EN 60079-10-2 fornisce dettagliate misure di controllo, mentre CEI 31-56 menziona l'adozione di misure appropriate in generale.
Classificazione Dettagliata	Linee guida dettagliate per la classificazione delle aree a rischio in base alla presenza e concentrazione di polveri combustibili.	Incoraggia una valutazione comprensiva del rischio, senza dettagli specifici per la classificazione delle aree.	CEI EN 60079-10-2 facilita l'identificazione delle zone a rischio, mentre CEI 31-56 si focalizza sulla valutazione generale del rischio.
Ruolo del Personale Esperto	Enfatizza il ruolo cruciale del personale esperto nella valutazione dei rischi e nella classificazione delle aree.	Implica l'importanza della comprensione dei rischi associati alle polveri combustibili.	CEI EN 60079-10-2 dettaglia il ruolo del personale esperto, mentre CEI 31-56 implica l'importanza della conoscenza senza specificare il ruolo del personale.

### 3.3.4 NFPA 499

Per quanto riguarda, invece, la gestione degli strati di polvere secondo la norma NFPA 499, essa è affrontata con un approccio che mette in primo piano la sicurezza degli impianti e delle persone, prendendo in considerazione vari aspetti legati alla presenza e al comportamento delle polveri combustibili negli ambienti industriali. La norma fornisce indicazioni dettagliate su come identificare, valutare e mitigare i rischi associati agli strati di polvere, concentrandosi in particolare su come la presenza di tali strati possa influenzare la sicurezza delle installazioni elettriche. Un aspetto chiave trattato dalla norma è la valutazione della temperatura di accensione degli strati di polvere e come questa possa variare in base alle dimensioni delle particelle e alla loro composizione. Viene sottolineato che strati più sottili di polvere possono avere temperature di accensione inferiori rispetto alle nubi di polvere e che, di conseguenza, anche una piccola accumulazione può rappresentare un significativo rischio di incendio o esplosione se in prossimità di fonti di calore o di scintille.

Per affrontare questi rischi, la NFPA 499 raccomanda l'implementazione di pratiche di pulizia regolari ed efficaci per ridurre la formazione di strati pericolosi di polvere combustibile. Inoltre, sottolinea l'importanza di considerare la presenza di polveri durante la progettazione e la manutenzione delle apparecchiature elettriche, assicurando che le temperature operative di tali apparecchiature siano sempre inferiori alla temperatura di accensione minima degli strati di polvere presenti.

La norma mette inoltre in evidenza la necessità di condurre test di esplosibilità e combustibilità per caratterizzare in modo preciso le proprietà delle polveri maneggiate negli impianti. Questi test forniscono dati essenziali per la corretta classificazione delle aree pericolose e per la definizione delle misure di protezione più appropriate.

In sintesi, la NFPA 499 approfondisce la gestione degli strati di polvere con un approccio olistico che comprende la valutazione dei rischi, la progettazione sicura delle installazioni elettriche, pratiche di pulizia efficaci e test specifici sulle proprietà delle polveri. Questo approccio mira a prevenire incidenti legati alla presenza di polveri combustibili, garantendo la sicurezza degli impianti industriali e la protezione delle persone che vi lavorano [4].

### **3.4 Comparazione delle norme per la gestione degli strati di polvere in ambienti a rischio esplosione**

La gestione degli strati di polvere in ambienti a rischio di esplosione è quindi un tema di cruciale importanza nelle normative tecniche internazionali, come dimostrato dalle disposizioni delle norme NFPA 499, CEI EN 60079-10-2, e CEI 31-56.

Queste norme forniscono linee guida per minimizzare i rischi associati alle polveri combustibili, ma ognuna con un proprio focus e approccio specifico.

Di seguito viene riportata una comparazione tra le tre normative, evidenziando gli aspetti in comune e le differenze.

Tra gli aspetti in comune possiamo ricalcare i seguenti fattori:

- **Identificazione e Classificazione delle Aree:** Tutte e tre le norme sottolineano l'importanza della corretta identificazione e classificazione delle aree a rischio di esplosione a causa della presenza di polveri combustibili. L'obiettivo è garantire che vengano adottate misure di sicurezza appropriate.
- **Valutazione dei Rischi:** è evidente in tutte le norme l'attenzione alla valutazione dei rischi associati agli strati di polvere, includendo l'analisi delle proprietà fisiche e chimiche delle polveri e il loro potenziale esplosivo.
- **Ruolo del Personale Esperto:** la necessità di avere personale qualificato e esperto per la valutazione dei rischi e la classificazione delle aree è un requisito comune, riconoscendo l'importanza delle competenze tecniche nella gestione della sicurezza.

Possiamo notare che la differenza più grande tra le normative riguarda l'ambito di applicazione. Mentre la NFPA 499 si rivolge in modo specifico alle installazioni elettriche in aree di processo chimico, offrendo un quadro dettagliato sulla gestione della sicurezza relativa alle polveri combustibili in tali contesti, il focus delle normative CEI riguarda gli ambienti industriali e lavorativi dove si gestiscono materiali in forma di polveri combustibili.

In conclusione, possiamo affermare che queste informazioni riflettono l'importanza di adottare un approccio su misura, adeguato alla specificità dell'industria e del contesto operativo, nell'implementazione delle norme di sicurezza.

