POLITECNICO DI TORINO

Facoltà di Ingegneria

Corso di Laurea di II Livello in Ingegneria per l'Ambiente e il Territorio

Tesi di Laurea Magistrale

Eventi incidentali da reazione esplosiva di particelle organiche in ambienti confinati: Analisi e Gestione del Rischio ed approfondimenti su un caso di specie

Relatori:

Prof. Mario Patrucco

Prof. Micaela Demichela

Candidato:

Gianluca Bruno

Dicembre 2018

Indice

1. Eventi incidentali da reazione esplosiva di particelle organiche in ambienti confinati: Analisi e Gestione del Rischio ed approfondimenti su un caso di specie 1
1.1 Introduzione 1
1.2 Generalità sui fenomeni di combustione, incendio ed esplosione (tipi di esplosione) 3
1.3 Le reazioni di esplosione di polvere in ambiente confinato 4
1.3.1 Incendio in ambiente confinato 4
1.3.2 Pentagono dell'esplosione di polvere 5
1.3.3 Esplosioni primarie e secondarie 5
1.3.4 Pressione massima e velocità massima di aumento della pressione durante un'esplosione. 6
Energia minima di innesco (MIE) 7
1.3.5 Temperatura di autoaccensione 7
1.3.6 Turbolenza 8
1.3.7 Polveri brucianti senza fiamma 8
1.4 Le possibili cause di formazione delle miscele con concentrazione superiore al LEL 8
1.4.1 Limiti di esplosività 9
1.5 Le possibili "prevention mesaures" sulla formazione di miscele esplodibili (sistemi di monitoraggio, allarme e intervento preventivo automatici – tele monitoraggio e monitoraggio manuale) – aspetti tecnici, organizzativi e procedurali in PtD e Gestione in Qualità 10
1.6 Inneschi e possibile gestione (do) 13
1.6.1 Sorgenti di innesco 13
1.6.2 Classificazione delle aree a rischio esplosione 14
1.6.3 Inertizzazione 15
1.6.4 Hazard Identification 15
1.6.5 Checklist 16
1.6.6 What If 16
1.6.7 HazOp 17
1.6.8 FTA 17
2 Infortuni e riferimenti normativi 19
2.1 Gli eventi infortunistici collegati ad esplosioni di polveri in ambiente confinato: risultati di una ricerca bibliografica su banche dati nazionale (INAIL) e estere 20
2.1.1 INAIL-Infor.MO 20
2.1.2 OSHA 20
2.1.3 HSE 21
2.2 Il quadro normativo 21
2.2.1 D.lgs.81/2008 22
2.2.2 D.lgs.85/2016 25
2.3 La tecnica CCCP (Computer Aided Cause Consequence for Prevention) per l'approfondimento di analisi infortuni e definizione delle misure di prevenzione 27
3 Il caso di specie: esplosione di polveri organiche in mulino 29
3.1 Casi storici di esplosioni da polveri nell'industria 29

3.2 Casi di esplosioni di polveri di cereali 34
3.3 Il Molino Cordero 37
3.4 Analisi del contesto 39
3.4.1 Stabilimento 39
3.4.2 Numero di lavoratori e mansioni 43
3.4.3 Processo di produzione delle farine 44
3.4.4 Materie prime e prodotti 50
3.5 Analisi dell'evento 52
3.5.1 Dinamica dell'incidente 53
3.5.2 Danni esplosione e incendio 55
3.5.3 Infortuni mortali/feriti 60
3.6 Definizione delle problematiche riscontrate nella valutazione del rischio 61
3.6.1 Sentenza e colpevoli 62
3.7 Discussione delle misure di prevenzione atte a evitare ripetizione di eventi analoghi 63
3.7.1 Analisi di rischio 63
3.7.2 Documento di protezione contro le esplosioni(DPE) 64
3.7.3 Risultati CCCP 65
3.7.4 Misure di protezione 88
4 Conclusioni 91
5 Bibliografia 94

1. Eventi incidentali da reazione esplosiva di particelle organiche in ambienti confinati: Analisi e Gestione del Rischio ed approfondimenti su un caso di specie

1.1 Introduzione

Le particelle organiche come farina, zucchero, amido vengono considerate difficilmente materiali e prodotti pericolosi, anzi nella maggior parte dei casi vengono visti come innocui.

In ambiente confinato purtroppo, se in quantità e condizioni ambientali particolari, una polvere combustibile è in grado di reagire con l'ossigeno, se innescata, e per reazione di combustione generare gas e vapori caldi che innalzano la pressione all'interno dell'ambiente dando luogo ad un'esplosione.

Per questo motivo nella storia dell'industria, eventi incidentali dovuti ad esplosioni di particelle organiche si sono verificati in maniera frequente e continua nel tempo e con effetti importanti a causa degli infortuni e le morti occorse ai lavoratori, oltre alle perdite economiche dovuta alla distruzione degli impianti e alle strutture.

Il motivo d'interesse che mi ha portato ad analizzare questo tipo di eventi, è che ancora oggi non esistono prescrizioni e linee guida precise per evitare che incidenti di tipo esplosivo si verifichino nuovamente. Inoltre il fatto che un materiale comune come la farina possa provocare delle atmosfere esplosive fa sì che nascano delle carenze riguardanti la sicurezza sul lavoro in attività molitorie o più in generale in attività con presenza di polveri combustibili.

L'obiettivo della tesi è di individuare le cause generali di tali eventi esplosivi nelle industrie alimentari cerealicole di lavorazione e deposito di granaglie e farine, focalizzando l'analisi su un caso particolare accaduto in Italia in un molino piemontese; in questo modo si determinano i metodi di prevenzione ottimali al fine di evitare che eventi simili accadano nuovamente e valutare i metodi migliori di gestione del rischio che si riscontrano in queste attività.

Il lavoro è stato sviluppato partendo dalle caratteristiche delle polveri e dai parametri che caratterizzano un'esplosione in generale, proseguendo con l'analisi degli infortuni e della normativa italiana di riferimento per le atmosfere esplosive.

La fase successiva è stata sviluppata sul caso dell'esplosione del Molino Cordero.

Il lavoro è stato svolto principalmente attraverso una ricerca bibliografica e in banche dati nazionali e internazionali di incidenti ed eventi simili a quello in esame. Diversi articoli scientifici, che trattano elementi in comune rispetto all'argomento delle esplosioni di polveri combustibili, sono stati utili per valutare la situazione attuale sulla sicurezza in attività molitorie e quella del Molino Cordero.

Inoltre con l'utilizzo di un software progettato per la prevenzione e lo studio degli infortuni sul luogo di lavoro, impiegato e progettato dal Politecnico di Torino, è stato possibile analizzare le cause dell'incidente e gli interventi tecnici e organizzativi per evitare che casi rilevanti come quello osservato non si verifichino più e cercando di approfondire in modo più specifico possibile le migliori procedure di adeguamento della sicurezza che i datori di lavoro devono sviluppare all'interno delle proprie aziende.

1.2 Generalità sui fenomeni di combustione, incendio ed esplosione (tipi di esplosione)

La combustione in aria è definita come una reazione chimica di ossidazione esotermica, autosostenentesi, di una sostanza ossidabile che si combina con l'ossigeno dell'aria, solitamente accompagnata da una fiamma visibile.

La reazione, affinché avvenga, necessita di tre condizioni in contemporanea:

- Presenza di combustibile, cioè la sostanza che viene ossidata;
- Presenza di comburente, cioè l'aria contenente l'ossigeno;
- Sorgente di innesco, cioè l'energia necessaria a far prendere il via la reazione.

Una reazione di combustione che avviene in modo incontrollata viene definita incendio od esplosione.

Dal punto di vista chimico e fisico i due fenomeni sono la stessa cosa, tranne per il fatto della velocità di espansione dei prodotti della combustione e dell'interferenza esercitata dall'ambiente in cui la reazione ha luogo.

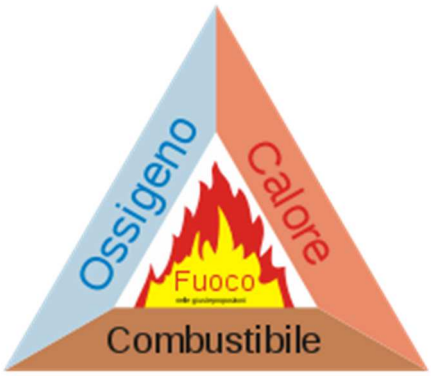

Figura 1 Triangolo del fuoco [1]

L'esplosione quindi *"è il rapido rilascio d'energia cui segue la rapida espansione di gas che provoca un'onda di pressione. Può essere meccanica ossia dovuta alla rottura di un recipiente in pressione, oppure può essere il risultato di una reazione chimica rapida"*. [2]

Si distinguono diversi tipi di esplosione:

- Esplosione meccanica: a seguito della rottura di un recipiente in pressione che contiene un gas inerte.
- Esplosione confinata: avviene in un edificio o in un recipiente. Il confinamento provoca un aumento significativo di pressione.
- Esplosione non confinata: si verifica all'aperto per il rilascio di gas o vapori infiammabili a seguito di una reazione di natura esplosiva.
- Esplosione da metallo fuso: nasce per il contatto tra metallo allo stato fuso e acqua, la differenza di temperatura tra le due sostanze provoca l'esplosione.
- Esplosione da polveri: si verifica per l'ossidazione di polveri fini disperse in aria.

Le esplosioni sono caratterizzate da due tipi di fenomeni: la deflagrazione e la detonazione.

Prima di tutto occorre definire il fronte di fiamma, cioè lo strato di miscela nella quale avvengono le reazioni di combustione. Di esso si analizza la velocità di propagazione, cioè come si muove attraverso la miscela gassosa rispetto ad un sistema di riferimento fisso. A seconda che la velocità sia subsonica o supersonica si hanno due fenomeni differenti.

La deflagrazione è un'esplosione che avviene con fronte di fiamma a velocità subsonica.

La detonazione è un'esplosione che avviene con fronte di fiamma supersonico, ciò provoca onde di compressione che si propagano nel combustibile precedendo il fronte della reazione

1.3 Le reazioni di esplosione di polvere in ambiente confinato

Un ambiente confinato è uno spazio circoscritto, caratterizzato da limitate aperture di accesso e da una ventilazione naturale sfavorevole, in cui può verificarsi un evento incidentale importante, che può portare ad un infortunio grave o mortale, in presenza di agenti chimici pericolosi (ad esempio, gas, vapori, polveri).

1.3.1 Incendio in ambiente confinato

Nel caso dei fenomeni di combustione l'ambiente confinato influisce sulla velocità di propagazione. In generale le fasi di un incendio in ambiente confinato sono le seguenti:

- Fase di ignizione o accensione, cioè l'innesco in cui inizia l'incendio;
- Prima propagazione o "pre-flashover", fase in cui l'incendio è ristretto alla zona di accensione e l'aumento di temperatura dipende dal carico d'incendio presente in quell'area, cioè dalla quantità di materiale combustibile. In questa fase è possibile l'interruzione della combustione e evitando la propagazione dell'incendio;
- Flash-over, fase in cui l'incendio è completamente sviluppato, cioè tutto il materiale combustibile nell'ambiente inizia a partecipare alla reazione, da questo momento in poi l'aumento di temperatura dell'ambiente raggiunge il suo massimo;
- Incendio generalizzato, l'intero ambiente è coinvolto dall'incendio, in questa fase la temperatura si stabilizza;
- Estinzione, avviene a causa della carenza di sostanze combustibili o di comburenti all'interno dell'ambiente, ciò provoca l'abbassamento di temperatura dei fumi e dell'ambiente stesso

In questo modo la temperatura aumenta più velocemente che in ambiente privo di confinamento, lo stesso vale per la pressione, infatti se il grado di confinamento è elevato, le conseguenze sono un aumento repentino di questo parametro che possono sfociare in un'esplosione. Le esplosioni da polveri avvengono in presenza di polvere combustibile dispersa in aria a seguito di un innesco sufficientemente energetico

1.3.2 Pentagono dell'esplosione di polvere

I casi di combustione in presenza di polveri che provocano esplosione sono tipici delle industrie manifatturiere, alimentari, dei metalli, farmaceutiche in quanto la presenza di sostanze combustibili aerodisperse è più frequente.

I fenomeni di questo tipo avvengono in condizioni specifiche. Infatti sono necessarie tutte le caratteristiche di formazione di un incendio, riassunte nel triangolo del fuoco, ma con l'aggiunta ulteriore di due requisiti, ed è per questo che si parla di "pentagono dell'esplosione".

I 5 costituenti sono [3]:

1) Combustibile
2) Comburente
3) Sorgente di innesco
4) Miscelazione di comburente e combustibile nelle giuste quantità
5) Confinamento della miscela

Figura 2 Pentagono del fuoco [1]

Le polveri di conseguenza devono essere combustibili e miscelate in aria con una certa concentrazione, in modo che essa possa propagarsi una volta innescata. Il confinamento provoca l'aumento di pressione dei prodotti della combustione e pertanto incrementa le conseguenze dell'esplosione.

1.3.3 Esplosioni primarie e secondarie

Un elemento che contraddistingue le polveri è la capacità di dar luogo a due eventi distinti: l'esplosione primaria e secondaria.

L'esplosione primaria è causata dall'innesco della polvere aerodispersa, provocando di conseguenza onde di pressione che movimentano l'aria dell'ambiente circostante, formando moti turbolenti e convettivi in grado di sollevare l'ulteriore polvere depositata nell'ambiente. Di conseguenza l'esplosione secondaria, molto spesso di entità maggiore avviene per la combustione delle polveri risollevate in precedenza, come si può vedere in Figura 1.

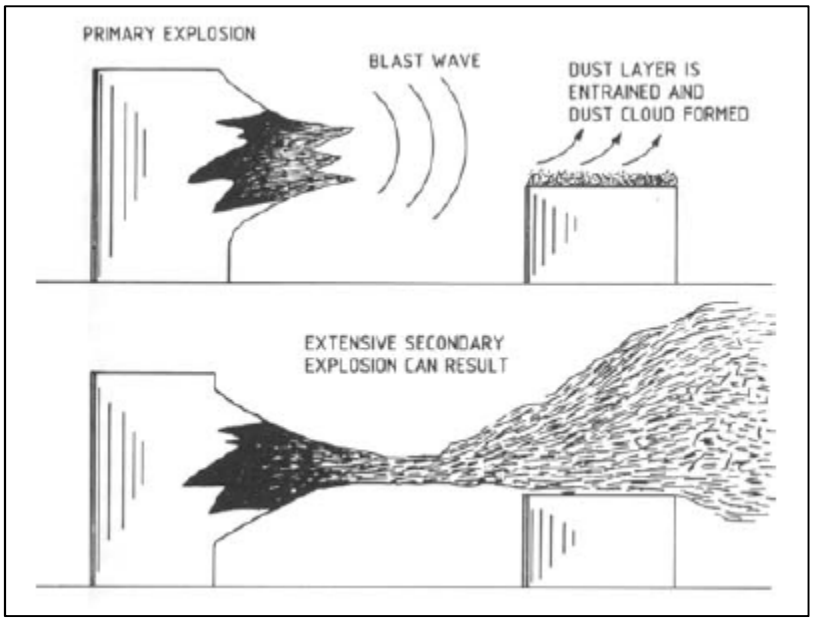

Figura 3 Esplosione primaria e secondaria [2]

1.3.4 Pressione massima e velocità massima di aumento della pressione durante un'esplosione

Le esplosioni di gas e polveri possono essere analizzate attraverso delle prove sperimentali per ricavare dei parametri indicanti la velocità di reazione di un'atmosfera esplosiva e quindi di poter confrontare la potenza delle esplosioni in funzione del tipo di polvere o gas combustibile.

Le prove vengono effettuate in ambiente chiuso utilizzando diversi strumenti in funzione della normativa di riferimento seguita. Lo standard ASTM E 1226-12a e la UNI-EN 26184 sono le norme di riferimento per valutare questi parametri.

Questi strumenti permettono di ricavare:

- Indice di esplosione p_m: è la massima pressione raggiunta nel corso dell'esplosione; [4]
- Indice di esplosione k_m: è la massima velocità di aumento della pressione $(dp/dt)_m$ riferito ad un recipiente di prova con volume di 1 m^3 [5]

Nota la dipendenza di questi indici dalla concentrazione di polvere, la norma UNI EN 26184 parte 1, introduce due nuovi indici di esplosione in funzione della concentrazione di polvere p_{max} e k_{max}. In altri casi si caratterizza la miscela con indici di pericolosità di ogni polvere rispetto ad una polvere combustibile campione, negli Stati Uniti per esempio il Bureau of Mines utilizza come riferimento la polvere di carbone di Pittsburgh, creando un Indice di Esplosività (IE)

$$IE = IS \cdot ES$$

dove IS è la sensibilità all'innesco,

$$IS = \frac{(T\ min.d'ignizione \cdot en.min.d'innesco \cdot Conc.min.esplodibile)_{combustibile\ di\ riferimento}}{(T\ min.d'ignizione \cdot en.min.d'innesco \cdot Conc.min.esplodibile)_{campione\ in\ esame}}$$

e ES la violenza dell'esplosione,

$$ES = \frac{\left(maxP \cdot max\frac{dP}{dT}\right)_{campione\ in\ esame}}{\left(maxP \cdot max\frac{dP}{dT}\right)_{combustibile\ di\ riferimento}}$$

I valori di pressione massima all'interno di ES, sono relativi a prove di laboratorio con concentrazione di polvere di 500 g/m^3.