Tabella 21 - Comparazione normative per la gestione degli strati di polvere in ambienti a rischio esplosione

<b>Aspetto Comparativo</b>	<b>IEC EN 60079-10-2</b>	<b>CEI 31-56</b>	<b>NFPA 499</b>
Fenomeni che originano le esplosioni da strati di polvere	Le esplosioni possono originarsi quando gli strati di polvere combustibile presenti in un ambiente vengono disturbati e la polvere viene sospesa nell'aria, formando un'atmosfera esplosiva. Questo può avvenire a causa di movimenti d'aria o di altre perturbazioni. Gli strati di polvere possono anche autoaccendersi se raggiungono la temperatura di accensione a causa di fonti di calore vicine.	Gli strati di polvere si formano quando le particelle di polvere si depositano su superfici orizzontali e verticali. Questi strati possono diventare una fonte significativa di rischio di esplosione se la polvere è combustibile.	Valutazione della temperatura di accensione degli strati di polvere e come questa possa variare in base alle dimensioni delle particelle e alla loro composizione. Strati più sottili di polvere possono avere temperature di accensione inferiori rispetto alle nubi di polvere.
Conseguenze delle esplosioni da strati di polvere	Le esplosioni da strati di polvere possono causare danni significativi non solo per l'onda d'urto generata dall'esplosione stessa, ma anche attraverso la proiezione di particelle ad alta velocità, che possono danneggiare macchinari e ferire le persone. Possono inoltre innescare ulteriori incendi.	Gli strati di polvere possono prendere fuoco e bruciare rapidamente, dando origine a un'esplosione se esiste una fonte di innesco. Inoltre, uno strato di polvere può aumentare la superficie attraverso cui può propagarsi un incendio, amplificando l'effetto di un'eventuale esplosione.	Anche una piccola accumulazione può rappresentare un significativo rischio di incendio o esplosione se in prossimità di fonti di calore o di scintille.
Misure preventive	Mantenere puliti gli ambienti di lavoro per prevenire l'accumulo di polvere. Le pratiche di buona pulizia sono essenziali e dovrebbero essere eseguite regolarmente per ridurre la	Pulizia regolare, controllo delle emissioni, limitazione dell'accumulo, bonifica degli ambienti.	Implementazione di pratiche di pulizia regolari ed efficaci per ridurre la formazione di strati pericolosi di polvere combustibile.

	probabilità che gli strati di polvere raggiungano uno spessore tale da rappresentare un rischio.		
Classificazione delle aree	Gli spazi in cui la polvere si deposita devono essere classificati come zone a rischio di esplosione (Zone 20, 21, 22) a seconda della frequenza e della durata della presenza di atmosfere esplosive potenziali.	Valutare la possibilità che gli strati di polvere presenti possano generare atmosfere esplosive. Determinare le aree dove gli strati di polvere sono più probabili e applicare misure di controllo adeguate in queste zone.	Corretta classificazione delle aree pericolose attraverso test di esplodibilità e combustibilità delle polveri maneggiate negli impianti.
Formazione e consapevolezza	Il personale deve essere formato regolarmente sui rischi associati alla polvere e sulle procedure corrette per lavorare in modo sicuro in ambienti polverosi.	Menzione dell'importanza della comprensione dei rischi associati alle polveri combustibili per implementare efficacemente misure di sicurezza.	La formazione è implicita nell'approccio generale della norma, concentrandosi su come la presenza di polveri possa influenzare la sicurezza delle installazioni elettriche.
Sistemi di ventilazione	Installazione di sistemi di ventilazione efficaci per controllare la distribuzione della polvere nell'aria e per mantenerla al di sotto delle soglie di concentrazione esplosiva.	Non specificatamente menzionato.	Considerazione della presenza di polveri durante la progettazione e la manutenzione delle apparecchiature elettriche, assicurando che le temperature operative siano sempre inferiori alla temperatura di accensione minima degli strati di polvere presenti.





## 4.Considerazioni

Nella presente trattazione, sono esaminate e sviluppate nuove considerazioni volte al miglioramento delle normative attualmente vigenti, argomento di questa tesi, in quanto è essenziale riconoscere che queste non sono esenti da lacune. Pertanto, l'obiettivo principale, nei paragrafi successivi, sarà quello di identificare e analizzare criticamente tali carenze, proponendo soluzioni innovative e approcci più efficaci per la mitigazione del rischio. Attraverso un'accurata revisione della letteratura scientifica e dall'analisi degli incidenti pregressi analizzati nel capitolo 2, si è delineato un quadro normativo più completo e robusto, capace di rispondere in maniera adeguata alle esigenze contemporanee dell'industria. Le considerazioni proposte hanno il fine di offrire un contributo significativo alla sicurezza industriale e alla prevenzione delle esplosioni di polveri.

### 4.1 Riepilogo normative

Alla fine di questa tesi, riportiamo la seguente tabella riassuntiva per riepilogare tutti gli aspetti cruciali trattati riguardo alle normative IEC 60079-10-2, CEI 31-56 e NFPA 499. Questa tabella contiene una comparazione dettagliata delle principali caratteristiche e direttive di ciascuna norma. La tabella serve come un utile strumento di riferimento per tenere a mente i concetti chiave e soprattutto i concetti mancanti per ogni norma. L'utilità di questa tabella è quella di mettere in luce le mancanze delle norme e partendo da quest'ultime fornire e sviluppare considerazioni personali e riflessioni finali su ciascuna norma al fine di indicare ipotetiche migliorie per rendere le normative relative alla gestione del rischio di esplosioni in ambienti con polveri combustibili più efficienti.

Tabella 22 - Tabella Riassuntiva delle Normative IEC 60079-10-2, CEI 31-56 e NFPA 499

<b>Caratteristica</b>	<b>IEC 60079-10-2</b>	<b>CEI 31-56</b>	<b>NFPA 499</b>
Campo di applicazione	Atmosfere esplosive causate da polveri o strati di polvere combustibile in condizioni atmosferiche standard	Luoghi industriali con pericolo di esplosioni da miscele di polveri combustibili e aria esclusi miniere sotterranee e ambienti con rischi da gas o vapori	Aree pericolose per la selezione di attrezzature elettriche in conformità con NFPA 70
Metodo di classificazione	Classificazione delle aree pericolose basata su parametri come la combustibilità della polvere e proprietà dei materiali con verifiche di laboratorio	N/A - Estensione a contesti industriali più ampi con esclusioni specifiche	Linee guida per la selezione di attrezzature elettriche in aree classificate pericolose
Direttive per la sicurezza	Approccio metodico con verifica	Applicazione in contesti non	Criteri per la scelta di attrezzature

	attraverso prove di laboratorio o dati esterni	regolamentati da norme tecniche armonizzate esclusione di miniere sotterranee e ambienti con rischi da gas o vapori	elettriche per prevenire inneschi di esplosioni
Specificità	Parametri includono combustibilità della polvere e proprietà dei materiali presenti	Esclusione di miniere sotterranee rischi da gas o vapori e guasti catastrofici	Ampia comprensione dei criteri di estensione e livello di pericolo delle aree classificate
Sistema di prevenzione	Sistemi autonomi sicurezza intrinseca preclusione di atmosfere esplosive e eliminazione fonti di innesco attive	Misure preventive per eliminare condizioni favorevoli alla formazione di miscele esplosive e potenziali cause di innesco	Misure tecniche per prevenire esplosioni da polveri combustibili valutazione pericolosità polveri progettazione sicura installazioni elettriche
Parametri operativi e critici	Definizione di parametri standard e critici con allarmi e disattivazioni automatiche	N/A	Dettagli sui criteri di accensione e importanza di conoscere le temperature di accensione
Sostituzione e controllo sostanze	Sostituzione di sostanze infiammabili con alternative meno pericolose controllo concentrazioni sostanze pericolose	N/A	Test di combustibilità ed esplosività delle polveri
Inertizzazione	Uso di polveri inerti compatibili per miscele esplosive aria/polveri	N/A	N/A
Gestione e manutenzione	Manutenzione appropriata e approvvigionamento sicuro dei materiali	N/A	N/A
Accumuli di polvere	Evitare accumuli di polvere che possano generare atmosfere esplosive	N/A	N/A
Tecniche di bonifica	Aspirazione aria rimozione polveri dalle singole fonti	N/A	N/A

	contenimento in depressione eliminazione strati di polvere		
Livello di sicurezza	N/A	Livello di sicurezza equivalente almeno pari a 3 per i dispositivi di protezione	N/A
Indipendenza sistemi	N/A	Utilizzo di sistemi indipendenti da cause comuni di fallimento	N/A
Obiettivo comune	Mitigazione del rischio di esplosioni per polveri combustibili	Mitigazione del rischio di esplosioni per polveri combustibili	Mitigazione del rischio di esplosioni per polveri combustibili
Classificazione zone	Zone 20 21 22 basate su frequenza e durata delle atmosfere esplosive	Zone 20 21 22 basate su frequenza e durata delle atmosfere esplosive	Classi I II III; Divisioni 1 e 2 per frequenza e durata delle atmosfere esplosive
Grado di rilascio	Continuo primo e secondo grado basato su tasso di emissione concentrazione e ventilazione	N/A	Divisioni 1 e 2 basate su condizioni operative e frequenza di rilascio
Dettagli misure tecniche	Valutazione dettagliata delle emissioni e misure preventive	Distinzione tra misure preventive e di protezione	Guida dettagliata su test di combustibilità esplosività e classificazione
Procedure di valutazione	Metodi sistematici per identificare e mitigare i pericoli	N/A	Linee guida per la classificazione delle aree e installazioni elettriche
Dispositivi di sicurezza	Progettazione di dispositivi per prevenire esplosioni manutenzione e controllo polveri	N/A	Specifiche tecniche per dispositivi elettrici in aree a rischio
Strategie di sicurezza	Approccio metodologico rigoroso valutazione delle aree e mitigazione pericoli	Approccio basato su misure preventive e protezione	Orientamento alla sicurezza elettrica classificazione dettagliata e test specifici

Per formulare considerazioni personali sulle normative IEC 60079-10-2, CEI 31-56 e NFPA 499, è imperativo condurre un'analisi critica delle lacune presenti in ciascuna di esse e proporre possibili miglioramenti. Tale processo riveste un'importanza cruciale nell'ambito della sicurezza e della conformità norma, poiché consente di ottimizzare i protocolli di sicurezza in ambienti soggetti a rischi di esplosione. Inoltre, tale esercizio di valutazione e suggerimento può essere agevolmente condotto attraverso l'analisi della tabella inclusa nel presente paragrafo, che evidenzia in modo chiaro le lacune riscontrate e quindi le relative aree di miglioramento.