Se i valori di IE sono maggiori di 1 il pericolo e la violenza dell'esplosione è superiore rispetto al campione di riferimento.

Energia minima di innesco (MIE)

L'energia minima d'innesco(MIE[1]) è l'energia necessaria affinché la reazione a catena, di combustione delle polveri, si avvii. Il valore espresso in unità di misura relativa all'energia può variare in funzione di differenti parametri. In particolare varia in funzione della concentrazione di polvere, con l'andamento a "vasca di bagno" o più precisamente con una relazione parabolica [6].

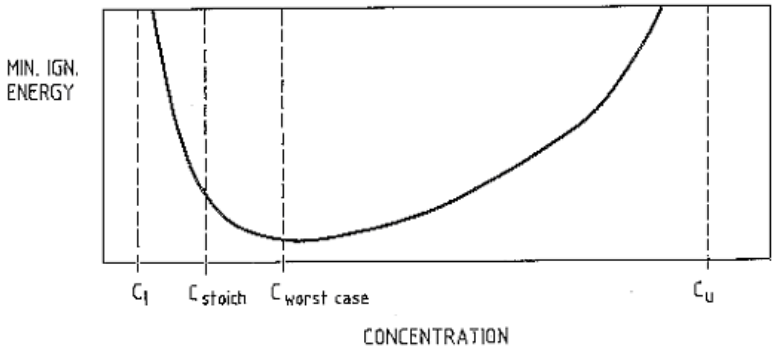

Figura 4 Andamento MIE in funzione della concentrazione di polvere [2]

In prossimità della quantità stechiometrica l'energia tende a diminuire raggiungendo quasi il valore minimo, per poi incrementare notevolmente in corrispondenza dei due limiti di esplodibilità LEL[2] e UEL.

La concentrazione di comburente essendo parte fondamentale della reazione, influisce sull'innesco della miscela.

1.3.5 Temperatura di autoaccensione

La temperatura di autoaccensione è la temperatura minima per la quale una miscela combustibile-comburente si innesco senza aiuto di fonti di energia esterne. Per quanto riguarda le polveri esistono due tipi di temperatura, la prima relativa alle nubi di polvere (MIT[3]), mentre la seconda per gli strati di polvere depositati (LIT[4]). Sperimentalmente sono identificate attraverso il

[1] Minimum Ignition Energy.
[2] Lower Explosion Limt e Upper Explosion Limit, che verranno trattati nel capitolo 1.4.1.
[3] Minimum Autoignition Temperature of a Dust Cloud.
[4] Hot Surface Ignition Temperature of a Dust Layer.

recepimento di diverse norme tecniche e con strumenti e condizioni differenti per questo motivo non sono da utilizzare come valori fondamentali ma solo in modo indicativo.

La temperatura di autoaccensione è influenzabile da diversi fattori, tra i quali, il contenuto d'umidità nell'aria, dalle condizioni di dispersione in aria della miscela, e dalle condizioni al contorno.

1.3.6 Turbolenza

La turbolenza può influenzare in maniera differente la combustione a seconda della fase della reazione in cui agisce. Per esempio esiste una turbolenza precedente alla reazione, che può essere generata da mezzi meccanici, spostamenti d'aria, ventilatori e lavorazioni, oppure una seconda di maggiore intensità provocata dall'esplosione primaria che provoca lo spostamento delle polveri depositate, formando una nube di polvere ben miscelata che intensifica la propagazione della combustione. Infatti la fiamma si propaga più velocemente se la nube ha alto grado di turbolenza con il risultato di un'esplosione più violenta [6].

D'altra parte se il grado di turbolenza della nube è basso, può accadere che il calore rilasciato dall'innesco rimanga concentrato in un punto senza propagarsi e dare luogo all'esplosione.

Nel secondo caso succede il contrario, poiché le polveri risollevate diventano una sorgente secondaria di esplosione, incrementando l'intensità della reazione e la sua propagazione nell'ambiente.

1.3.7 Polveri brucianti senza fiamma

Le polveri combustibili che si stratificano su una superficie, se innescate, invece di creare un'esplosione o un incendio, possono bruciare lentamente, questo fenomeno è detta combustione a brace. È un processo che si auto alimenta attraverso il calore generato dalla brace stessa senza la propagazione di fiamme libere. In funzione del moto di diffusione dell'ossigeno attraverso gli strati di polvere e dalle condizioni al contorno, come l'apporto di aria attraverso fenomeni di convenzione naturale o forzata, la reazione può sfociare successivamente in un incendio, aumentando la sua velocità di propagazione e quindi rendendo più difficile il controllo e il confinamento ad un'area ristretta. Il valore di LIT si riferisce appunto all'innesco di questi strati di polvere.

1.4 Le possibili cause di formazione delle miscele con concentrazione superiore al LEL

In un ambiente di lavoro in cui il processo industriale provoca la formazione di atmosfere esplodibili è necessario analizzare le cause per poter agire in prevenzione ed evitare che si formino situazioni di pericolo per i lavoratori.

Un'atmosfera risulta esplosiva se sottoposta ad una sorgente d'innesco ad energia sufficiente da dar luogo ad una reazione di combustione repentina che in funzione del grado di confinamento provoca un aumento improvviso di pressione a causa dei prodotti di reazione.

1.4.1 Limiti di esplosività

La miscela di aria e polvere combustibile, affinché formi un'atmosfera esplosiva, deve essere mescolata in modo da far ricadere la concentrazione di polvere in un certo intervallo, questo range si definisce "intervallo di esplodibilità". Esso è caratterizzato da un limite inferiore e un limite superiore.

Il limite inferiore è la concentrazione minima di combustibile in grado di rendere la miscela esplosiva e rendere la combustione sostenibile. Al di sotto di questo termine le particelle di polvere sono troppo distanti tra loro non permettendo al calore prodotto dalla reazione di combustione delle singole particelle di propagarsi anche a quelle adiacenti.

Il limite superiore di esplodibilità indica la concentrazione massima di polvere per cui è presente un'atmosfera esplosiva, superato il valore, la concentrazione di ossigeno risulta troppo bassa per permettere una combustione, di conseguenza non si sviluppa calore e la reazione non avviene.

Per quanto riguarda le polveri, a differenza dei gas, i limiti superiori non vengono utilizzati come riferimento, poiché sono di difficile determinazione a livello sperimentale.

I valori di LEL e UEL sono influenzati da diversi parametri, di seguito sono analizzati i principali.

Le dimensioni delle particelle influiscono sulla concentrazione minima esplodibile che si riduce al diminuire della dimensione delle particelle. In alcuni casi tuttavia è possibile che le particelle più fini si aggreghino tra di loro e, una volta superata la dimensione di 500 μm, diventare non combustibili [6].

La passivazione, che avviene sullo strato superficiale dei grani, diminuisce la capacità di reagire con l'aria e quindi il limite inferiore aumenta.

L'aumento di temperatura fa sì che aumenti la reattività del solido poiché il delta tra la temperatura di autoaccensione del combustibile e quella iniziale diminuisce. La presenza di gas inerti, come CO_2 e N_2 riduce il limite superiore di esplodibilità del combustibile mantenendo pressoché costante quello inferiore.

Al diminuire della granulometria la pressione massima e la velocità massima di aumento della pressione subiscono un incremento, il LEL e l'energia minima di innesco si riducono.

Un aumento del tenore di ossigeno favorisce la formazione di un'atmosfera esplodibile con maggiore efficacia di reazione e maggiore violenza del fenomeno esplosivo, al contrario una riduzione di ossigeno nell'aria, anche a seguito di inertizzazione, rallenta il decorso della combustione e diminuisce l'intervallo di infiammabilità. Il fuoco in generale è sostenuto solo se la concentrazione di ossigeno è maggiore del 10% [6].

1.5 Le possibili "prevention mesaures" sulla formazione di miscele esplodibili (sistemi di monitoraggio, allarme e intervento preventivo automatici – tele monitoraggio e monitoraggio manuale) – aspetti tecnici, organizzativi e procedurali in PtD e Gestione in Qualità

Le polveri combustibili possono essere trattate in ambiente di lavoro come degli inquinanti o meglio come perdite di energia durante la produzione, infatti possono derivare da scarti di lavorazioni, attriti, urti, comminuzione.

Le misure da adottare devono essere prodotte già in fase di progettazione dell'impianto o della lavorazione, questo perché devono essere garantite le condizioni di sicurezza già all'origine, questo metodo è definito come "Prevention through design", ed è uno dei capisaldi della direttiva europea relativa alla sicurezza e salute sul lavoro 89/391/CE e del NIOSH (National Institute for Occupational Safety and Health) che lo ha introdotto.

Di conseguenza analizzando la lavorazione e il tipo di attività si agisce sulla formazione degli inquinanti già in fase di progettazione.

A seconda del tipo di materiale la pericolosità varia, ma in generale i metodi da adottare sono i seguenti:

- Intervento sul fattore di pericolo;
- Controllo dell'emissione di polveri (interventi sulla formazione di inquinanti);
- Controllo sulla dispersione nell'ambiente di lavoro;
- Gestione dell'inquinante nell'ambiente di lavoro (diluizione e sostituzione dell'aria;
- Ambienti di lavoro speciali (per esempio controllo remoto, tele monitoraggio).

L'intervento sul fattore di pericolo implica, se possibile, l'utilizzo di materie prime in grado di emettere meno o addirittura nessun inquinante. Se tutto ciò non è immaginabile si utilizzano pre-trattamenti in grado di modificare la capacità della materia prima di generare polvere. La bagnatura è utilizzata con lo scopo di diminuire la polverosità, ma in molti casi non risulta sufficiente, poiché agisce sulla superficie esterna e in caso di un ulteriore frantumazione il problema si ripresenta.

Un'alternativa alla bagnatura è l'utilizzo di macchine, attrezzature e procedure che implicano una generazione di polvere inferiore. Utilizzando lavorazioni ad umido, invece che a secco, strumenti di comminuzione adatti a evitare ulteriori fratture dei grani e strumenti in grado di incrementare l'efficienza degli impianti.

La manutenzione delle macchine e delle attrezzature di lavoro risulta fondamentale, stabilito un piano di gestione e manutenzione in modo accurato e in qualità garantendo un rendimento dell'impianto costante nel tempo, e quando non più possibile, attivarsi per la ricerca di nuove soluzioni impiantistiche di miglioramento.

La seconda azione da svolgere, nel caso il fattore di pericolo non venga eliminato consiste nell'agire sulla formazione delle polveri ed annullare la dispersione nell'ambiente di lavoro o, in alternativa, confinarla nelle immediate vicinanze della sorgente.
Per esempio un metodo utilizzato soprattutto in ambito minerario è la bagnatura per mezzo di ugelli in azione nel punto di impatto del materiale. Un altro sistema consiste nel confinamento fisico della sorgente di emissione per mezzo di cappe chiuse dove la polvere viene aspirata e trattata a valle. Il rischio principale è la potenziale formazione di atmosfere esplosive in quel tratto di condotto precedente al trattamento, di conseguenza è necessario monitorare le concentrazioni di polvere ed eventualmente agire con sistemi in grado di eliminare le sorgenti d'innesco o l'utilizzo di gas inertizzanti. L'impianto di captazione deve essere progettato in modo da includere l'aspirazione completa di tutte le polveri.
Il terzo punto consiste nell'intervento sull'ambiente di lavoro sull'eventuale polvere dispersa sfuggita alle azioni preventive precedenti. Il principale problema delle polveri combustibili non è l'immediata formazione di nubi di polvere, ma la successiva sedimentazione sulle superfici, poiché a seguito di moti d'aria turbolenti si generano nuove sorgenti di emissione e, nel caso peggiore, causa di esplosioni secondarie. I metodi principali di prevenzione sono gli impianti di ricambio dell'aria, che attraverso sistemi di ventilazione e aspirazione movimentano verso tubazioni di captazione e successivo trattamento le polveri nell'ambiente. In secondo luogo è necessario prevedere la pulizia sistematica dell'ambiente di lavoro e delle attrezzature, delle procedure di gestione delle emergenze nell'eventualità di dispersioni accidentali e i possibili guasti agli impianti di aspirazione grazie all'utilizzo di mezzi di monitoraggio.
L'ultima alternativa possibile è intervenire sulla salvaguardia della salute dei lavoratori con soluzioni lavorative differenti che impediscano il contatto con le polveri prodotte. Un esempio è l'utilizzo del telecomando e telecontrollo dell'impianto dall'esterno, per mezzo di cabine isolate dall'esterno e dotate di ventilazione propria, in modo da permettere lo svolgimento dell'attività azzerando il fattore di contatto.
In primo luogo è necessario caratterizzare il tipo di polvere combustibile utilizzata dall'attività lavorativa e il suo comportamento in funzione delle peculiarità ambientali e di contorno, procedendo quindi ad un'analisi di struttura e di contesto [2].
In seguito occorre esaminare le polveri prodotte dalle lavorazioni e ricavare i dati analitici attraverso dei database o da ricerche bibliografiche, oppure se l'attività è già avviata con prove analitiche sulle polveri di tipo specialistico. [7]
Le prove necessarie più importanti sono:

- Prove di esplosività e di infiammabilità, in grado di fornire per esempio la sensibilità all'innesco e il suo comportamento al fuoco differenziando se in caso di incendio si propaga la fiamma lontano dalla sorgente di accensione o meno;
- Minima concentrazione esplodibile;
- Prove di caratterizzazione chimica, in cui viene analizzata la struttura, il bilancio di ossigeno, granulometria, umidità…;
- Prove di stabilità termica;
- Prove sulla minima energia di innesco (MIE)

Una volta caratterizzato preventivamente la polvere, si ricercano i valori della massima velocità di aumento della pressione (dP/dt_{max}), indicatore della potenza esplosiva di un certo combustibile e di conseguenza utile per la successiva progettazione dei sistemi di protezione.

Una volta analizzate le caratteristiche della polvere è necessario programmare le azioni di prevenzione per evitare un'esplosione.

Le possibili Prevention Mesaures applicabili in un caso di possibile formazione di atmosfera esplosiva sono:

- Eliminazione delle possibili sorgenti d'innesco;
- Inertizzazione in modo da ridurre la concentrazione di comburente abbassandola sotto la concentrazione minima di ossigeno necessaria alla reazione;
- Verificare l'idoneità dell'impianto elettrico, in modo che sia conforme e verifica di tutto l'impianto di messa a terra per evitare l'accumulo di energia elettrostatica in grado di scaturire in un innesco;
- Classificazione delle aree in cui possono formarsi atmosfere esplosive secondo l'Allegato XLIX D.lgs. 81/2008;
- Mantenere pulito l'ambiente di lavoro evitando di creare, nel caso siano presenti polveri depositate, moti d'aria turbolenti in grado di sollevare e disperdere le polveri;
- I condotti di trasporto delle polveri devono essere progettati in modo da evitare la formazione di zone di deposito provocate dal rallentamento del flusso della miscela polverulenta in prossimità di curva e derivazioni; [8]
- Manutenzione periodica di tutto l'impianto e dei sistemi di trattamento della polvere come filtri e attuatori;
- Utilizzare sistemi di stoccaggio ad umido;
- Il materiale depositato in siti di stoccaggio deve essere in condizioni di non liberare energia a causa di fenomeni di decomposizione;

- I locali adibiti allo stoccaggio devono essere privi di sorgenti di calore quali motori termici o elettrici e non superare mai la temperatura di 50 °C;
- Progettare sistemi di prevenzione antincendio sia fissi che manuali in grado di agire in caso di emergenza o guasto.

1.6 Inneschi e possibile gestione (do)

La letteratura sulle esplosioni indica un elevato numero di possibili inneschi, come si può notare dai capitoli precedenti. Il fenomeno esplosivo affinché si verifichi necessita di una sorgente di energia rilevante per l'attivazione della reazione di combustione, di conseguenza nella valutazione dei rischi e nella gestione del rischio residuo deve essere tenuto conto dell'eliminazione di qualsiasi sorgente d'innesco.

1.6.1 Sorgenti di innesco

Parlando di energia di innesco, si analizzano diversi tipi di sorgenti d'innesco in grado di provocare un'esplosione in campo industriale, di seguito se ne fa un elenco non esaustivo:

- Fiamme libere: spesso utilizzate per lavorazioni a caldo sono in grado di innescare una nube di polvere per le temperature superiori all'energia minima di innesco.
- Saldature e taglio: lavorazioni tipiche dell'industria dei metalli ma soprattutto degli interventi di manutenzione, generano particelle incandescenti che possono innescare le reazioni esplosive.
- Particelle incandescenti: prodotte da diverse lavorazioni hanno temperatura in grado di provocare la combustione di polveri aerodisperse
- Superfici calde: sono inneschi efficaci per le polveri se la temperatura delle superfici è pari alla temperatura di autoaccensione del combustibile. Gli esempi più comuni sono le superfici di motori elettrici, termici, e tubazioni. Preventivamente è necessario mantenere un margine di sicurezza tra la temperatura minima di accensione e la superficie calda. La norma di riferimento UNI EN 1127-1 indica che questa non deve superare i 2/3 della MIT. Per gli strati di polvere fino a 5 mm, la temperatura deve essere inferiore a 75°C rispetto alla temperatura di accensione dello strato [3];
- Scintille elettriche ed elettrostatiche: possono formarsi per guasti dell'impianto elettrico oppure per il caricamento elettrostatico di attrezzature e materiale non conduttrici. Molto pericolose e in grado di rilasciare l'energia necessaria ad innescare il fenomeno esplosivo. È necessaria la messa a terra di tutte le parti che presentano il rischio di accumulo di carica. Per quanto riguarda i lavoratori è obbligatorio l'utilizzo di calzature antistatiche ed evitare l'utilizzo di materiali a bassa conducibilità elettrica;
- Attrito o urto: è generato tra due corpi e provoca l'aumento della temperatura superficiale di essi fino a creare eventuali scintille o particelle incandescenti in caso di urto. Sorgenti

esterne (fulmini) le fulminazioni possono essere molto pericolose se non presenti gli impianti di messa a terra di strutture e macchinari e siti di stoccaggio.

1.6.2 Classificazione delle aree a rischio esplosione

In base a quanto citato nel D.Lgs.81/2008, il datore di lavoro nel valutare il rischio esplosione deve individuare:

- Probabilità e durata della presenza di atmosfere esplosive, cioè la classificazione delle aree;
- Probabilità che le fonti di innesco siano attive;
- Caratteristiche degli impianti, sostanze utilizzate, processi e loro possibili interazioni;
- Entità degli effetti prevedibili

La classificazione delle aree a rischio esplosione è descritta all'Allegato XLIX del D.Lgs.81/08. Le zone sono sei, di cui tre sono relative alla formazione di miscele di arie e sostanze in forma di gas, vapori o nebbie, le successive tre si riferiscono alle polveri combustibili.

In Tabella 1 sono definite le diverse zone:

Tabella 1 Classificazione aree a rischio esplosione

ZONA 0	*Area in cui è presente in permanenza o per lunghi periodi o frequentemente un'atmosfera esplosiva consistente in una miscela di aria e di sostanze infiammabili sotto forma di gas, vapore o nebbia.*
ZONA 1	*Area in cui la formazione di un'atmosfera esplosiva consistente in una miscela di aria e di sostanze infiammabili sotto forma di gas, vapore o nebbia, è probabile che avvenga occasionalmente durante le normali attività.*
ZONA 2	*Area in cui durante le normali attività non è probabile la formazione di un'atmosfera esplosiva consistente in una miscela di aria e di sostanze infiammabili sotto forma di gas, vapore o nebbia o, qualora si verifichi, sia unicamente di breve durata.*
ZONA 20	*Area in cui è presente in permanenza o per lunghi periodi o frequentemente un'atmosfera esplosiva sotto forma di nube di polvere combustibile nell'aria.*
ZONA 21	*Area in cui la formazione di un'atmosfera esplosiva sotto forma di nube di polvere combustibile nell'aria, è probabile che avvenga occasionalmente durante le normali attività.*
ZONA 22	*Area in cui durante le normali attività non è probabile la formazione di un'atmosfera esplosiva sotto forma di nube di polvere combustibile o, qualora si verifichi, sia unicamente di breve durata.*

Sono considerati in grado di formare atmosfere esplosive gli strati, depositi o cumuli di polvere combustibile.

Per quanto riguarda le attrezzature di lavoro, il datore di lavoro deve garantire l'idoneità per le atmosfere a rischio esplosione. L'Allegato L del D.lgs.81/08 suddivide tre categorie a cui corrispondono tre livelli di protezione dell'attrezzatura:

- Categoria 1: obbligatorio per le zone 20, mentre facoltativo per 21 e 22, hanno livello di protezione molto elevato;
- Categoria 2: obbligatorio per le zone 21 e facoltativo per le 22, hanno livello di protezione elevato;
- Categoria 3: obbligatorio per le zone 22 e hanno livello di protezione normale;

1.6.3 Inertizzazione

Il metodo più utilizzato per la prevenzione delle esplosioni è l'inertizzazione, nella maggior parte dei casi per la messa in servizio o fuori servizio delle attrezzature.

L'utilizzo di gas inerti in atmosfera come N_2 e CO_2 o polveri inertizzanti permette di variare le concentrazioni di ossigeno e rispettivamente dei limiti di infiammabilità o di esplosività dei combustibili.

Esistono diversi tipi di inertizzazione con gas, le principali sono e vengono riportate dalla Direttiva 14/34/CE:

- Inertizzazione a vuoto, cioè il processo in cui viene creato il vuoto nell'apparecchiatura e in seguito inserire il gas inerte a sostituzione;
- Inertizzazione per spostamento, in cui il flusso di gas inerte è continuo;
- Inertizzazione per mezzo di diagrammi di infiammabilità, ogni atmosfera esplosiva o infiammabile presenta in funzione del combustibile un campo di infiammabilità ricavabile su dei diagrammi in modo da evitare di raggiungere quelle concentrazioni. Dai diagrammi di infiammabilità, è inoltre possibile individuare la concentrazione minima di ossigeno (LOC[5]).

Nei casi in cui l'inertizzazione non è sufficiente ad eliminare la possibilità di esplosione, essa può essere utile per limitare il valore di k e aumentare la minima energia d'innesco. L'inertizzazione con utilizzo di inerti solidi o liquidi è utilizzata sia per prevenire l'esplosione sia come mezzo di mitigazione e controllo.

1.6.4 Hazard Identification

Le misure di prevenzione dell'innesco sono fondamentali, ancora di più è l'individuazione delle possibili situazioni di pericolo in cui essi possono formarsi, per questo motivo è necessario utilizzare delle tecniche di Hazard Investigation adatte al contesto dell'attività lavorativa per

[5] Lower Oxygen Concentration

individuare tutti i fattori di pericolo relativi alla presenza di atmosfere esplosive, valutare e calcolare il rischio, e successivamente gestire il rischio residuo.

Bisogna tener comunque conto che prima di tutto deve essere fatta l'analisi della sicurezza in condizioni operative normali, con l'utilizzo di una Job Safety Analysis, e solo in seguito procedere con i metodi seguenti.

Per esempio, le tecniche di identificazione del pericolo consigliate, nell'ambito delle lavorazioni con presenza di polveri di alluminio, [4] in condizioni di potenziale atmosfera esplosiva sono le seguenti: Checklist, What If; HazOp e Fta.

1.6.5 Checklist

L'analisi attraverso liste di controllo o Checklist consiste in una lista di domande riguardanti lo stato di sicurezza di un sistema. I quesiti possono essere più o meno specifici in funzione del grado di dettaglio che si vuole raggiungere, in genere si parte con le domande più generali fino a quelle più dettagliate e specifiche. Le liste di controllo fanno principalmente riferimento alle leggi, alle norme tecniche e allo sviluppo tecnologico. È fondamentale che questo tipo di analisi venga fatta con spirito critico e aggiornamento continuo sulle norme e gli standard tecnici per evitare di utilizzare domande e metodi di valutazione obsoleti o non opportuni al sistema in esame. Nella maggior parte dei casi è precedente ad un ulteriore metodo di analisi proprio per la difficoltà di utilizzo di liste completamente esaustive.

Il metodo si suddivide in due fasi:

- Ricerca bibliografica o creazione da nuovo in base all'esperienza dell'analista, su situazioni simili a quelle in esame;
- Utilizzo della lista in fase di analisi sul campo, grazie alla struttura di questo strumento che consiste in una serie di domande con risposte come "sì / no" oppure "non applicabile" o con delle semplici note di approfondimento;

Il risultato finale è un rapporto di tutti i fattori di pericolo, mancanza degli standard e rilevati e successivi consigli per la loro sistemazione e gestione.

1.6.6 What If

La What If Analysis permette di identificare in modo qualitativo le possibili deviazioni rispetto alla situazione prevista e le loro conseguenze. È utilizzata per fase del ciclo di vita di un impianto e consiste nell'analizzare la possibilità di una deviazione rispondendo alla domanda "Cosa succede se…?". In questo modo possono comparire le possibili situazioni di incidente e la successiva fase di prevenzione per evitare che si verifichino.

Inizialmente si devono ottenere le informazioni sul sistema e il processo industriale, attraverso disegni, descrizioni, eventuali progetti esistenti, sopralluoghi e interviste al personale.

Successivamente si procede con la domanda, partendo dall'ingresso all'impianto e proseguendo attraverso il flusso del sistema fino all'uscita. Le domande sono poste per area di interesse e quindi distinte in funzione di esse, un esempio può essere per esempio la sicurezza dei lavoratori o dell'ambiente. Il report finale consiste in tabelle con le colonne relative alla domanda, risposta/e, pericoli, misure di prevenzione, eventuali misure di protezione e le note con eventuali consigli sulle migliorie tecniche disponibili.

1.6.7 HazOp

La tecnica HazOp, dall'inglese Hazard and Operability Analysis, permette di identificare le deviazioni che conducono ad un evento infortunistico o pericoloso e di prevederne le conseguenze. Nasce come una tecnica da utilizzare in fase di progetto, ma è possibile utilizzarla anche ad impianto o sistema già operativo.

Questa tecnica richiede di quantificare i possibili scenari di incidente con la loro frequenza di accadimento o comunque con una sua stima. La principale caratteristica consiste nello studio del sistema e di tutte le sue variabili conseguenti ad una deviazione o malfunzionamento, identificandoli come nodi importanti nello schema del processo, che si traduce in un albero dei guasti. I guasti, nel caso delle esplosioni, sono gli eventi che portano alla formazione di sorgenti d'innesco.

Il metodo si basa su fase preliminare e di una successiva per punti [2]. La fase preliminare si basa sui seguenti punti:

- Acquisizione di un supporto informativo di base;
- Dati di progetto;
- Dati di gestione dell'impianto;
- Definizione precisa degli obiettivi dello studio, scelti dal responsabile dell'impianto e dall'analista.

La fase di analisi per punti consiste in cui si identificano i "nodi dello studio" e le corrispondenti "sezioni" dell'impianto. Ogni singolo passo operativo viene isolato e con l'utilizzo di parole guida combinate con i parametri in gioco, restituiscono le possibili deviazioni dal progetto.

Terminato l'analisi si completa la tabella di riassunto in cui per ogni operazione viene descritta l'azione correttiva preventiva o protettiva richiesta.

1.6.8 FTA

L'Albero dei Guasti, o in inglese "Fault Tree Analysis" permette di calcolare la probabilità di accadimento di una o più deviazioni rispetto alla situazione prevista [2]. La costruzione del diagramma ad albero fornisce una descrizione delle combinazioni possibili di eventi che possono portare ad un infortunio, nel caso specifico delle esplosioni all'innesco di una nube di polvere.

Il diagramma è costituito da diversi elementi:

- Event, cioè il guasto di un singolo componente;
- Top Event, evento finale concatenazione dei precedenti guasti, e sono solitamente identificati utilizzando una precedente tecnica di identificazione del pericolo, come per esempio una HazOp;
- Cut Sets, combinazioni di guasti che portano al Top Event
- Minimal Cut Sets (MCS)
- Gates, interazioni logiche utilizzate per connettere gli Events (Or, And, Inhibit, Delayed)

Questo tipo di analisi è sia di tipo qualitativo che quantitativo, ad esempio tiene conto delle manutenzione e della sua programmazione e allo stesso tempo calcola la probabilità di accadimento degli eventi di guasto.

Il metodo di costruzione del diagramma è di dedurre gli eventi necessari all'accadimento del Top Event, per poi ricavare quelli successivi fino al "basic events", cioè guasti che comportano la sostituzione dell'intero componente oppure sono guasti temporanei di facile risoluzione.

I guasti primari, sono così definiti se avvengono quando il componente è in funzione entro i limiti dichiarati dal costruttore, quindi causati da difetti del componente. I secondari se avvengono in condizioni superiori ai limiti imposti dal costruttore. Infine i guasti di controllo, avvengono se invece del componente stesso il malfunzionamento è degli strumenti di controllo.

La costruzione dell'albero segue una procedura di tipo operativo [2]:

1) Rivedere l'evento del gate in indagine;
2) Identificare tutte le possibili cause di questo evento;
3) Assicurarsi di non saltare nessuna causa possibile;
4) Individuare il rapporto o la logica causa-effetto tra l'evento e le cause;
5) Strutturare l'albero con queste cause e con i relativi gate logici;
6) Controllare che le cause non si ripetano (solo per l'analisi quantitativa);
7) Considerare le cause come eventi e ripetere la procedura.

Considerati tutti gli eventi possibili e ragionevoli si calcolano i MCS derivanti da risultati logici e di analisi. Si produce quindi il report finale con il diagramma ad albero, l'elenco dei MCS con le annotazioni sulle raccomandazioni e le azioni preventive, protettive e migliorative da utilizzare.

L'utilizzo di queste tecniche permette di individuare le cause, le aree di interesse, in che fase dell'attività lavorativa o zona dell'impianto, in cui ho la possibilità di una deviazione che dia inizio ad un'esplosione di polveri a seguito di un innesco accidentale.

2 Infortuni e riferimenti normativi

Le prime informazioni relative alle esplosioni di polvere, secondo letteratura, risalgono già alla fine del XVIII secolo. Proprio in Italia nel 1785 avvenne l'esplosione a Torino di un mulino provocato dalla sospensione in aria di particelle combustibili. Nello stesso periodo le esplosioni nelle miniere di carbone venivano scambiate per fenomeni dovuti alla fuoriuscita di gas, ma come si è scoperto poi più recentemente esse erano causate dalle sospensioni di polvere di carbone che innescate davano luogo a violente esplosioni con numerose vittime. Lo stesso accadde anche negli Stati Uniti, dove dal XX secolo l'aumento dell'industria, sia dei cereali che di altri materiali come plastiche e legname, incremento drasticamente fenomeni disastrosi dovuti all'esplosione di queste polveri.

In Europa e negli Stati Uniti soprattutto, i numerosi incidenti, diedero il via per la ricerca delle cause di questi fenomeni e per la stesura di linee guida e normative. La direttiva ATEX [6]99/92/CE in Europa è il primo riferimento normativo specifico per il miglioramento della tutela della sicurezza e della salute dei lavoratori, i quali possono essere esposti al rischio di atmosfere esplosive. Per quanto riguarda le apparecchiature destinate all'uso in zone a potenziale rischio atmosfera esplosiva fu predisposta una direttiva specifica, cioè la 94/9/CE.

In America gli standard e le leggi sono più specifici e di maggiore consistenza, poiché sono relative a studi eseguiti su un numero superiore di dati, in questo modo sono presenti numerose procedure per le diverse attività e fasi lavorative, la maggior parte fanno riferimento all' NFPA.

[6] Atmosphères Explosibles

2.1 Gli eventi infortunistici collegati ad esplosioni di polveri in ambiente confinato: risultati di una ricerca bibliografica su banche dati nazionale (INAIL) e estere

In Europa ed Italia le statistiche degli eventi incidentali sulle esplosioni da polvere vengono raccolte dalle banche dati nazionali solo in presenza di eventi infortunistici o seri danni agli impianti e strutture. Perciò non tutti gli eventi vengono registrati, causando delle lacune nella valutazione e nella stima delle frequenze di accadimento di incidenti di questo tipo.

2.1.1 INAIL-Infor.MO

In Italia l'Inail raccoglie i dati relativi ai singoli infortuni gravi e mortali, essi sono disponibili online sull'applicazione Infor.MO.

Utilizzando la parola chiave "esplosioni da polvere" nel sito di ricerca, gli eventi infortunistici registrati risultano, dal 2002 al 2015, nulli. Utilizzando la parola chiave "Esplosione" sono risultati nello stesso intervallo di tempo 39 infortuni mortali e 19 gravi. Dall'analisi degli infortuni la maggior parte di essi sono relativi ad esplosioni meccaniche di serbatoi o derivante dall'accensione di atmosfere esplosive dovute alla presenza di gas, mentre cinque eventi sono stati causati dall'esplosione di polveri organiche, tra cui farine, legname e plastica. Per ogni singolo infortunio viene indicato il modo in cui è stato prodotto l'evento, le caratteristiche del lavoratore e dell'azienda, ma senza l'indicazione degli standard normativi violati. Senza questo tipo di informazione risulta complicato stimare dei dati statistici per il calcolo del rischio.

2.1.2 OSHA

Negli USA la presenza di dati è maggiore grazie al fatto che la crescita della produzione di cereali e quindi di industrie relative alle farine ha incrementato gli eventi esplosivi da polveri organiche.

I dati americani registrano già dal 1800 le prime esplosioni nelle industrie dei cereali, ma dal 1970 in poi la crescita di infortuni mortali dovuti a questi fenomeni ha raggiunto il suo apice, più precisamente nel 1978, con 5 esplosioni e 58 morti e 49 feriti [9]. Da quel momento il governo federale commissionò un centro di ricerca per risolvere il problema ed in questo modo la raccolta di dati fu sistematica.

I dati sono di importanza fondamentale per ricavare informazioni utili per la ricerca delle cause di questi tipi di evento. L'OSHA (Occupational Safety and Health Amministration) americana produsse delle linee guida per le lavorazioni con rischio esplosione, soggette a continue revisioni ed aggiornamenti.

Grazie a ciò la correlazione tra produzione di cereali e incidenti cambiò, con un incremento della produzione e una diminuzione delle esplosioni.

La principale organizzazione che si occupa di questi eventi e che produce linee guida sempre aggiornate, è l'NFPA (National Fire Protection Association). La creazione continua di standard e

codici ha permesso di raggiungere livelli importanti di sicurezza nelle industrie abbassando il numero di infortuni in proporzione al numero di industrie attive.