Di seguito sono riportate tali osservazioni e proposte di miglioramento.

### **4.1.1 IEC 60079-10-2**

La norma si concentra principalmente sui principi generali di sicurezza, lasciando spazio a interpretazioni su come implementare specifiche misure tecniche. La mancanza di dettagli pratici può portare a una variazione nella qualità dell'implementazione tra diverse installazioni. Sarebbe opportuno fornire esempi concreti e linee guida dettagliate per l'implementazione delle misure tecniche, inclusi i metodi di valutazione e mitigazione dei rischi.

#### **Esempio Pratico:**

Un'azienda potrebbe sapere che deve eseguire la manutenzione regolare del suo sistema di ventilazione, ma senza linee guida specifiche potrebbe non sapere quali componenti devono essere ispezionati, con quale frequenza e quali test devono essere eseguiti.

In funzione di quanto appena descritto, la norma potrebbe includere un capitolo dedicato alla manutenzione e gestione, con linee guida dettagliate come:

- Protocolli di Manutenzione: elenco di componenti da ispezionare (ventilatori, filtri, sensori), frequenza delle ispezioni, procedure di test;
- Procedure di Ispezione: metodi per verificare l'efficacia del sistema di ventilazione, come eseguire test di funzionalità e calibrazione dei sensori.

Un altro aspetto riguarda l'inertizzazione. Quest'ultima è menzionata come misura onerosa, ma non vengono forniti esempi concreti o linee guida specifiche su come implementarla efficacemente.

Ad esempio, dovrebbe avere al suo interno:

- Casi di Studio con esempi di implementazioni di successo in diversi settori industriali.
- Checklist di Sicurezza, ovvero elenchi di controllo per garantire che tutti gli aspetti dell'inertizzazione siano stati considerati e implementati correttamente.
- Valutazione dell'Ambiente ovvero, eseguire una valutazione completa del processo per identificare le aree dove le polveri combustibili sono più presenti e dove l'inertizzazione sarebbe più efficace.
- Specificare il tipo di gas inerte da utilizzare, le concentrazioni necessarie e il metodo di distribuzione.
- Protocolli per la manutenzione regolare del sistema di inertizzazione, inclusi controlli dei livelli di gas e test dei sensori.

Queste accortezze, appena descritte, potrebbero aiutare a ridurre le variazioni nella qualità dell'implementazione, garantendo un livello di sicurezza uniforme e più elevato in tutti gli ambienti industriali a rischio.

## 4.1.2 CEI 31-56

Dopo aver esaminato la Guida CEI 31-56 ho concluso che sebbene la norma distingue tra misure preventive e di protezione, manca una trattazione dettagliata su come implementare queste misure in maniera pratica. Per cui una guida pratica dettagliata che fornisca linee guida su come implementare misure preventive e di protezione includendo esempi concreti e protocolli specifici risulta utile.

Le principali mancanze riguardano l'inertizzazione, la gestione e manutenzione, le tecniche di bonifica, il livello di sicurezza, l'indipendenza dei sistemi, i sistemi di ventilazione, le procedure di pulizia e le procedure di valutazione del rischio.

### **Esempio Pratico:**

Supponiamo che un'azienda gestisca un impianto industriale dove le polveri combustibili sono un rischio. La norma deve consigliare di adottare misure preventive per eliminare le condizioni favorevoli alla formazione di miscele esplosive e misure di protezione per limitare gli effetti di eventuali esplosioni. Tuttavia, senza linee guida pratiche, l'azienda potrebbe non sapere come procedere esattamente.

Per quanto riguarda le misure preventive, la norma dice di ridurre le concentrazioni di polveri nell'aria, ma non specifica come farlo. Quindi, un'azienda potrebbe installare un sistema di ventilazione, ma senza indicazioni precise, potrebbe non sapere come dimensionarlo correttamente o dove posizionare i punti di aspirazione. Quindi è utile implementare la norma con altre linee guida su come progettare e installare un sistema di ventilazione efficace, inclusi calcoli di dimensionamento, posizionamento dei punti di aspirazione e scelta dei filtri. Queste norme sono:

- Le direttive ATEX dell'Unione Europea, 2014/34/UE (ATEX 114) e 1999/92/CE (ATEX 137);
- La EN 1127-1: Prevenzione delle esplosioni e protezione - Concetti fondamentali e metodologia;

Questi standard forniscono indicazioni dettagliate su come dimensionare correttamente i sistemi di ventilazione, dove posizionare i punti di aspirazione e la scelta dei filtri adeguati. Per le misure di Protezione, invece, la norma potrebbe suggerire di utilizzare dispositivi di protezione contro le esplosioni, ma senza dettagli pratici su quali dispositivi scegliere o come installarli, l'azienda potrebbe optare per soluzioni non ottimali o non conformi. In questo caso, quindi, dettagli su come selezionare e installare dispositivi di protezione contro le esplosioni, come barriere fisiche, sistemi di soppressione delle esplosioni e valvole di scarico, sono utili. Infine, un ulteriore miglioramento, potrebbe riguardare l'integrazione con altre normative armonizzate per coprire un più ampio spettro di rischi. Questo significa che potrebbe trarre vantaggio dall'allinearsi meglio con altre normative internazionali per affrontare una gamma più vasta di scenari di rischio.