Il gran numero di dati disponibili permette di calcolare il rischio relativo alle atmosfere esplosive, ottenendo le frequenze attese di accadimento, cioè uno dei parametri della formula per ricavare il rischio:

$$R = P \cdot M$$

dove P è la frequenza attesa di accadimento e M la magnitudo. In assenza di dati statistici infatti è necessario fare affidamento alla PR, cioè al livello di frequenza attesa di accadimento:

$$PR = \frac{frequenza\ attesa\ di\ accadimento\ degli\ eventi\ dannosi\ (situazione\ in\ esame)}{minima\ frequenza\ attesa\ di\ accadimento\ (secondo\ le\ norme\ tecniche\ aggiornate)}$$

se>1 situazione fuori norma, se ≤1 situazione a norma o con rispetto dei requisiti minimi di sicurezza.

2.1.3 HSE

L'organismo di controllo per la sicurezza in Gran Bretagna "Health Security Executive" si occupa di promuovere la sicurezza dei lavoratori e gestire i rischi correlati alle attività svolte. La raccolta dei dati avviene per settori, in particolare per le esplosioni nei molini si riferisce all'industria manifatturiera di cibo e bevande.

L'organismo produce linee guida e metodi di prevenzione e protezione per le attività in cui si verifica la presenza di polveri combustibili.

Esse descrivono i metodi di prevenzione e protezione da adottare, in particolare in presenza di siti di stoccaggio dove si verifica la maggior parte degli incidenti di polveri combustibili.

Secondo i dati raccolti dall'organizzazione nel 2008 / 2009 solo lo 0,1% degli infortuni è conseguenza di incendi o esplosioni, ma la gravità e i danni che provocano sono molto ingenti.

2.2 Il quadro normativo

Il quadro normativo in Europa in termini di sicurezza e salute sul lavoro fa a capo di due direttive principali:

- Direttiva 391/82/CE, "direttive sociali", normative sulle prescrizioni minime per il miglioramento della sicurezza e della salute dei lavoratori;
- Direttiva 392/82/CE, "direttive economiche", normative sulle caratteristiche di sicurezza di apparecchi e di sistemi di protezione, poi sostituita dalla Direttiva Macchine 2006/42/CE.

Dalle due normative principali sono nate le "direttive figlie" o meglio direttive particolari, quali la 99/92/CE (ATEX 137) relativa alle prescrizioni minime per il miglioramento della sicurezza e della salute dei lavoratori esposti a rischio di atmosfere esplosive, e la 2014/34/UE, in materia di apparecchi e sistemi di protezione per impiego in atmosfere potenzialmente esplosive.

In Italia il recepimento è avvenuto, per le direttive sociali, con il Testo Unico sulla salute e sicurezza nei luoghi di lavoro D.lgs.81/08, mentre per la direttiva macchine è stato introdotto il D.lgs.17/2010, in cui vengono definiti i RES (Requisiti Essenziali di Sicurezza) e le disposizioni per la marcatura CE di tutte le macchine in generale. Il D.lgs.85/2016 recepimento della 2014/34/UE, invece è la direttiva specifica per gli apparecchi e sistemi di protezione destinati all'uso in caso di atmosfera potenzialmente esplosiva. Lo schema in Tabella 2 permette di avere una visione globale delle direttive e i suoi recepimenti.

Tabella 2 Normative di riferimento

	Direttiva Europea	***Recepimento italiano***
Direttive economiche	*2006/42/CE*	*D.lgs.17/2010*
	2014/34/UE	*D.lgs.85/2016*
Direttive sociali	*89/391/CE*	*D.lgs.81/2008*
	99/92/CE (ATEX 137)	

In Italia inoltre le attività molitorie per cereali con potenzialità giornaliera maggiore di 20000 kg sono soggette ai controlli di prevenzione incendi da parte dei vigili del fuoco. La legge di riferimento è il D.P.R 151/2011. Queste attività hanno l'obbligo di mantenere in stato di efficienza i sistemi, i dispositivi, le attrezzature e le misure di sicurezza antincendio utilizzate ed effettuare le verifiche di controllo ed interventi di manutenzione secondo le scadenze indicate dai vigili del fuoco. È prescritto inoltre l'informazione e formazione sui rischi di incendio connessi all'attività e sui comportamenti da osservare per evitare l'insorgere di un incendio e sulle procedure da adottare.

2.2.1 D.lgs.81/2008

Le disposizioni della Direttiva 99/92/CE vengono trattate e recepite in Italia nel D.lgs.81/08 nelle seguenti parti:

- Titolo XI, "Protezione da atmosfere esplosive";
- Allegato XLIX, "Ripartizione delle aree in cui possono formarsi atmosfere esplosive"
- Allegato L (articolo 293, articolo 294, comma2, lettera d), articolo 295, commi 1 e 2)
    - A. Prescrizioni minime per il miglioramento della protezione della sicurezza e della salute dei lavoratori che possono essere esposti al rischio di atmosfere esplosive.
    - B. Criteri per la scelta degli apparecchi dei sistemi di protezione.
- Allegato LI, "Segnale di avvertimento per indicare le aree in cui possono formarsi atmosfere esplosive".

Nel Titolo XI sono elencati tutte le informazioni necessarie per una valutazione del rischio esplosione in ambiente di lavoro, tra queste al Capo II si descrivono gli "Obblighi del Datore di Lavoro":

- All'art. 289 riguardante la prevenzione e protezione contro le esplosioni, viene prescritto di adottare le misure tecniche ed organizzative adeguate alla natura dell'attività, cioè prevenire la formazione di atmosfere esplosive. Se ciò non è possibile è necessario evitare l'innesco e attenuare gli effetti dell'esplosione per garantire la salute e sicurezza dei lavoratori.

  Quanto detto, deve essere ogni volta rivalutato in caso di cambiamenti rilevanti nelle attrezzature, procedure o processo produttivo;
- L'art.290 obbliga il datore di lavoro a svolgere una valutazione specifica per i rischi derivanti da atmosfera esplosiva tenendo conto:
  - della probabilità e durata della presenza di atmosfere esplosive;
  - della probabilità che le fonti d'innesco siano presenti e possano diventare efficaci;
  - delle caratteristiche dell'impianto, delle sostanze utilizzate (soprattutto se combustibili o esplosive), dei processi e delle loro possibili interazioni;
  - entità degli effetti.

  Fondamentale è valutare i rischi nel complesso e prendere in considerazione i luoghi che possono essere in collegamento tra loro, per mezzo di aperture, con luoghi con potenziale atmosfera esplosiva;
- All'art.291 riguardante gli obblighi generali, oltre a garantire la sicurezza per i lavoratori durante l'attività lavorativa, il datore deve assicurare un controllo, attraverso mezzi tecnici adeguati, durante la presenza dei lavoratori in funzione della valutazione del rischio;
- L'art.292 relativo al "Coordinamento" prescrive, nel caso di presenza di differenti imprese, che il datore di lavoro è responsabile per le questioni riguardanti il suo controllo e quindi del luogo di lavoro, perciò deve occuparsi del coordinamento tra di esse e soprattutto di far attuare le misure di prevenzione e protezione presenti nella valutazione del rischio;
- L'art.293 obbliga il datore a definire le aree a rischio esplosione secondo l'Allegato XLIX e che ad esse vengano applicate le prescrizioni minime trattate all'Allegato L del medesimo decreto;
- L'art.294 prescrive l'obbligo di produrre e aggiornare il documento sulla protezione contro le esplosioni, in particolare esso deve contenere:
  - i rischi di esplosione individuati e la loro valutazione;
  - le misure di adeguamento da adottare;

- la classificazione dei luoghi in zone a rischio esplosione;
- le zone a cui si applicano le prescrizioni minime dell'Allegato L;
- i luoghi e le attrezzature di lavoro, tra cui dispositivi di allarme e controllo, utilizzati per mantenere le condizioni di sicurezza;
- gli accorgimenti per l'utilizzo di attrezzature di lavoro ai sensi del Titolo III del D.lgs.81/2008.

- L'art.295 relativo ai "Termini per l'adeguamento" indica che nelle aree già utilizzate o a disposizione dell'impresa per la prima volta dal giugno del 2003, è necessario adempiere ai requisiti dell'Allegato L parte A, mentre per le attrezzature ai requisiti sia della parte A e B;
- L'art.296 impone che le installazioni elettriche nelle aree a rischio esplosione vengano verificate secondo i capi III e IV del DPR n.462 del 2001.

Quindi l'analisi di rischio consiste nell'analizzare la produzione dell'attività, sia in condizioni normali di funzionamento, sia in condizioni di impianto non a pieno regime, come può essere nella fase di manutenzione o di riparazione di un guasto, prevedendo anche gli usi scorretti delle attrezzature.

L'identificazione del fattore di pericolo deve essere seguita dalla caratterizzazione del combustibile dal punto di vista fisico e chimico.

Si stima quindi il rischio e si definiscono le misure per la minimizzazione e per la gestione del rischio residuo.

2.2.1.1 Allegato L

È suddiviso in due parti ed è richiamato per l'applicazione degli artt. 293, 294, 295. Nella parte A come misura di miglioramento della protezione contro le atmosfere esplosive, al primo punto c'è la formazione professionale dei lavoratori potenzialmente esposti ad atmosfera esplosive a cui il datore di lavoro deve provvedere alla formazione. Inoltre i lavoratori sono tenuti a seguire, se all'interno del DPE[7], le istruzioni del datore per lavori in area sotto direttiva ATEX e richiedere l'autorizzazione ad operare in caso di interferenza con altre attività in situazioni che sono o possono diventare pericolose. Successivamente nel documento sono descritte e indicate le misure di protezione contro le esplosioni da adottare dopo la valutazione del rischio. Per esempio si citano alcuni di essi:

"2.3. Per la prevenzione dei rischi di accensione, conformemente all'articolo 289, si tiene conto anche delle scariche elettrostatiche che provengono dai lavoratori o dall'ambiente di lavoro che agiscono come elementi portatori di carica o generatori di carica. I lavoratori sono dotati di

[7] Documento sulla protezione contro le esplosioni.

adeguati indumenti di lavoro fabbricati con materiali che non producono scariche elettrostatiche che possano causare l'accensione di atmosfere esplosive.

2.7. Ove stabilito dal documento sulla protezione contro le esplosioni, sono forniti e mantenuti in servizio sistemi di evacuazione per garantire che in caso di pericolo i lavoratori possano allontanarsi rapidamente e in modo sicuro dai luoghi pericolosi." [10]

La parte B è relativa ai criteri di scelta degli apparecchi e dei sistemi di protezione in cui si cita l'obbligo di adottare apparecchi e sistemi di protezione in conformità con il DPR n.126 del 1998 abrogato dal D.lgs.85/2016, in cui si definiscono gli apparecchi di Categoria 1, 2 e 3 già citati nel capitolo 1.6.2.

2.2.1.2 Allegato LI

Infine per rendere visibili e identificabili, ai lavoratori e agli esterni che possono interferire con l'ambiente di lavoro, le aree a potenziale rischio esplosione, nell'Allegato LI è presente il simbolo da impiegare, Figura 5.

Figura 5 Segnale di avvertimento ATEX [10]

2.2.1.3 Sanzioni

Il capo III del Titolo XI indica all'art.297 le sanzioni a carico del datore di lavoro e dei dirigenti in caso di inadempienza degli obblighi descritti in precedenza.

Il datore è punito con l'arresto da 3 a 6 mesi o con ammenda da 2740,00 a 7014,00 euro per la violazione dell'articolo 290 relativo alla valutazione dei rischi.

Il datore e i dirigenti sono puniti con l'arresto da 3 a 6 mesi con l'ammenda da 2740,00 a 7014,00 euro per la violazione degli articoli 289, comma 2, 291, 292, comma 2, 293, commi 1 e 2, 294, commi 1, 2 e 3, 294-bis (sulla IFT[8]) e 296.

2.2.2 D.lgs.85/2016

Il D.lgs. 85/2016 abroga il D.P.R. n° 126 del 1998 vecchio recepimento della 94/9/CE e della direttiva 2014/34/UE, concernente l'armonizzazione delle legislazioni degli Stati membri relative agli apparecchi e sistemi di protezione destinati ad essere utilizzati in atmosfera potenzialmente esplosiva.

[8] Informazione, Formazione e Addestramento

Il seguente decreto si applica agli apparecchi e sistemi di protezione per atmosfera esplosiva e ai componenti che sono creati per essere inseriti in essi. Inoltre deve essere seguita anche per i dispositivi che non entrano in un'area potenzialmente esplosiva, ma che hanno lo scopo di controllare, regolare e mantenere in sicurezza gli apparecchi di cui sopra.

Tutti i prodotti relativi a questo decreto devono rispettare i requisiti essenziali di sicurezza trattati nell'Allegato II per poter essere immessi sul mercato. Questa condizione è necessaria ma non sufficiente poiché il fabbricante deve presentare la documentazione tecnica del prodotto agli organismi autorizzati alla valutazione di conformità del prodotto. Se la valutazione da risultato positivo sul prodotto viene applicato il marchio CE, con validità di dieci anni dalla sua commercializzazione. Inoltre il fabbricante garantisce che sul prodotto sia presente il marchio specifico di protezione contro le esplosioni e che venga accompagnato da tutte le istruzioni relativo all'uso e alla manutenzione.

2.2.2.1 Allegato II

Il rispetto dei RES, "Requisiti Essenziali di Sicurezza", sono descritti nell'allegato II. Secondo quanto prescritto, per i prodotti di protezione bisogna tener conto in fase di progettazione delle migliori tecniche disponibili sul mercato. Il concetto su cui si basa è la prevenzione in fase di progetto, cioè integrare già in questa fase la sicurezza del prodotto, in questo caso riguardante le esplosioni.

I requisiti principali da seguire sono:

- Il prodotto non deve essere in grado di liberare esso stesso un'atmosfera esplosiva e quindi essere un ulteriore fonte di pericolo;
- Impedire gli inneschi, qualsiasi forma sia il tipo di energia che gli caratterizza (termica, elettrostatica, ecc....);
- Se l'esplosione si verifica, deve soffocarla immediatamente e/o circoscrivere la zona colpita da eventuali fiamme e picchi di pressione.
- Durante la progettazione, si deve tenere conto di eventuali guasti o malfunzionamenti, o qualunque uso errato ragionevolmente prevedibile;
- Il prodotto deve essere sottoposto a particolari controlli di manutenzione poiché in questa fase le funzionalità di esso possono essere minori se non nulle e quindi provocare un pericolo di esplosione;
- Ogni apparecchio deve essere marcato CE, in particolare per gli apparecchi contro le esplosioni da polveri, deve essere applicata la lettera "D", che deriva dall'inglese "Dust";
- Ogni prodotto commercializzato deve essere accompagnato dalle istruzioni per l'uso e manutenzione in lingua italiana.

2.3 La tecnica CCCP (Computer Aided Cause Consequence for Prevention) per l'approfondimento di analisi infortuni e definizione delle misure di prevenzione

Questo metodo innovativo di prevenzione fa riferimento all'analisi di dati storici, integrata con l'analisi della catena di eventi casuali dell'incidente in maniera formale e priva di valutazioni soggettive.

La tecnica di analisi degli infortuni computerizzata è un'evoluzione della CCA (Cause-Consequence Analysis), adoperata, andando a ritroso, per identificare le cause prima di una deviazione e di valutare la probabilità di ripetizione dell'evento in caso di mancato adeguamento.

Una solida base di dati è fondamentale per l'impiego di questa tecnica, ma ancora di più lo è l'analisi approfondita delle cause prime degli infortuni e della catena di eventi successivi ad essa.

Per evitare errori di soggettività, la tecnica impone all'analista, durante l'identificazione post evento della catena di eventi casuali, delle soluzioni di prevenzione e correzione affinché non si ripeta l'incidente.

Nello specifico la tecnica CCA incorpora nella sua struttura due tipologie di analisi, per lo studio di incidenti e fattori di pericolo, la ETA[9] e la FTA, di cui si è parlato nel capitolo 1.6.8.

L'Event Tree Analysis considera un evento iniziale e con metodo induttivo individua i diversi percorsi di sviluppo, analizzando le risposte dei dispositivi di sicurezza, fino all'evento finale.

L'utilizzo simmetrico delle due tecniche permette di:

- Individuare con un'analisi oggettiva, partendo dall'infortunio o evento incidentale, lo schema di eventi intermedi fino alla causa iniziale e quindi i possibili errori nella fase di valutazione del rischio;
- Identificare, con un approccio proattivo e di miglioramento, le azioni correttive da applicare in tutte le parti dello schema ad albero, per evitare che lo stesso evento si ripresenti attraverso percorsi differenti.

In questo modo è possibile prevenire e gestire nuovi eventi casuali che prima non potevano essere previsti, risultando celati, a causa di un'errata analisi e gestione del rischio.

Per poter creare una tecnica di tipo computerizzata, il sistema fa riferimento ad alcune macro-categorie di eventi iniziatori e intermedi per ascrivere ad esse gli eventi presenti nello schema dell'incidente o infortunio [11]. Le categorie fanno riferimento ai principi della Gestione dei Rischi Occupazionali, come per esempio sono le procedure di lavoro, le interferenze di volumi funzionali, caratteristiche strutturali ed impiantistiche, inoltre il lessico utilizzato è quello tipico delle banche dati nazionali ed internazionali con lo scopo di formalizzare la tecnica.

[9] Event Tree Analysis

Il metodo è sottoposto a test per incrementare il suo utilizzo a diversi tipi di attività e settori lavorativi, quindi attraverso un'implementazione della base di dati a cui fa riferimento. Il sistema permette di evitare errori da parte dell'analista, impedendo di utilizzare pareri e indicazioni soggettive, ma soprattutto permette di applicare misure di prevenzione efficaci e inerenti al tipo di impianto o attività analizzata, grazie all'impiego di una base dati che comprende casi simili.