### **Esempio Pratico:**

Supponiamo che un impianto industriale lavori con polveri combustibili ma anche con vapori infiammabili. La CEI 31-56 esclude specificamente ambienti con rischi legati a gas o vapori infiammabili, il che può lasciare un vuoto normativo.

Ipotizziamo che un'azienda segua la CEI 31-56 per le polveri combustibili, ma poi deve fare riferimento a un'altra norma separata per i rischi di vapori infiammabili. Questo può creare confusione

e aumentare il rischio di non coprire adeguatamente tutti i pericoli presenti.

Per questi motivi, utilizzare nella norma una cross-reference, ovvero creare riferimenti incrociati all'interno della norma per indicare chiaramente dove trovare informazioni complementari su rischi non direttamente trattati nella CEI 31-56, facilitando la navigazione e l'applicazione integrata delle misure di sicurezza.

Tutte queste migliorie, appena trattate, garantirebbero alle aziende tutte le informazioni necessarie per implementare efficacemente le misure di sicurezza e proteggere i loro impianti in modo completo e coerente.

**Esempio Pratico:**

Un'azienda decide di mescolare polveri combustibili con materiali inerti per ridurre il rischio di esplosioni, ma non sa quale e quanto materiale inerte utilizzare. La norma deve includere l'uso di polveri inerti per ridurre la capacità delle polveri combustibili di creare atmosfere esplosive ed indicare quali materiale utilizzare ed indicarne il quantitativo opportuno.

**Esempio Pratico:**

Un'azienda decide di implementare un programma di manutenzione preventiva che prevede ispezioni periodiche delle apparecchiature per evitare l'accumulo di polveri combustibili, ma non sa con che frequenza eseguire ispezioni e pulizie periodiche. La norma deve fornire linee guida per la manutenzione regolare delle apparecchiature definendo i periodi necessari per ogni tipo di attrezzatura in cui deve avvenire questa ispezione e pulizia.

### 4.1.3 NFPA 499

La NFPA 499, essendo una norma che fornisce linee guida per la classificazione delle polveri combustibili e delle aree pericolose per le installazioni elettriche, potrebbe essere migliorata includendo aspetti trascurati che altre normative affrontano in modo più dettagliato.

Questi miglioramenti riguarderebbero l'inertizzazione, la gestione e manutenzione, le tecniche di bonifica, e il livello di sicurezza. In aggiunta, potrebbero essere introdotti dettagli su sistemi di ventilazione, procedure di pulizia, e una trattazione sistematica delle procedure di valutazione del rischio.

**Esempio Pratico:**

In un impianto di lavorazione del legno, l'uso di polveri inerti come il talco o la sabbia fine può essere implementato per mescolare con le polveri di legno, riducendo la loro capacità di creare atmosfere esplosive. La NFPA 499 deve specificare le condizioni e i materiali idonei per tali operazioni.

**Esempio Pratico:**

Un'azienda di produzione alimentare potrebbe adottare un programma di manutenzione preventiva che include ispezioni regolari delle apparecchiature per identificare e risolvere potenziali problemi che potrebbero causare l'accumulo di polveri combustibili. La NFPA 499 deve includere linee guida dettagliate su:

- Procedure di Manutenzione: specificare quali componenti delle attrezzature devono essere ispezionati e mantenuti regolarmente, con indicazioni sulla frequenza e i metodi di manutenzione.
- Gestione degli Accumuli di Polvere: fornire una guida su come identificare le aree a rischio di accumulo di polvere, come stabilire un programma di pulizia regolare e quali tecniche di pulizia adottare (es. aspirazione, spazzolatura).

**Esempio Pratico:**

In un'industria farmaceutica, l'implementazione di sistemi di aspirazione locale che rimuovono immediatamente le polveri prodotte durante i processi di miscelazione e granulazione potrebbe essere obbligatoria. La NFPA 499 potrebbe specificare i requisiti per tali sistemi, inclusi i livelli di depressione e la frequenza delle pulizie.

**Esempio Pratico:**

Un impianto chimico potrebbe essere tenuto a installare sistemi di protezione antincendio con un livello di sicurezza di almeno 3. Questo potrebbe includere sistemi di rilevamento e soppressione degli incendi altamente affidabili, con verifiche e manutenzioni periodiche per assicurare la loro efficacia.

**Esempio Pratico:**

La norma include istruzioni su come eseguire test per determinare la combustibilità e l'esplosività delle polveri, ma non offre una guida chiara su come utilizzare i risultati di questi test per valutare il rischio complessivo.

Senza una procedura sistematica, un'azienda esegue i test ma poi può non sapere come integrare i risultati in una valutazione complessiva del rischio. Ad esempio, potrebbe non sapere come combinare i dati sui test di esplosività con altri fattori di rischio, come la frequenza delle operazioni che generano polveri o l'efficacia dei sistemi di ventilazione.

La norma, quindi, deve includere un capitolo dettagliato su come eseguire una valutazione completa del rischio, integrando i risultati dei test di combustibilità ed esplosività con altri fattori di rischio operativi.

## 4.2 Prevenzione e protezione dalle esplosioni da polveri

L'utilizzo e la manipolazione di polveri con potenziale esplosivo, indipendentemente dalla classificazione normativa, necessitano di un'analisi preliminare dei rischi. Questa analisi, attuata attraverso strumenti di valutazione dei rischi, deve identificare le condizioni operative e le anomalie che potrebbero condurre a un'esplosione, permettendo così l'adozione di misure preventive e protettive adeguate. In alcuni casi, può risultare necessario impiegare tecniche analitiche specialistiche per la caratterizzazione del comportamento delle sostanze in condizioni particolari, diverse da quelle standard di esercizio

### 4.2.1 Misure preventive

Per garantire la sicurezza nell'uso industriale delle polveri combustibili, è essenziale adottare adeguati accorgimenti che riducano significativamente il rischio di esplosione. Tra queste misure preventive rientrano:

- Eliminare tutte le possibili fonti di innesco, come fiamme, scintille, attrito e urti.
- Minimizzare il contatto del materiale con l'ossigeno mediante l'inertizzazione dell'ambiente.
- Prevenire qualsiasi forma di contaminazione.
- Collegare tutti gli impianti a terra, garantendo l'assenza di parti isolate o non correttamente collegate.
- Ridurre al minimo le turbolenze nei locali di stoccaggio e manipolazione, minimizzando i percorsi orizzontali di tubazioni e strutture di sostegno e assicurando la massima pulizia.



- Utilizzare e conservare le polveri in forma umida, quando possibile, per ridurre la dispersione.
- Stoccare il materiale in modo che l'energia liberata da eventuali decomposizioni possa essere dissipata senza coinvolgere altro materiale.
- Mantenere i locali di stoccaggio privi di sorgenti di riscaldamento, assicurando che la temperatura non superi i 50°C anche nelle giornate più calde.
- Assicurare che i mezzi di estinzione siano sempre perfettamente funzionanti, valutando l'opportunità di installare sistemi fissi

## 4.2.2 Sistemi di protezione

Per limitare i danni causati da un'eventuale esplosione di polveri, si possono utilizzare diversi sistemi di protezione:

- **Sistemi di isolamento:** comprendono sistemi di isolamento automatico, soppressione automatica o materiale d'arresto. Il tipo ad isolamento automatico utilizza valvole d'intercettazione a chiusura rapida, azionate da sensori di pressione o ottici. Il sistema di soppressione automatica rilascia rapidamente una sostanza soffocante l'esplosione, come bromoclorodifluorometano, clorobromometano o acqua.
- **Sistemi di soppressione:** funzionano in modo simile ai sistemi per tubazioni e arrestano l'esplosione nei contenitori. Questi sistemi sono progettati per gestire la massima velocità di incremento della pressione durante un'esplosione.
- **Sistemi di sfogo:** applicabili solo se esiste uno scarico sicuro per il materiale sfiatato. In caso di polveri tossiche, il materiale non può essere scaricato direttamente in atmosfera e deve essere convogliato in un sistema di blow down.

## 4.3 Conclusioni

L'analisi svolta in questa tesi ha riguardato un approfondito studio sulle normative IEC 60079-10-2, CEI 31-56 e NFPA 499, focalizzandosi sulla prevenzione e protezione dalle esplosioni di polveri in ambienti industriali. Attraverso una comparazione dettagliata delle normative, è emerso come ciascuna presenti punti di forza e aree di miglioramento, contribuendo collettivamente alla sicurezza degli ambienti di lavoro con rischio di esplosioni da polveri combustibili. Le norme IEC 60079-10-2 e CEI 31-56, insieme alla NFPA 499, condividono l'obiettivo comune di mitigare il rischio di esplosioni da polveri combustibili. Esse enfatizzano l'importanza di misure preventive per evitare la formazione di atmosfere esplosive e l'eliminazione delle fonti di innesco. La sostituzione di materiali infiammabili con alternative meno pericolose e il controllo delle concentrazioni di sostanze potenzialmente pericolose sono raccomandazioni presenti in tutte le normative. Inoltre, tutte e tre le normative riconoscono l'essenzialità della pulizia e della manutenzione degli impianti per ridurre il rischio di esplosione. Mentre le tre normative condividono principi fondamentali di sicurezza, differiscono nel livello di dettaglio delle misure tecniche raccomandate. La norma IEC 60079-10-2 tende a concentrarsi su principi generali di sicurezza, lasciando spazio a interpretazioni su come implementare specifiche misure tecniche. Al contrario, la NFPA 499 fornisce una guida più dettagliata su test di combustibilità ed esplosività, oltre a una classificazione precisa delle aree pericolose. La CEI 31-56, d'altra parte, distingue chiaramente tra misure preventive e di protezione, ma non entra nel dettaglio delle procedure di bonifica come fa la IEC 60079-10-2. Le metodologie di