3 Il caso di specie: esplosione di polveri organiche in mulino

Le polveri sono presenti in tutte le attività industriali e quando sono combustibili diventano un pericolo importante per l'incolumità dei lavoratori. Nell'industria dei cereali, nella fase di macinazione in attività molitorie la produzione di polvere è molto elevata a causa dei processi di macinazione e trasporto delle materie prime e dei prodotti. La conseguenza è che in tutto il mondo si sono verificati diversi eventi di tipo esplosivo che hanno provocato danni ingenti e purtroppo anche il ferimento e la morte di diversi lavoratori. Il caso affrontato di seguito è relativo ad un incidente accaduto in un mulino di grano situato in Piemonte, per analizzare le cause e i rischi derivanti da questo tipo di attività.

3.1 Casi storici di esplosioni da polveri nell'industria

Le esplosioni in ambiente di lavoro causate da nubi di polvere o gas combustibili sono eventi sottovalutati e possono provocare danni ingenti alle strutture, ma soprattutto danni mortali e non, alle persone presenti sul luogo di lavoro.

In moltissime tipologie di industrie le polveri combustibili entrano a far parte del processo produttivo o in alternativa come prodotto finale o rifiuto.

I danni economici dovuti a questi tipi di fenomeni sono molto elevati, poiché danneggiano ampiamente le strutture e le attrezzature presenti nel luogo di lavoro, per non parlare di tutte le spese relative agli indennizzi ai lavoratori e per le sanzioni imposte per le non conformità relative alla sicurezza sul luogo di lavoro. Le ustioni che subiscono i feriti sono invece dovute al fronte di fiamma, che per l'elevata temperatura provocano danni serissimi sui corpi dei lavoratori. Nella maggior parte dei casi infatti le ustioni portano successivamente al decesso se estese a gran parte del corpo.

I danni elevati avvengono principalmente a causa delle sovrappressioni generate dalle esplosioni e dall'estensione di queste a sorgenti secondarie di polvere che innescano ulteriori fenomeni deflagranti. Anche la proiezione di oggetti è tipica di questi eventi, con frammenti di mura e attrezzature scagliati anche a centinaia di metri.

La tematica delle esplosioni da polvere a livello europeo non è stata soggetta ad importanti studi comunitari, ma si è sviluppata maggiormente a livello nazionale. In Francia e Germania questi fenomeni sono stati studiati e raccolti in database in modo da avere dei dati storici e poter studiare la correlazione tra essi e individuare le cause.

I dati relativi agli ultimi trent'anni sono riferiti a banche dati come:

- INFOR.MO dell'INAIL, in cui sono descritti in maniera qualitativa gli incidenti che hanno portato a morte o infortunio;

- Database ARIA (Analysis, Research and Information on Accidents), creato dal Ministero dell'Ambiente francese, dove sono indicati gli incidenti rilevanti accaduti in Francia e in Europa, con l'ausilio di report che descrivono l'evento;
- Database eMARS (Major Accidents Reporting System) della comunità europea, relativo sempre agli incidenti occorsi in aziende a rischio rilevante;
- CSB (Chemical Safety and Hazard Investigation Board) in cui sono presenti report di indagine di eventi incidentali relativi a sostanze chimiche.

I dati raccolti, son influenzati da diverse modalità di registrazione e descrizione, infatti in Europa non è presente un ente unificato che si occupa di questi tipi di eventi. Per di più solo gli incidenti più catastrofici e di rilevanza mediatica vengono registrati, portando così alla mancanza di tutti quegli incidenti o attività che potenzialmente pericolosi non hanno conseguito a fatti gravi. Tutta questa serie di incidenti vengono chiamati "Near misses" nel gergo della sicurezza sul lavoro, e rappresentano una percentuale altissima rispetto a tutti i casi che effettivamente hanno dato luogo ad infortuni e danni alle attività.

Negli Stati Uniti d'America il gran numero di incidenti causati da polveri ha invogliato il governo a creare degli enti di ricerca e raccolta dati relativi ad essi. Le statistiche rilevate sono servite per comprendere le cause di esplosioni così violente e quindi di creare normative specifiche per le attività che producono, nel processo lavorativo, polveri combustibili.

In Tabella 3 sono indicati alcun degli eventi esplosivi occorsi nell'industria mondiale, indicando data, luogo, tipo di attività coinvolta e numero di morti e feriti.

Tabella 3 Eventi incidentali dovuti ad esplosioni di polveri

ANNO	LUOGO	ATTIVITA COINVOLTA	CONSEGUENZE
1785	Italia – Torino	Panetteria	2 infortuni
1872	Scozia	Mulino	18 morti
1878	Francia	Fabbrica di coloranti	6 morti
1907	USA	Miniera di carbone	1148 morti
1916	UK	Silo di grano	Non definite
1919	USA	Fabbrico di amido	43 morti
1924	USA	Fabbrica di amido	42 morti
1955	USA	Impianto trasporto grano	3 morti
1965	UK – Londra	Mulino	4 morti
1970	Germania	Sili di grano	6 morti
1973	Norvegia	Produzione di esplosivi	5 morti
1977	USA	Deposito di grano	36 morti

1981	USA	Sili di grano	9 morti
1982	Francia	Silo di malto	12 morti
1985	Argentina	Deposito di grano	22 morti
1989	Italia – Guardiagrele	Mulino	8 morti
1995	USA	Impianto chimico	5 morti
1997	Francia	Sili di grano	11 morti
1998	USA	Deposito di grano	7 morti
2001	Italia – Vigliano Biellese	Stabilimento tessile	3 morti
2007	Italia – Fossano	Mulino	5 morti
2008	USA	Zuccherificio	4 morti
2012	Canada	Mulino	Non definite
2014	Cina	Lavorazione metalli	Non definite
2015	UK	Lavorazione polveri di legno	Non definite

Da quanto emerge dalla tabella sopra, gli eventi esplosivi riguardano diversi tipi di attività e diversi tipi di materiale.

I settori individuati nell'elenco sono relativi all'industria tessile, chimica, chimico-farmaceutica, alimentare, del legname, dei metalli leggeri (quelli in grado di passivarsi e cioè ossidare a contatto con l'aria), della plastica, della carta e le attività di miniera, in genere quelle di carbone.

Da dati relativi alle statistiche americane, inglesi e tedesche si individuano percentuali elevate e numero maggiore di esplosioni nei sistemi di deposito e separazione delle polveri e nei silos [12]. A conferma dei dati, nelle industrie di questo tipo la presenza di attrezzature per il deposito e filtrazione delle polveri è molto diffuso, ed è per questo motivo che le percentuali di incidenti aumentano.

Un discorso analogo si può fare per i sili di stoccaggio, nei quali vengono contenuti grandi quantità di polveri, e che soprattutto durante le fasi di manutenzione, vengono innescate dando luogo ad un'esplosione primaria più lieve e diverse secondarie le quali provocano numerosi danni.

Le esplosioni di polveri combustibile organiche sono eventi sottovalutati e poco conosciuti dall'opinione pubblica. Il motivo principale è che non si immagina che delle polveri apparentemente innocue come farine, amido, o zucchero possano dare luogo ad eventi disastrosi e mortali.

Perché ciò venga meno si devono analizzare gli incidenti accaduti nel passato, indagando sulle cause e le conseguenze, in modo da proporre studi per la raccolta di questi dati e attuare misure

preventive di informazione e formazione dei datori di lavoro che rientrano in questi tipi di industrie.

Per esempio nell'industria dei metalli, i manufatti di alluminio vengono prodotti attraverso processi di finitura e smerigliatura. Durante queste fasi, si formano polveri sospese di diversa granulometria ed elevata superficie specifica. L'alluminio si ossida molto facilmente e nel caso in cui le polveri si trovino in concentrazione opportune, se innescate possono provocare delle esplosioni.

In Italia diversi eventi di questo tipo sono accaduti in regione Piemonte nella provincia del Verbano Cusio Ossola, poiché molto sviluppata l'industria di manufatti in alluminio, come le caffettiere. Nel 2000 per esempio in un'azienda adibita alla produzione di caldaie e raccoglitori delle caffettiere è avvenuta un'esplosione di grande entità. Nel capannone erano presenti diverse smerigliatrici collegate all'impianto di aspirazione delle polveri. L'innesco è avvenuto a causa della rottura del nastro abrasivo all'interno del carter della smerigliatrice, il quale ha provocato delle scintille in grado di innescare le polveri di alluminio.

I danni sono stati elevati, provocando la distruzione quasi completa delle mura e la deformazione delle attrezzature.

La reazione si è propagata alla zona di abbattimento delle polveri dopo il ciclone, e risollevate a causa dell'esplosione primaria, hanno generato quelle secondarie andando a colpire anche i depositi di polvere fuori dal capannone. Come spesso succede in situazioni di posizionamento urbanistico di queste attività in vicinanza di altri edifici, si sono verificati diversi danni anche alle aziende limitrofe.

In America gli incidenti di maggiore impatto dal punto di vista delle esplosioni di polvere sono avvenuti nelle miniere di carbone. Come si può vedere in Tabella 3, nel 1907, con ben 1148 morti avvenne l'evento con il maggior numero di vittime mai registrato. In quel periodo le cause non erano ancora note, infatti si pensava che le esplosioni fossero dovute al gas metano presente nelle miniere, mentre la causa principale era l'innesco della polvere di carbone sospesa nell'ambiente.

Più recentemente uno degli eventi più gravi accaduti negli Stati Uniti d'America, più precisamente in Georgia, ha provocato la morte di 14 lavoratori e il ferimento di 36 per gravi ustioni. L'evento è avvenuto in un'attività produttiva di zucchero raffinato dal nome Imperial Sugar.

All'interno dello stabilimento erano presenti macchine come trasportatori a coclea, a nastro ed elevatori a tazze per lo stoccaggio nei silos dell'impianto. Secondo le indagini portate avanti dal CSB, si è evidenziato che l'innesco è avvenuto nel nastro trasportatore per il surriscaldamento o per delle scintille provocate da un cuscinetto consumato. Il nastro trasportatore in questione era in acciaio ed era fornito di copertura. Proprio la copertura ha fatto sì che al suo interno si formasse

una concentrazione di zucchero in polvere maggiore del LEL. Lo zucchero essendo combustibile, reagendo con l'ossigeno subisce una reazione esotermica che nel caso in questione ha innescato l'esplosione.

La prima deflagrazione ha provocato un'onda di pressione che ha sollevato lo zucchero presente nell'ambiente di lavoro che ha quindi generato delle esplosioni secondarie.

I danni provocati dall'onda di pressione sono stati molto ingenti, poiché sono andati distrutti e crollati addirittura i muri e i pavimenti, mentre gli incendi successivi hanno danneggiato il resto dell'impianto, oltre alcuni decessi e infortuni ai lavoratori rimasti bloccati all'interno della raffineria.

3.2 Casi di esplosioni di polveri di cereali

Le esplosioni di polveri combustibile organiche sono eventi sottovalutati e poco conosciuti dall'opinione pubblica. Il motivo principale è che non si immagina che delle polveri apparentemente innocue come farine, amido, o zucchero possano dare luogo ad eventi disastrosi e mortali. Perché ciò venga meno si devono analizzare gli incidenti accaduti nel passato, indagando sulle cause e le conseguenze, in modo da proporre studi per la raccolta di questi dati e attuare misure preventive di informazione e formazione dei datori di lavoro che rientrano in questi tipi di industrie.

Nei mulini la presenza di polveri infiammabili aerodisperse in grado di formare una nube potenzialmente esplosiva è molto frequente, per esempio in una tonnellata di grano si stima la presenza di una quantità di polvere che va da 1 a 5 kg [9]. L'effetto dell'evento incidentale può variare in funzione della granulometria della polvere o della percentuale di umidità atmosferica.

In Europa e negli USA si sono verificati diversi eventi correlati all'attività produttiva cerealicola.

Il numero delle produzioni è in continuo aumento a causa dell'aumento di popolazione e della grande richiesta di questi prodotti. Basti pensare che tutte le attività di allevamento necessitano di mangimi per poter dar luogo ai prodotti come carni e derivati.

In America la produzione è molto elevata ed è per questo che negli anni si sono verificati diverse esplosioni per innesco di polveri organiche derivanti dai cereali.

Per questa ragione dal 1978, l'Accademia Nazionale delle Scienze USA, venne incaricata dal governo di registrare e studiare gli eventi esplosivi legati alle attività agricole e delle attività industriali che producevano, anche durante i processi intermedi, polveri combustibili possibili di innesco. Per esempio l'università del Kansas si occupa ancora oggi di registrare i dati relativi alle esplosioni di cereali.

Nello stesso periodo iniziarono ad essere pubblicate delle raccomandazioni per prevenire questo tipo di fenomeni.

In trent'anni circa, il trend della produzione di cereali è continuato ad aumentare, ma grazie all'avanzamento delle normative, delle procedure e controlli nel territorio americano il numero di esplosioni è diminuito mostrando un andamento decrescente.

Questo non è bastato però ad evitare la totalità degli incidenti, infatti nel 1998 si verificò l'esplosione nello stoccaggio di De Bruce, in quel momento il più grande al mondo, con una capacità di 730000 metri cubi di cereali.

L'evento provocò la morte di sette persone e contò anche dieci feriti, lavoratori nel sito di stoccaggio, più milioni di dollari persi a causa dei danni alle strutture e delle perdite di grano.

Il deposito contava ben 246 silos cilindrici affiancati tra di loro su file diverse.

L'esplosione si è innescata in una delle file di silos, generando un fronte di fiamma e di pressione, che spostandosi nei tunnel di collegamento, ha formato le condizioni per le successive esplosioni secondarie.
L'evento ha provocato la distruzione di diversi contenitori in cemento armato, con la proiezione di parti di esso a distanza di centinaia di metri. Anche le attrezzature presenti nell'edificio di collegamento tra le file dei silos, in cui erano presenti gli elevatori a tazze, sono state distrutte.
Dall'investigazione dei fatti da parte delle autorità americane, l'innesco è stato provocato dal surriscaldamento o dalle scintille di un cuscinetto mal lubrificato di un nastro trasportatore, probabilmente nella fase di carico di uno dei silos. Le braci di grano che si sono formate hanno generato dei moti convettivi che hanno disperso nei tunnel le polveri depositate, e in questo modo si è formata l'atmosfera esplosiva che ha dato luogo al disastro.
In Europa le normative fanno riferimento alle direttive europee, ma nel caso delle esplosioni da polvere le statistiche e la raccolta di dati risulta poco omogenea e variabile in funzione della nazione in cui ci si trova.
Gli stati con una maggiore base di dati relativa a fenomeni di esplosioni di cereali sono la Francia, la Germania, l'Olanda e l'Inghilterra.
La Francia è il primo produttore di grano nel territorio europeo e infatti è anche stato più soggetto ad eventi esplosivi dovuti alle polveri cerealicole.
Nel 1997 per esempio in Francia, più precisamente a Blaye nel dipartimento di Gironda, avvenne un incidente di natura esplosiva in un deposito di grano. La società coinvolta era la Société d'Explotation Maritime Blayaise (SEMABLA), la quale si trovava nel porto della città, poiché la zona è strategica per il commercio e trasporto marittimo di cereali.
Il deposito era formato da due gruppi di magazzinaggio verticali alti 100 metri e di circa 80000 metri cubi. L'esplosione primaria si è innescata in una di queste torri, propagandosi anche alla seconda. Una di queste è andata completamente distrutta a seguito delle onde di pressione generate dalla reazione.
Le vittime furono dieci lavoratori e un pescatore che si trovava su un'imbarcazione nelle acque limitrofe, infatti il raggio dell'esplosione è stato di circa 500 metri dal punto di inizio dell'esplosione.
Dalle indagini emerse che l'innesco avvenne nel sistema di rimozione delle polveri, a seguito di urto meccanico o dell'attrito tra la girante con la parte fissa del circuito.
In Italia gli eventi relativi a polveri combustibili sono diversi e vengono raccolti nella banca dati dell'INAIL solo in caso di infortunio grave o mortale.

Un evento relativo alle polveri di cereali accaduto in Italia è quello del 1989 a Guardiagrele in un mulino. L'innesco avvenne in un silo di stoccaggio durante dei lavori di manutenzione.
Provocò sette vittime e grande scalpore nell'opinione pubblica del territorio abruzzese. In primo luogo si pensava fosse stato causato da gas compressi generati dalle farine, ma con gli studi che avvennero successivamente si capì che la causa fu l'innesco di una nube di polvere.
I casi seguenti dimostrano quanto siano comuni questi fenomeni e troppo sottovalutati e dall'impatto devastante sulle persone e sulla produzione con danni elevatissimi.
L'incidente del Molino Cordero è il più recente incidente documentato in Italia di esplosioni di polveri di cereale e di seguito verrà spiegato e descritto nei particolari.
Nei capitoli successivi si analizzerà l'evento, per ricercare le cause e descrivere dal punto di vista della sicurezza sul lavoro le lacune nella prevenzione e protezione dall'esplosione.

3.3 Il Molino Cordero

Il caso analizzato di seguito è relativo ad un incidente che ha portato ad un'esplosione di un mulino, in Piemonte nel 2007.

Il Molino Cordero era situato nella città di Fossano, in Provincia di Cuneo, e si occupava della produzione di farine di frumento ricavate da granaglie stoccate nei sili dello stabilimento.

L'evento è accaduto il 16 luglio in un pomeriggio molto caldo e secco. Informazione importante perché ci si trovava in condizioni favorevoli dal punto di vista atmosferico per l'innesco di una nube di polvere.

Nell'immagine satellitare in Figura 6 si nota la posizione dello stabilimento all'interno dell'area urbana. In precedenza però il molino era situato nella periferia di Fossano, e solo in seguito negli anni vennero costruiti gli edifici intorno. Di conseguenza non è mai stato tenuto presente anche in fase di costruzione i pericoli che sarebbero potute nascere da un'attività di questo tipo e quindi delle interferenze ad essa correlate.

Figura 6 Vista dall'alto posizione Molino Cordero [13]

Il molino era presente dal 1950, quindi era un impianto storico della città che si occupava di macinazione e immagazzinamento e impacchettamento delle farine, per la successiva distribuzione ai clienti.

L'azienda era a capo della famiglia Cordero, gestita dal padre, e dal figlio che aveva la carica di amministratore delegato. L'azienda era composta inoltre da 24 dipendenti, di cui:

- 9 tecnici di laboratorio e impiegati in ufficio;
- 8 mugnai;

- 5 autisti;
- 2 magazzinieri.

Le vittime dell'esplosione furono cinque di cui quattro appartenenti all'azienda. L'autista Mario Ricca di 45 anni, colpito dall'esplosione in prossimità dell'autocisterna di scarico, Massimiliano Manuello di 42 anni, Marino Barale di 38 anni, Valerio Anchino di 44 anni capo mugnaio e infine Antonio Cavicchioli manutentore esterno in visita allo stabilimento per concordare un lavoro di manutenzione affidatogli.

3.4 Analisi del contesto

Per poter meglio comprendere le cause dell'evento accaduto è necessario analizzare ogni elemento di struttura e di contesto, cioè il primo punto per una corretta analisi di rischio. In questo caso si esamina nel dettaglio lo stabilimento luogo dell'esplosione e il suo processo produttivo tratto dal materiale presentato nell'articolo relativo alla ricostruzione dell'evento e dalle perizie dell'incidente [13].

3.4.1 Stabilimento

L 'impresa coinvolta svolgeva un'attività molitoria, principalmente di frumento, con potenzialità giornaliera superiore ai 200 quintali. L'edificio centrale era a metà tra Via Paglieri e Via Torino, come si può vedere in Figura 7.

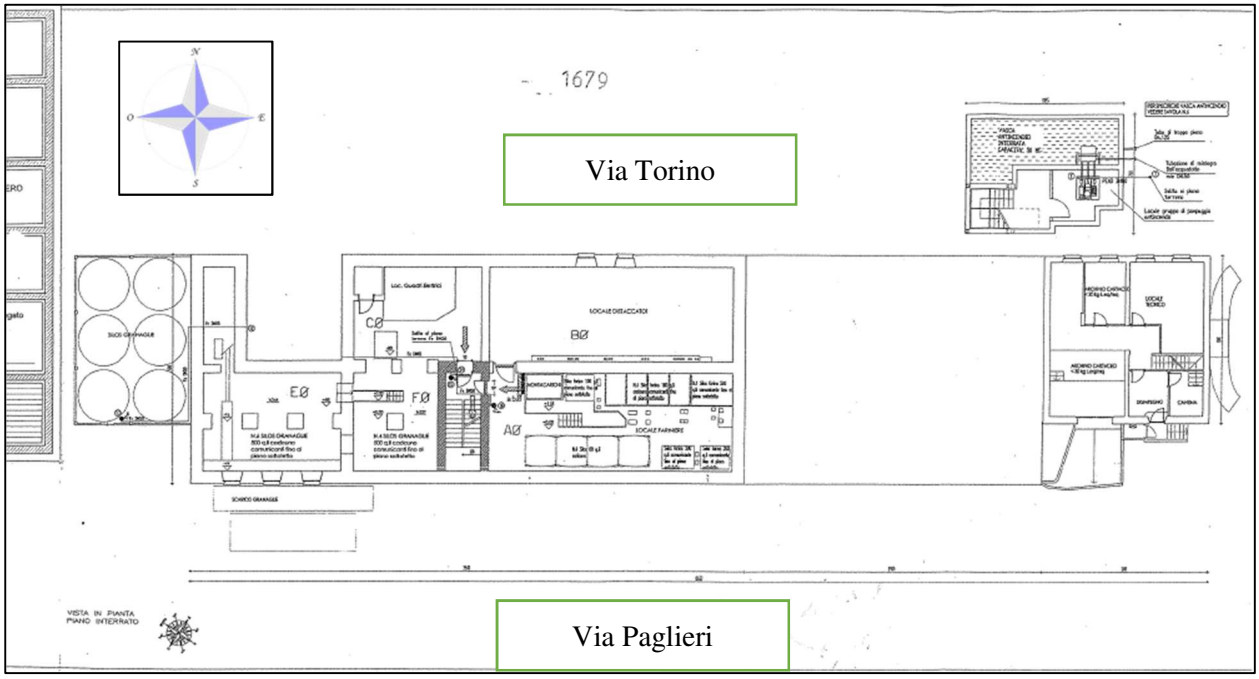

Figura 7 Pianta Molino Cordero [13]

Lo stabilimento era formato da un corpo centrale a pianta rettangolare, il quale si sviluppava su quattro piani ed un seminterrato, un magazzino di tre piani per i sacchi di farina in calcestruzzo armato costruito più recentemente rispetto all'edificio principale, ed infine un immobile per gli uffici ad Est e più sul lato Ovest una zona con sei silos esterni.

Il corpo centrale era costituito da quattro locali per piano divisi tra loro da spesse mura, essi sono indicati da lettere maiuscole nelle figure in pianta di seguito rappresentate. In questa zona aveva luogo l'attività produttiva delle farine.

L'area in cui avveniva la macinazione era situata precisamente nei locali "B" su tutti i piani, mentre nei locali "A" avveniva il deposito della farina e delle granaglie prima della macinazione.

3.4.1.1 Locali 1° piano

Al piano terra, si trovava un ufficio ricevimento merci in prossimità del perimetro dell'edificio sul lato sud nel locale "A1", in vicinanza vi erano due fariniere[10] metalliche che si innalzavano fino al secondo piano e diversi elevatori a tazze.

Sulla parete di divisione con il locale "B1" erano localizzate altre sei fariniere, di cui cinque in legno, un montacarichi ed ulteriori elevatori a tazze. Il pavimento del locale era in calcestruzzo su putrelle di acciaio.

Nel locale "B1" erano presenti la sala laminatoi e ciò che era necessario per la movimentazione delle farine, ed il pavimento era in tavolato di legno.

Il locale ad Est veniva impiegato come magazzino sacchi in cui era presente una scala che portava al piano superiore in cui la farina veniva preparata, per poi essere posta su bancali di legno, Figura 8. Da notare che le aperture originarie erano state tamponate con murature in mattone per separare completamente il locale da quelli adiacenti.

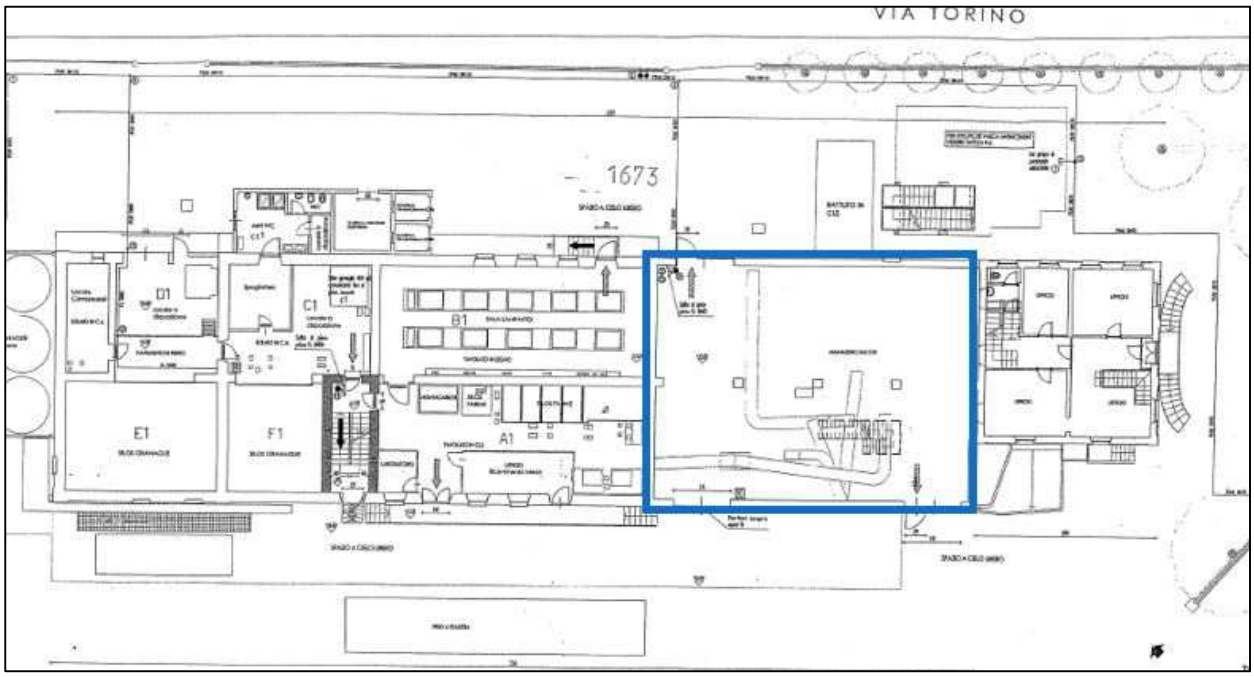

Figura 8 Pianta locali primo piano con in evidenza il magazzino sacchi [13]

3.4.1.2 Locali 2°piano

Il locale "A2" era impiegato per l'insacco delle farine, ed era anch'esso occupato da fariniere ed elevatori a tazze provenienti dal piano inferiore. Il pavimento è il medesimo del piano primo.

Il magazzino sacchi presentava invece un'insaccatrice sul muro adiacente al locale "A2", comunicanti attraverso una semplice porta.

Nel locale "B2" vi erano le semolatrici e la parte inferiore di un silos per le granaglie in metallo.

[10] Silos per lo stoccaggio e movimentazione delle farine in acciaio.

3.4.1.3 Locali 3° piano

Nel locale “A3” i cassoni metallici della crusca invadevano l’area insieme alle parti superiori delle fariniere metalliche e di legno del piano inferiore.

Inoltre il volume era occupato anche da un vano montacarichi e dagli elevatori a tazze. Il pavimento era in legno.

Nel locale “B3” erano presenti tre macchinari per la setacciatura, chiamati “plansichter” e la parte superiore del silos metallico delle granaglie. Oltre a ciò vi era un sistema di trattamento dell’aria con filtro, impiegato per il trasporto pneumatico delle farine.

Il pavimento era in calcestruzzo battuto su putrelle in acciaio.

Ad Est, sul tetto del magazzino sacchi, vi era un locale rettangolare circoscritto da setti di lamiera grecata a cielo aperto.

Nella Figura 9 si nota come il magazzino sacchi a questo livello era già a cielo aperto, formando con il suo tetto un terrazzo su cui erano presenti delle attrezzature e si poteva accedere alla scala in metallo antincendio esterna all’edificio.

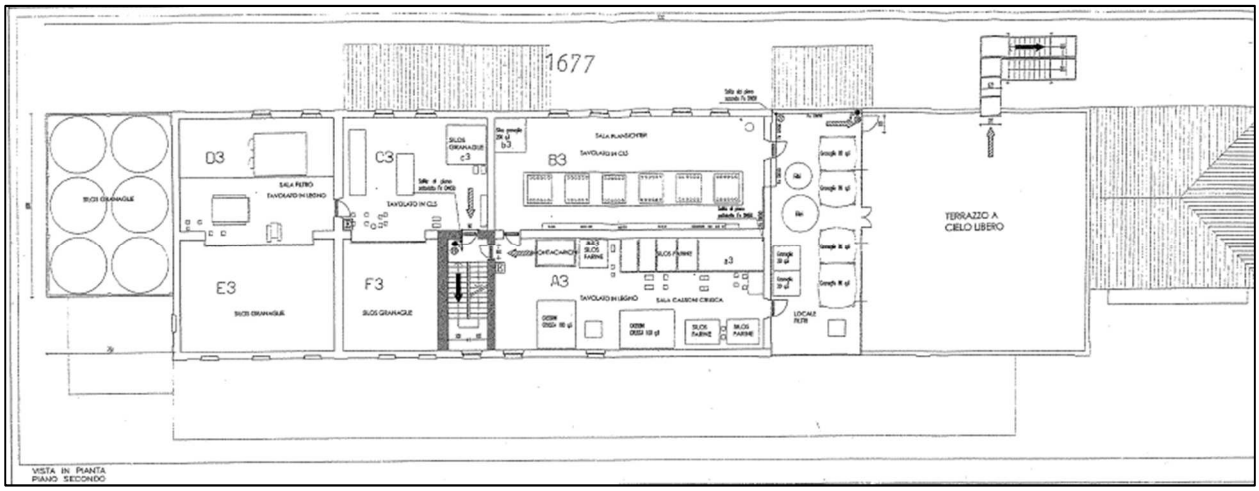

Figura 9 Pianta locali terzo piano [13]

3.4.1.4 Locali 4° piano

Il locale “A4” era occupato dalla cima del vano montacarichi, dalle coclee e dalle condotte di distribuzione e miscelazione delle farine. Il pavimento era in tavolato di legno.

Il locale “B4” presentava al suo interno le macchine per la distribuzione della farina (elevatori, cicloni e valvole a stella) relative ai plansichter.

3.4.1.5 Locali piano seminterrato

Il locale “A0”, era in comunicazione con l’esterno attraverso alcuni finestrotti, posizionati nelle pareti Sud ed Est, che al momento dell’incidente erano murate poiché confinanti con il magazzino dei sacchi.

Le quattro fariniere adiacenti alla parete Sud del locale, erano in tessuto e sostenute da un’intelaiatura metallica. Sempre nel locale vi erano la parte terminale di due fariniere in metallo e di quelle in legno. Il vano montacarichi era presente anche in questa zona.

Il locale “B0” era di ausilio ed utilizzato come deposito per due laminatoi di riserva.

Sul lato Ovest dell’edificio principale vi erano sei silos metallici contenenti granaglie, come indicato in planimetria, collegati ad un sistema di distribuzione e miscelazione mediante coclee.

Nello spiazzo, nella zona Sud dello stabilimento, era presente davanti ai locali “E1” e “F1” la zona di scarico granaglie indicata da una piattaforma, mentre davanti al locale “A1” vi era la piattaforma del peso a stadera della zona di carico della farina.

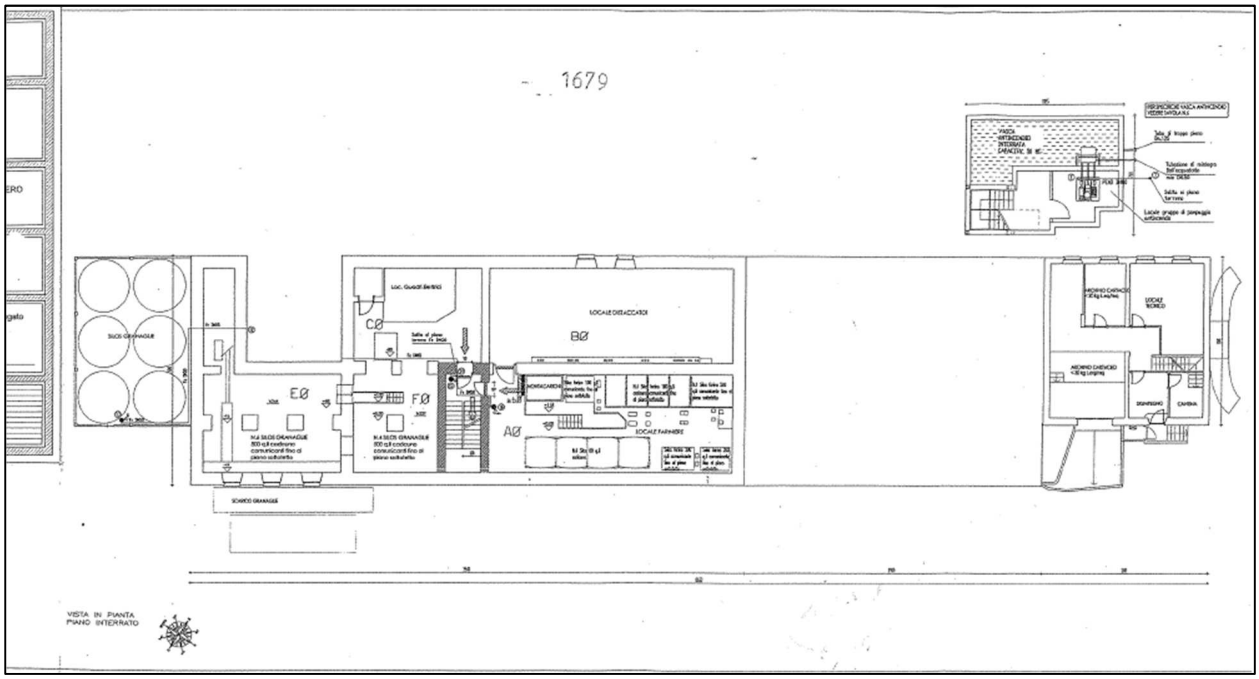

Figura 10 Pianta locali piano seminterrato [13]

Nella parte Est dell’attività, oltre il magazzino sacchi erano presenti gli uffici e i laboratori per lo studio delle farine e ovviamente per la gestione dell’impresa.