classificazione delle aree a rischio di esplosione nelle tre normative sottolineano l'importanza della valutazione della probabilità e della durata della presenza di atmosfere potenzialmente esplosive. La IEC 60079-10-2 si distingue per la sua attenzione nei confronti delle procedure di valutazione delle aree a rischio, proponendo metodi sistematici per l'identificazione e la mitigazione dei pericoli. Questa focalizzazione sulla valutazione dettagliata e sulle misure preventive specifiche evidenzia un approccio metodologico rigoroso per affrontare i rischi di esplosione. Dall'analisi comparativa emergono alcune lacune nelle normative. La IEC 60079-10-2, sebbene fornisca una base solida, potrebbe beneficiare di esempi concreti e linee guida dettagliate per l'implementazione delle misure tecniche. La CEI 31-56 potrebbe migliorare includendo specifiche più dettagliate sulle pratiche di bonifica, essenziali per la gestione degli strati di polvere. La NFPA 499, pur essendo dettagliata, potrebbe ampliare il suo campo di applicazione per includere una maggiore varietà di contesti industriali. In conclusione, le normative analizzate offrono una base robusta per la prevenzione e la protezione dalle esplosioni di polveri in ambienti industriali. Tuttavia, l'adozione di un approccio su misura, adeguato alla specificità dell'industria e del contesto operativo, risulta cruciale per l'efficace implementazione delle misure di sicurezza. La sfida principale per gli operatori del settore è integrare i principi di queste normative, sviluppando un regime di sicurezza che sia conforme alle leggi, efficace nella prevenzione degli incidenti e flessibile di fronte alle continue innovazioni tecnologiche e ai cambiamenti normativi. Il futuro della sicurezza industriale dipende dalla capacità di adattare e migliorare costantemente le pratiche di sicurezza, garantendo ambienti di lavoro sempre più sicuri e resilienti.

## BIBLIOGRAFIA

- [1] Eckoff R., Dust Explosions in the process industries, Third Edition, 2003
- [2] CEI 31-56, Costruzioni per atmosfere esplosive per la presenza di polveri combustibili. Guida all'applicazione della norma CEI EN 61241-10 (CEI 31- 66) "Classificazione delle aree dove sono o possono essere presenti polveri esplosive".
- [3] Norma IEC 60079-10-2
- [4] NFPA 499 Standard Development: <https://link.nfpa.org/free-access/publications/499/2024>
- [5] Secondary dust explosions- Lessons from the plastics processing industry by Donald K. Hayden
- [6] ISO 80079-20-2: Atmosfere esplosive - Parte 20-2: Caratteristiche dei materiali - Metodi di prova per polveri combustibili
- [7] EN 62305: Protezione contro i fulmini

## SITOGRAFIA

- [8] INERIS – Blaye – Summary report – July 1998
- [9] Dinamica dei fenomeni esplosivi – INAIL 2018:  
[https://www.inail.it/cs/internet/docs/dinamica\\_dei\\_fenomeni\\_esplosivi\\_pdf\\_2443085454519.pdf?section=attivita](https://www.inail.it/cs/internet/docs/dinamica_dei_fenomeni_esplosivi_pdf_2443085454519.pdf?section=attivita)
- [10] Valutazione del rischio per la presenza di miscele esplosive aria/polveri: l'approccio metodologico : <https://www.arpa.piemonte.it/arpa-comunica/events/eventi-2017/atex-2017/2-bellamino.pdf>
- [11] <https://webthesis.biblio.polito.it/secure/10438/1/tesi.pdf>
- [12] ESPLOSIONI DA POLVERE- DIREZIONE REGIONALE VV.F. – PUGLIA Ing. Michele SARACINO:  
<http://www.ordingtaranto.it/wpcontent/uploads/downloads/tematiche/818/ESPLOSIONI%20DA%20POLVERE%20-%20rev2.pdf>
- [13] LA PREVENZIONE DELLE ESPLOSIONI DA POLVERE:  
[https://www.arpa.piemonte.it/pubblicazioni-2/pubblicazioni-anno-2015/atex/manuale-tecnico-2015-dicembre.pdf/at\\_download/file](https://www.arpa.piemonte.it/pubblicazioni-2/pubblicazioni-anno-2015/atex/manuale-tecnico-2015-dicembre.pdf/at_download/file)
- [14] <https://thesis.unipd.it/retrieve/f9c5e09a-3a79-4f54-8acc-372163e77cc0/tesi.pdf>
- [15] Molino Cordero: il 16 luglio Fossano ricorda le cinque vittime dell'esplosione:  
<https://www.cuneocronaca.it/molino-cordero-il-16-luglio-fossano-ricorda-le-vittime-dell-039-esplosione-avvenuta-11-anni-fa>
- [16] La strage del Molino Cordero, per non dimenticare - <https://crpiemonte.medium.com/la-strage-del-molino-cordero-per-non-dimenticare-146efab4f5df>
- [17] Esplosività delle polveri- Il processo di esplosione e i materiali a rischio:  
<https://www.gt-engineering.it/approfondimenti/direttiva-atex-rischio-atex/esplosivita-delle-polveri/>