3.4.2 Numero di lavoratori e mansioni

L'attività era diretta, come detto in precedenza, da Dario e Aldo Cordero, i quali si scambiavano e dividevano le attività di datore di lavoro e amministratore dell'azienda. Sotto contratto la società manteneva ben 24 lavoratori.

Una delle fasi fondamentali dell'analisi di rischio è proprio quella di focalizzare le diverse attività lavorative adottate nell'azienda e valutarne i rischi per ogni lavoratore. Inoltre questa fase di analisi non si deve dimenticare ovviamente l'area in cui queste attività vengono svolte e le eventuali interferenze che ne possono derivare per la sovrapposizione tra più lavorazioni.

Le mansioni principali erano prevalentemente cinque:

- Tecnici di laboratorio, per lo studio delle farine e delle granaglie;
- Impiegati in ufficio, che si occupavano di tutta la parte burocratica, contabile, commerciale e amministrativa;
- Mugnai, che si occupavano di controllare e selezionare le granaglie in arrivo dai fornitori e successivamente di produrre le farine;
- Autisti, che trasportavano le materie prime e in seguito il prodotto finito con mezzi autobotte;
- Magazzinieri per lo stoccaggio delle farine e delle granaglie nell'edificio.

Ognuna di queste mansioni presentava rischi diversi in funzione della zona e della fase temporale in cui veniva eseguita l'attività.

Per ognuna di queste mansioni era necessario valutare i pericoli derivanti da possibili esplosioni, essendo l'attività soggetta a Direttiva ATEX, e allo stesso modo la valutazione dei rischi doveva essere condotta in modo da coinvolgere tutto il personale e informarlo di questo pericolo, soprattutto chi entrava nelle aree a rischio ATEX, che come sverrà spiegato successivamente non erano state indicate in nessun documento di sicurezza.

3.4.3 Processo di produzione delle farine

Il processo produttivo rispecchia quello relativo a tutti i molini con fasi di macinazione, setacciatura e deposito. In particolare nel caso seguente il ciclo era impostato secondo le indicazioni tratte dall'articolo relativo all'esplosione [13].

La prima fase dell'attività produttiva veniva svolta durante il ricevimento delle forniture di grano all'impianto. Il capo mugnaio o in alternativa il mugnaio, dovevano valutare la qualità delle granaglie in funzione della farina che si voleva ottenere a fine produzione.

Se la qualità raggiunta era ottimale, il capo mugnaio autorizzava il camion del fornitore allo scarico della merce. Lo scarico avveniva per mezzo di camion ribaltabile all'interno di una fossa di accumulo posizionata sul lato che si affaccia su via Paglieri, nel piano interrato, come si può vedere nella pianta dello stabilimento in Figura 10.

Una volta depositato, il grano entrava nell'impianto per mezzo di un caricatore a palette orizzontale denominato "redler". Dopo il trasporto all'interno, il carico veniva mandato verso l'ultimo piano con un elevatore a tazze, che girandosi svuotava il proprio contenuto nella tubazione di collegamento con il separatore, cioè la macchina che eseguiva la prima setacciatura del grano dalle parti più grossolane. Il separatore era situato nella zona pulitura indicata in pianta al penultimo piano.

Già in queste prime fasi della produzione possono notarsi diversi pericoli derivanti dalla formazione di polveri e della possibilità di formazione di atmosfere esplosive. Infatti la presenza di macchine di traporto meccanizzate devono essere valutate in maniera attenta, perché i motori che le azionano o anche un possibile guasto, possono determinare la generazione di temperature elevate o scintille in grado di provocare un incendio o un'esplosione. A regolamentare queste valutazioni e il tipo di macchine da utilizzare è presente ovviamente la Direttiva ATEX.

Superata questa fase il grano scendeva al piano inferiore alla macchina per poi essere inviato, con un elevatore diverso da quello utilizzato in precedenza, all'ultimo piano.

Giunto in prossimità della tubazione di distribuzione, le tazze venivano rovesciate, e il grano veniva smistato nei diversi silos di stoccaggio in funzione delle direttive del mugnaio e per evitare qualità e forniture differenti di grano venissero mischiate.

L'operatore infatti per mezzo di valvole e saracinesche indirizzava la materia prima nelle diverse tubazioni di trasporto. Nell'azienda questo tipo di tubazioni venivano chiamate coclee.

Lo stabilimento contava sei silos esterni all'edificio e 17 al suo interno che si prolungavano per tutti i piani dell'edificio.

Come si può notare anche in questo caso la dispersione di polveri poteva avvenire facilmente durante il travaso dall'elevatore a tazze alle tubazioni di distribuzione. Le tubazioni erano in

materiale antistatico è quindi veniva eliminato il rischio di innesco per scintilla elettrostatico, ma non quello dovuto ad eventuali frammenti metallici presenti nelle granaglie.
La fase successiva consisteva nella pulitura e bagnatura del chicco. Per trasportare il grano alle macchine, si utilizzavano coclee poste in fondo ai silos, che venivano di nuovo azionate su comando del capo mugnaio, ma eseguite dai mugnai.
Una volta azionate le coclee i chicchi venivano spostati con elevatore a tazze sempre all'ultimo piano, per poi essere indirizzato nuovamente nelle tubazioni. Da qui raggiungeva la macchina per la pulitura, chiamata "spazzola" situata nel sottotetto nel locale "D4".
La macchina veniva utilizzata per rimuovere le particelle esterne del grano, cioè i chicchi incontravano una griglia e per attrito e urto contro di essa puliva i semi.
Gli scarti che si formavano venivano aspirati da un'ulteriore macchina, chiamata "tarara" in modo da eliminare il rischio di accumulo degli scarti e allo stesso tempo ridurre la formazione di polveri.
Il grano veniva successivamente inviato verso il basso per raggiungere l'ultimo piano, ove era situata la macchina per espungere dal grano le impurità più fini, facendo passare i chicchi attraverso delle griglie inclinate poste in serie. Il nome attribuito all'interno dell'azienda alla macchina era "separatore".
In questa fase si potevano riscontrare le stesse criticità emerse per rimozione delle particelle esterne più grandi, ma con un pericolo possibile maggiore poiché le polveri prodotte risultavano di dimensioni più piccole poiché il lavoro di raffinamento dei grani era sempre più specifico.
I chicchi appena lavorati risalivano verso l'ultimo piano per mezzo di un elevatore a tazze e nuovamente svuotava per gravità nel macchinario "pulversan", con lo scopo di eliminare i chicchi danneggiati e svuotati dagli insetti. Grazie al moto rotatorio del macchinario, la forza centrifuga faceva sì che i chicchi scontrandosi contro le pareti, si rompessero separando i chicchi interi da quelli svuotati, più leggeri e non utilizzabili.
Scendendo nuovamente di un piano i semi venivano trattati nello "svecciatoio", cioè un sistema formato da cilindri a griglie per separare il grano dalle impurità vegetali, cioè tecnicamente rimuovevano la veccia.
Scendendo ancora di un piano i grani passavano per un nuovo separatore. In questo trattamento venivano eliminate le granelle più grosse di mais.
Infine il grano andava al piano terra dove una macchina con selettore ottico e microcamere controllava la presenza di ulteriori impurità e in caso di rilevamento le espelleva con un getto d'aria.

Giunti a questo punto la pulizia del grano, da quanto si può analizzare, presentava diversi rischi, conseguenti alla presenza di polveri aerodisperse e diversi macchinari la cui conformità alla direttiva ATEX doveva assolutamente essere verificata.
Terminata la pulitura il grano veniva trasportato all'ultimo piano dell'edificio in cui era presente il "bagnagrano". Questa parte dello stabilimento è una di quelle non coinvolta dall'esplosione e dall'incendio. In questo locale la macchina analizzava il contenuto di umidità della materia trattata in precedenza e in base ad essa irrorava i grani per raggiungere il livello programmato dal mugnaio. In questa fase i rischi di incendio sono minimi, infatti la bagnatura non permette il sollevamento di eventuali polveri residue.
Conclusa questa fase, il grano veniva trasferito, per mezzo di sistemi a coclea, verso dei silos appositi per il riposo dei semi. Il processo poteva durare dalle 15 alle 24 ore e non richiedeva nessun intervento di macchinari. In alcuni casi poteva servire un'ulteriore bagnatura e fase di riposo a seconda dei risultai ottenuti dalle analisi dei chicchi.
Le operazioni descritte venivano svolte in automatico su un ciclo intero di 24 ore. Le uniche presenze dei lavoratori, in genere dei mugnai, avvenivano quando dovevano attivare il trasporto tra la bagnatura, i silos e viceversa per mezzo di valvole e saracinesche attivabili solo manualmente, di conseguenza il fattore di contatto era minimo e quindi il rischio esplosione basso.
Il grano veniva trasportato nuovamente all'ultimo piano. In questa fase passava attraverso un'ulteriore macchina nominata "spazzola". La spazzolatura rimuoveva le pellicine non rimosse dalla bagnatura precedente.
A questo punto il grano era pronto per la fase di macinazione e veniva spostato in due cassoni con la funzione di polmone per mantenere il flusso delle operazioni successive costante e senza interruzioni. Uno di questi occupava in altezza l'intero edificio fino al sottotetto.
Il secondo invece era collocato al terzo piano nel locale "C3" dalla quale era raggiunto con un elevatore a tazze che partiva dal fondo del primo cassone.
La pesatura delle quantità di grano avveniva nella bilancia del secondo piano posta sotto il cassone. Terminata la pesatura il grano era inviato alla macinazione.
La bilancia era registrata dal capo mugnaio o dal mugnaio regolando in questa maniera l'afflusso verso la macinazione. Il conteggio avveniva per numero di pesate all'ora a cui corrispondeva un certo quantitativo di farina prodotta. Infatti la velocità del mulino veniva mantenuta costante per ottenere un rendimento migliore.
Il grano pesato era movimentato nuovamente da un sistema a coclee, verso il locale laminatoi, dove iniziava la macinazione.

In questo locale erano presenti dodici laminatoi, infatti nelle attività molitorie dei cereali è necessario ottenere il minor quantitativo di crusca e il massimo di farina, e perché ciò accada i grani ad ogni passaggio successivo davano come prodotto una farina sempre più fine.
Per ogni passaggio nel laminatoio il prodotto veniva rimandato all'ultimo per poi venir fatto passare al terzo piano in alcuni separatori appositi, chiamati plansichter per eliminare lo scarto e poter passare alla macinazione successiva.
I plansichter erano tre e situati al terzo piano ed erano costituiti da filtri con maglie differenti in funzione del tipo di farina da ottenere. I principali erano crusca, tritello, granito, tipo "0" o tipo "00", dalla meno alla più fine e più lavorata. Gli ultimi due tipi soprattutto sono facilmente disperdibili in aria e agevolmente innescabili se in concentrazioni rientranti nei limiti di esplodibilità.
Le valutazioni del rischio esplosioni in questi locali dovevano essere molto accurate poiché la presenza di polveri aerodisperse molto fini aumentavano la probabilità di un evento incidentale.
Il piano tra i plansichter e i laminatoi conteneva i locali per l'uso delle "semolatrici" per estrarre il granito, le "spazzole crusca" per staccare le particelle di farina dalla crusca e i "turbostacci" sempre con funzione della macchina precedente.
Questi macchinari non erano utilizzati in continuo, ma solo se necessario. Il loro scopo era quello di trattare il prodotto più grezzo.
Concluse queste fasi, il prodotto finito veniva trasportato nei silos farine, o anche chiamate fariniere, nel locale "A3".
Si può comprendere facilmente che i rischi maggiori erano proprio all'interno di questa parte dell'edificio, soprattutto per la presenza elevata di farine, anche non aerodisperse, che contribuivano ad incrementare sia il carico d'incendio nei locali che il rischio esplosioni.
Proprio questa parte di edificio è quella andata completamente distrutta dopo l'incidente.
Successivamente si trasferiva il carico alle autocisterne mediante coclea a caduta.
Viceversa lo scarico dalle autocisterne era eseguito con trasporto pneumatico, grazie all'utilizzo di un compressore sul mezzo, e mediante uso di una tubazione flessibile, in materiale plastico, connessa alla tubazione in acciaio flangiata, fissata allo stabilimento, Figura 11.

Figura 11 Tubo di ripompaggio flangiato [13]

Figura 12 Esempio di scarico delle farine sui mezzi di trasporto [13]

Questa tubazione si estendeva dal locale "A0" fino alle fariniere attraversando i locali dal primo al quarto piano, dove andava a ramificarsi e per mezzo di valvole deviatrici e distribuiva il prodotto alle fariniere.

Il trasporto del materiale alle autobotti, e viceversa, è stata la causa di innesco dell'incidente, ed era quindi una di quelle operazioni che doveva essere valutata con maggiore attenzione per poter

organizzare strumenti di prevenzione come l'informazione, formazione dei dipendenti oltre ad interventi tecnici. Nelle cause dell'incidente è stato valutato influente la prima fase di carico della farina nell'autocisterna poiché probabilmente già in quel momento si è accumulata della carica elettrica.

3.4.4 Materie prime e prodotti

L'azienda era nota nella città di Fossano per la sua lunga storia di produzione delle farine da almeno 50 anni. Il principale cereale lavorato era il frumento, dal quale venivano prodotti diversi tipi di farine.

Da quanto si conosce dagli studi e dalla ricerca scientifica, la granulometria, il contenuto di umidità dell'aria, la polvere aerodispersa, tanto quanto la sua concentrazione, influiscono fortemente sui parametri dell'innesco delle nubi di polvere combustibili e sull'energia che sono in grado di liberare durante la combustione.

Il frumento è il cereale, insieme al mais e al riso, con la produzione mondiale maggiore. Quindi conoscere le caratteristiche dal punto di vista chimico, del prodotto e della materia prima utilizzata è necessario per una corretta valutazione del rischio.

Le polveri combustibili sono caratterizzate da diversi parametri importanti per la valutazione della loro pericolosità.

Un modo per indicare e confrontare la pericolosità delle polveri combustibili è utilizzare il metodo di riferimento di Bartknecht, in Tabella 4, suddividendo una scala di valutazione in quattro classi di esplodibilità dipendenti dal valore di k introdotto nel Capitolo 1.3.4.

Tabella 4 Classe di appartenenza secondo Bartknecht in funzione di k. Tratta da [3].

Classe di esplodibilità	**k [bar·m/s] con un innesco da 10 kJ**	**k [bar·m/s] con un innesco da 10 J**	**Tipo di esplosione**
St0	0	0	Nessuna
St1	0-200	0-100	Debole
St2	200-300	100-200	Forte
St3	>300	>200	Molto forte

In Tabella 5 invece sono indicati alcuni valori indicativi di k di diversi tipi di polvere.

Tabella 5 Valori di k per alcune polveri combustibili [3]

Polvere	**k [bar·m/s]**
Alluminio	16-750
Amido	150
Aspirina	217
Cellulosa	56-229
Farina	87
Polietilene	54-131
PVC	27-98

Come si nota dalle tabelle, la farina non genera l'aumento di pressione maggiore rispetto ad altre polveri, ma rientra nella categoria St1. Quello che è necessario valutare però è anche il grado di confinamento della polvere, parametro fondamentale che incrementa la potenza delle esplosioni, facendole evolvere da deflagranti a detonanti.

Altri valori fondamentali da conoscere per la farina di frumento sono elencati nella Tabella 6 e sono dati indicativi ricavati da letteratura che quindi possono variare in funzione del tipo di grano o farina, come anche in funzione delle condizioni al contorno del luogo in cui sono presenti:

Tabella 6 Parametri esplodibilità farina di grano [7]

LEL [mg/L]	T autoaccensione [°C]	MIE [mJ]	Pmax [bar]
50	380	50	7,5

Come si nota dal valore del limite inferiore di esplosività della farina il valore è molto basso. Nelle attività che ne fanno uso, come i molini o gli stoccaggi, queste concentrazioni sono poche volte raggiunte poiché sono molto elevate uscendo completamente dai limiti di esplosività. I casi in cui ciò non avviene sono in circostanze particolari di pulizia, trasporto o per mal funzionamenti e guasti che provocano delle condizioni di pericolo.

La temperatura di autoaccensione è un parametro di cui tener conto soprattutto negli stabilimenti dove vengono immagazzinate, per lunghi periodi nei sili, le granaglie; infatti alcune sementi possono dare reazioni chimiche in particolari condizioni che innalzano la temperatura nel contenitore, raggiunta la temperatura di autocombustione si formano delle braci che per effetto del calore e dei moti convettivi dell'aria innalzano piccole quantità di polveri, che innescandosi, danno luogo alle esplosioni.

Secondo degli studi sulla frequenza delle esplosioni da polveri di cereale il frumento è uno di quelli con la minore probabilità di accadimento [9], ma comunque con effetti disastrosi, poiché nella maggior parte dei casi le farine sono stoccate in grandi quantità.

3.5 Analisi dell'evento

L'incidente avvenuto al Molino Cordero fu molto violento e scaturì importanti riflessioni nell'opinione pubblica per la sicurezza dei lavoratori sul lavoro e in particolare nelle aziende cerealicole presenti nella zona.

In Figura 13 si può vedere la condizione del mulino appena dopo l'arrivo dei vigili del fuoco.

Figura 13 Situazione appena dopo l'arrivo dei VVF [13]

L'esplosione è stata molto violenta sventrando l'edificio centrale e provocando vibrazioni avvertite ad un discreto raggio di distanza e nelle abitazioni vicine.