- [18] ALLISON EHRLICH | Corpus Christi Caller Times : <https://eu.caller.com/story/news/special-reports/building-our-future/throwback/2021/04/07/1981-explosion-ripped-through-corpus-christi-grain-elevator/7090187002/>
- [19] Rischio atmosfere esplosive ATEX - Marigo Marzio: [https://legacyshop.wki.it/documenti/00261249\\_est.pdf?download=true](https://legacyshop.wki.it/documenti/00261249_est.pdf?download=true)
- [20] PETTINATURA ITALIANA S.P.A. : <https://www.samuelesilva.net/blog/2021/01/09/peppinatura-italiana-s-p-a-2/>
- [21] <https://dustsafetyscience.com/textile-industries/>
- [22] Four Men Injured in Dust Explosions at Buenos Aires Cereal Plant : <https://dustsafetyscience.com/dust-explosion-rojas-argentina/>
- [23] Explosion at Singapore Fire System Manufacturer Kills Three Workers: <https://dustsafetyscience.com/potato-starch-explosion-tuas-singapore/>
- [24] Misure tecniche per la prevenzione e la protezione contro le esplosioni da polveri: <https://www.arpa.piemonte.it/arpa-comunica/events/eventi-2015/atex/misure-tecniche-basso.pdf>
- [25] Le esplosioni di polvere nelle attività industriali: misure di prevenzione e protezione – P.Qualizza, P.Fargione: <https://conference.ing.unipi.it/vgr2006/archivio/Archivio/2000/Session3/080.pdf>
- [26] Combustible Dust Explosions in the Grain Industry – Why?: <https://www.fauske.com/blog/explosions-in-the-grain-industry-why>
- [27] Le esplosioni da polvere: casi studio in regione Piemonte: <https://conference.ing.unipi.it/vgr2006/archivio/Archivio/pdf/177-Robotto-Filippetti-Ruggiero-Zonato-Piccinini.pdf>
- [28] [https://en.wikipedia.org/wiki/Tradeston\\_Flour\\_Mills\\_explosion](https://en.wikipedia.org/wiki/Tradeston_Flour_Mills_explosion)
- [29] Flour Dust Explosion: Risk, Disaster, and Prevention: <https://dustsafetyscience.com/flour-dust-explosion/>
- [30] DSS083: Dust Explosion Hazards in Textile Industries: <https://dustsafetyscience.com/textile-industries/>
- [31] Concept Sciences Hydroxylamine Explosion: <https://www.csb.gov/concept-sciences-hydroxylamine-explosion/>
- [32] Prevenzioni esplosioni da polvere attività molitorie: <https://www.certifico.com/sicurezza-lavoro/documenti-sicurezza/64-documenti-enti/12039-prevenzione-esplosioni-da-polvere-attivita-molitorie>
- [33] LE ESPLOSIONI DI GAS, VAPORI E POLVERI: [http://www.puntosicuro.info/documenti/documenti/101122\\_Cardillo\\_Esplosioni\\_Gas\\_Vapori\\_Polyeri.pdf](http://www.puntosicuro.info/documenti/documenti/101122_Cardillo_Esplosioni_Gas_Vapori_Polyeri.pdf)
- [34] EN 1127-1: <https://www.certifico.com/newsletter/archive/view/listid-5-cem4-it/mailid-3380-en-1127-1-2011-prevenzione-e-protezione-contro-l-esplosione-atex-file-cem-pdf>
- [35] Dati densità delle varie sostanze: <https://hapman.com/resources-knowledge/tools/bulk-density-guide/>

- [36] Dati densità delle varie sostanze: <https://www.mpd-inc.com/bulk-density/>
- [37] Dati densità delle varie sostanze: <https://www.aqua-calc.com/page/density-table/substance/flour-coma-and-blank-wheat>
- [38] Dust Safety Science - Combustible Dust Incident Reporting: <https://dustsafetyscience.com/combustible-dust-incident-reporting/>
- [39] Combustible Dust Incident Database: <https://dustsafetyscience.com/incident-reports/>
- [40] Combustible Dust Incident Report for 2021: <https://dustsafetyscience.com/2021-combustible-dust-incident-report/>
- [41] Combustible Dust Incident Report for 2022: <https://dustsafetyscience.com/2022-combustible-dust-incident-report/>
- [42] OSHA - Combustible Dust: An Explosion Hazard: <https://www.osha.gov/combustible-dust>
- [43] OSHA Combustible Dust Poster: <https://www.osha.gov/sites/default/files/publications/OSHA3674.pdf>
- [44] Firefighting Precautions at Facilities with Combustible Dust: <https://www.osha.gov/sites/default/files/publications/OSHA3644.pdf>
- [45] Hazard Alert: Combustible Dust Explosions: <https://www.osha.gov/sites/default/files/publications/OSHA3868.pdf>
- [46] CSB - Combustible Dust Safety: <https://www.csb.gov/combustible-dust-safety>
- [47] Combustible Dust Hazard Investigation: <https://www.csb.gov/combustible-dust-hazard-investigation/>
- [48] CSB Recommendations on Combustible Dust: [https://www.csb.gov/recommendations/?F\\_keyword=combustible%20dust](https://www.csb.gov/recommendations/?F_keyword=combustible%20dust)
- [49] CSB Investigation Reports: <https://www.csb.gov/investigations/>
- [50] Feed & Grain - Combustible Dust Incident Report for 2021: <https://www.feedandgrain.com/news/combustible-dust-incident-report-for-2021-released>
- [51] Dust Safety Science Podcast: <https://dustsafetyscience.com/podcast/>
- [52] Wood and Woodworking Industry and Combustible Dusts: <https://dustsafetyscience.com/wood-working-combustible-dust/>
- [53] Metalworking and Combustible Dusts: <https://dustsafetyscience.com/metalworking-combustible-dust/>
- [54] Food and Agricultural Industries and Combustible Dusts: <https://dustsafetyscience.com/food-agriculture-combustible-dust/>