Di seguito in questo capitolo verranno analizzate le cause dell'incidente.

3.5.1 Dinamica dell'incidente

L'incidente è accaduto nel 2007 in un pomeriggio di luglio, alle 14:30 con temperatura sopra i 25 °C e un'umidità inferiore al 45%.

La dinamica dell'evento è complessa ed è da attribuire ad un'esplosione di polveri combustibili, nello specifico farina di frumento.

L'innesco ha provocato un'esplosione primaria e diverse secondarie causate dalle polveri presenti nello stabilimento, sollevate dal primo fenomeno. La dinamica è stata ricostruita in base all'analisi dei danni che sono riportati e descritti nell'articolo che riassume le cause e le conseguenze dell'evento [13].

Secondo quanto ricostruito, era in atto una consegna di farina, dall'edificio verso un'autocisterna aziendale per essere venduta ad un cliente.

Il carico avveniva per mezzo di una coclea per caduta. Al termine dell'operazione l'autocisterna risultava esser stata caricata in maniera eccessiva rispetto a quanto previsto dall'ordine. Per questo motivo, si agiva con l'operazione di scarico del prodotto in eccesso dal mezzo verso una delle fariniere, attraverso trasferimento pneumatico.

Questo tipo di movimentazione prevedeva l'attacco dell'autocisterna ad un condotto di ripompaggio metallico, con l'uso di una tubo flessibile in gomma.

L'impianto permetteva di movimentare, con l'utilizzo di un flusso d'aria, le farine, le quali venivano distribuite nei locali attraverso un sistema di tubazioni in acciaio. La portata era regolata direttamente dall'autobotte attraverso un sistema di valvole manuali.

Nel momento dello scarico la portata di farina risultava bassa, di conseguenza la concentrazione nel tubo di trasferimento del prodotto, rispetto a quanto si dovrebbe fare di norma in caso di trasferimento del carico al cliente.

Il sistema di trasporto comprendeva due elementi metallici, autobotte e tubo di ripompaggio, separati dalla manichetta, elemento non conduttivo di lunghezza 6 m. L'analisi dal punto di vista della conducibilità elettrica è importante per capire come si è manifestata l'esplosione. I due oggetti metallici secondo le investigazioni non erano collegati a dispersore di terra, anche se il mezzo disponeva dell'apposito attacco, mentre il condotto a cui si collegava il tubo di ripompaggio lo era. Come detto precedentemente nel capitolo 1.6, relativo agli inneschi, l'accumulo di carica elettrostatica, causato dal trasporto pneumatico, in un tubo isolante, può provocare una scintilla in grado di dar luogo alla propagazione di un'esplosione.

La polvere in movimento a contatto con il tubo in materiale isolante può aver causato l'accumulo di carica. Allo stesso modo non è detto che l'accumulo possa essere avvenuto già precedentemente durante il carico da fariniera ad autocisterna e quindi successivamente si è sommata ad essa.

La carica per generare la scintilla ha dovuto trovare un punto di scarico e in quel caso il tubo metallico al fondo della manichetta ha fatto da conduttore.
Ovviamente la sola scintilla non avrebbe avuto effetto se non ci fosse stata una concentrazione di farina tale da determinare un'atmosfera esplosiva. Purtroppo la concentrazione di polvere, in quelle condizioni di temperatura, pressione e umidità, rientrava nei limiti di esplosività della farina.
La causa principale è l'utilizzo di una portata d'aria inferiore agli standard di sicurezza che ha provocato la diluizione eccessiva della polvere.
A seguito dell'innesco, la reazione si è propagata nel condotto metallico lungo la direzione del flusso. Il confinamento ha accelerato notevolmente la combustione e i gas prodotti, non trovando via di fuga, hanno provocato un aumento improvviso della pressione che si è spostata lungo il condotto aumentando la violenza del fenomeno.
Il fronte di pressione ha generato una sollecitazione meccanica che ha deformato le flange del condotto, rinvenute successivamente, e di conseguenza il fronte di fiamma ha potuto uscire dalla tubazione innescando le esplosioni secondarie negli altri locali.
Da lì in poi l'esplosione si è estesa in modo articolato dando luogo a fenomeni secondari all'interno dei locali.
Raggiunta la fariniera in cui stava avvenendo il ripompaggio e il deposito della farina, il fronte di fiamma unito alla presenza di una nube di polvere ha innescato una violenta esplosione. Questo grande evento, ha provocato un fronte di pressione che si è esteso in tutti i locali passando nel vano del montacarichi. Il fronte di pressione ha raggiunto i locali inferiori fino al piano seminterrato dove ha dato sfogo alla sua potenza e di conseguenza ha generato ulteriori esplosioni secondarie dovute al sollevamento delle polveri depositate su pavimenti e macchinari.
Secondo un rapporto precedente i locali presentavano strati di polvere depositati a causa della mancata pulizia, questo ha favorito il sollevamento di ulteriori polveri che hanno contribuito a far propagare la reazione negli altri locali, come per esempio il magazzino sacchi.
Inoltre il tetto veniva distrutto come anche le strutture murarie causando una proiezione di macerie a grande distanza.
Il fronte di pressione si è esteso lungo i locali "B" provocando ancora danni ingenti, fino al raggiungimento dell'area relativa al magazzino sacchi in conseguenza ai finestrotti presenti nelle mura non sufficientemente sigillati da un riempimento in mattoni forati e quindi poco resistenti.
L'esplosione si è quindi sviluppata con un incendio generalizzato che ha provocato la combustione e distruzione della maggior parte dei materiali combustibili, diverse solette, la travatura del tetto e ovviamente la farina presente nelle fariniere e nel magazzino sacchi.

3.5.2 Danni esplosione e incendio

I danni provocati dall'esplosione hanno coinvolto gran parte dello stabilimento nella parte centrale, e parti esterne ad esso, come gli edifici limitrofi. In particolare il corpo centrale è crollato quasi del tutto, ma anche a seguito delle operazioni di messa in sicurezza delle macerie pericolanti nel periodo successivo all'evento e a cui fa riferimento il documento all'analisi dell'esplosione [13].

Dalle perizie svolte presenti nella sentenza che ha coinvolto la ditta Cordero sono emersi i danni alle strutture e valutate le cause.

Le parti dello stabilimento che si affacciavano su Via Paglieri, in Figura 14, in particolare i locali A, sono stati danneggiati da una forte sovrappressione, la quale è variata in funzione della quota, cioè non in modo omogeneo su tutti i piani. La presenza di segni di proiezione delle strutture e delle macerie verso l'esterno e verso l'alto dimostrano quanto descritto sopra.

Figura 14 Fotografia stabilimento lato Via Paglieri [13]

Differentemente i locali B di Via Torino sono andati distrutti per un collasso statico, infatti crollando su se stesso i resti delle mura e delle macchine sono rimasti all'interno del perimetro dello stabilimento. Ovviamente anche questa parte di edificio è stato coinvolto dall'esplosione e alcune parti di macerie sono state proiettate a notevole distanza.

Il magazzino sacchi situato ad est dei locali A e B, ha subito danni prevalentemente da incendio, infatti parti come le pignatte sono esplose per le alte temperature e le solette si sono deformate per lo stesso motivo. Non sono mancati danni da sovrappressione provocati dall'esplosione con la

proiezione dei tamponamenti dei finestrotti e le porte di collegamento con la parte centrale dell'edificio. Sono stati provocati danni anche alla struttura situata sul tetto del magazzino.
Dall'esterno inoltre i silos delle granaglie esterni, situati sul lato Ovest, non presentavano danni visibili. Lo stesso discorso vale per gli uffici posti nella zona ovest più esterna.
Quindi per identificare il propagarsi dell'esplosione nello spazio e in ordine temporale sono state fatte delle analisi sui danni all'interno dei locali coinvolti maggiormente dall'evento.
Nel locale "B0" sono stati rinvenuti i macchinari che erano presenti nei piani superiori, infatti come detto in precedenza questo lato dell'edificio è crollato su sé stesso. I macchinari in questione erano i plansichter, i laminatoi, i cicloncini, le linee di coclee e gli elevatori a tazze, e a confermare l'ipotesi del collasso strutturale vi sono elementi privi di danni da incendio con la verniciatura ancora intatta.
I locali del lato sud sono posizionati nel punto di innesco dell'incidente. Nel locale "A0" non sono stati individuati danni o spostamenti provocati da un forte aumento di pressione, ma principalmente dovuti ad un lungo periodo di esposizione al calore, Figura 15.
Sul lato di confine con i locali B, il montacarichi ha subito grossi danni come anche la fariniera in acciaio, mentre di quelle di legno non è rimasto nulla. Inoltre sono state individuate alcune parti degli elevatori a tazze e soprattutto il tubo di ripompaggio delle farine da autobotte a fariniere, luogo dell'innesco dell'esplosione iniziale. Nei dintorni del tubo sono presenti evidenti danni da sovrappressione.

Figura 15 Immagine locale A0 [13]

Il locale "A1" è stato molto danneggiato con il crollo della soletta. Le fariniere e un elevatore a tazze sono stati rovinati dall'azione dell'incendio, il montacarichi invece è stato divelto dalla sovrappressione interna dell'esplosione. Le finestre e le porte sono state proiettate all'esterno del locale. In quest'area è stato recuperato il corpo dell'autista Mario Ricca senza vita.

Sul suolo sono rimaste in grande quantità sia macerie che farina non completamente bruciata.

La soletta del locale risultava deformata dal basso verso l'alto a causa della pressione, mentre sul lato Ovest del locale una parte di essa è stata ribaltata e sollevata per poi ricadere. La soletta in prossimità delle fariniere è completamente crollata.

Il secondo piano dei locali A è stato fortemente danneggiato per la pressione dell'esplosione e subito dopo l'evento, l'unico elemento rimasto in piedi è stato il muro che si affacciava su Via Paglieri. In seguito è stato rimosso a causa dello stato pericolante.

I locali "A3" e "A4", in Figura 16 sono stati divelti con annessa proiezione del tetto e delle mura perimetrali sul lato di Via Paglieri, insieme a tutte le macchine e attrezzature che erano presenti al loro interno. Ancora a dimostrare la propagazione dell'onda di pressione nel vano montacarichi, la piastra sommatale è stata divelta e proiettata nelle vicinanze.

Figura 16 Immagini locali A3 e A4 [13]

Il dettaglio di maggior interesse è sicuramente quello relativo al tubo di ripompaggio delle farine dall'autocisterna alle fariniere.

Il tubo era in acciaio flangiato DN 100, parte di esso è stato rinvenuto nelle macerie.

Figura 18 Tubo di ripompaggio delle farine prime dell'esplosione [13]

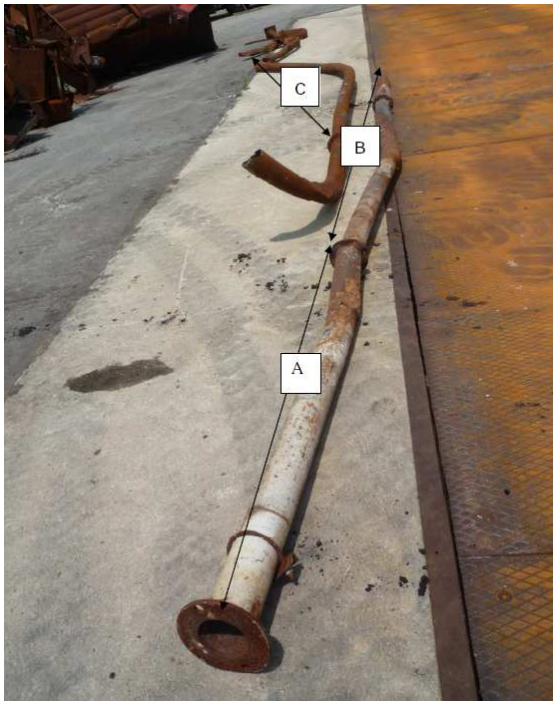

Figura 17 Tubo di ripompaggio delle farine dopo l'esplosione [13]

Analizzando gli elementi in prossimità dell'attacco con la manichetta era presente un tappo di farina compressa dovuto all'elevata pressione dell'esplosione, inoltre le flange dei tubi presentavano deformazioni dovute ad una notevole pressione interna come si nota dalla Figura 19.

Figura 19 Deformazioni flangia del tubo in acciaio coinvolto nell'esplosione [13]

Il percorso del tubo era in orizzontale nel locale "A0" per qualche metro per poi piegare a 90° verso l'alto e salire in verticale ai piani superiori. Tutte le parti di tubo che si sviluppavano nei piani superiori non sono stati rinvenuti dalle perizie, se non per alcuni spezzoni, dimostrando ancora di più la potenza dell'esplosione.

3.5.3 Infortuni mortali/feriti

L'incidente occorso quel giorno ha provocato ben 5 vittime, quattro erano impiegati della ditta Cordero mentre il quinto era un manutentore a capo di una ditta esterna.

Secondo quanto accaduto l'autista dell'autocarro, Mario Ricca, che era impegnato a scaricare la farina è morto a causa dell'esplosione primaria avvenuta nella tubazione di ripompaggio poi propagatosi nel locale in cui è stato ritrovato il corpo, cioè il locale "A1", a causa delle esplosioni secondarie.

Gli altri quattro lavoratori, Massimiliano Manuello, Marino Barale, Valerio Anchino e Antonio Cavicchioli, secondo le testimonianze sono stati colpiti anche loro dalle esplosioni, più precisamente dai fronti di fiamma, e sono stati soccorsi fuori dall'edificio dalla quale si sono allontanati con le proprie gambe.

Le conseguenze provocate dall'esplosione purtroppo sono state numerose ustioni e di grado elevato che nei giorni successivi all'evento hanno portato alla morte degli infortunati.

3.6 Definizione delle problematiche riscontrate nella valutazione del rischio

Le principali problematiche riscontrate sono da ricondurre interamente alla valutazione dei rischi non correttamente eseguita e delle conseguenti misure di prevenzione non adottate.

Per esempio nei documenti non era presente nessuna indicazione sulla classificazione delle aree con rischio di esplosione, di cui c'è l'obbligo, come ancora meno era presente l'indicazione con cartelli di rischio EX in queste aree.

Gli impianti elettrici secondo i documenti di valutazione del rischio risultavano a norma, ma da quanto risultava dalla testimonianza del titolare della ditta di manutenzione dell'impianto elettrico, la maggior parte dei quadri elettrici era obsoleto e progressivamente stavano per essere sostituiti, in più confermava che la stazione di messa a terra nella zona dell'autocisterna non è mai stata presente o comunque da esso mai progettata e costruita. Bisogna inoltre ricordare che in tutte le aree a rischio esplosioni lampade, interruttori e quindi i dispositivi elettrici devono essere conformi alla Direttiva ATEX.

Nel documento viene inoltre dichiarata la presenza di impianto antincendio con rivelatori di fumo, poi risultato non presente effettivamente nei luoghi di lavoro.

Le condizioni igieniche di pulizia dell'ambiente di lavoro da documento risultavano adeguate, ma secondo le diverse testimonianze la maggior parte dei sistemi di trasporto, nella fase di scarico delle granaglie e delle farine, disperdevano quantità discrete di polvere sulle superfici e nell'ambiente. Nonostante fosse presente una ditta di pulizie che operava su tre giorni alla settimana le condizioni di pulizia non erano sufficienti a garantire le condizioni di sicurezza.

Dai sopralluoghi sulle macchine e apparecchiature risultavano informazioni imprecise. Per esempio le fariniere in stoffa e in acciaio, presenti rispettivamente nei locali "A", non venivano nemmeno citate, come anche la descrizione del sistema sollevamento e distribuzione delle farine, erroneamente descritti come pneumatici, ma nella realtà si trattava di coclee ed elevatori.

Fondamentale è la mancanza nel documento della fase di scarico da autobotte a fariniera, cioè della causa prima dell'incidente. Inoltre, nonostante le lacune, dal documento risultavano ben 17 criticità in cui il rischio veniva considerato "non accettabile", a cui erano state imposte delle misure di minimizzazione e prevenzione.

Ovviamente a causa dei danni dell'esplosione, non è stato possibile verificare l'attuazione di tutte le azioni previste dal documento.

Inoltre la mancanza di sistemi di sfogo, di soppressione o confinamento dell'esplosione, come ad esempio nei filtri sulla tettoia e sui sistemi di trasporto con elevatori a tazze hanno aggravato le conseguenze dell'incidente.

Per quanto riguarda le misure di prevenzione contro gli inneschi, nel documento è riportata, la raccomandazione della messa in equi-potenzialità verso terra e l'utilizzo di raccordi antistatici nei

“sili di stoccaggio” delle farine, che però risultavano piuttosto generici e imprecisi riguardo al luogo e alle apparecchiature per cui venivano impiegate, essendo non specificate.
Infatti per l’azione di carico da fariniere ad autocisterna non era presente nessuna indicazione riguardante la messa a terra di questi e nemmeno sulla portata da utilizzare per evitare il formarsi di un’atmosfera esplosiva.
Tutti gli errori presenti nella valutazione del rischio sono le “cause radice” dell’incidente avvenuto nel mulino.
L’utilizzo di una corretta analisi dei fattori di pericolo, delle strutture, del contesto, delle fasi del processo di produzione, ma anche di una adeguata informazione, formazione e addestramento successiva alla valutazione, avrebbero potuto prevenire l’evento.

3.6.1 Sentenza e colpevoli

L’incidente ha provocato numerosi danni e ben cinque vittime, di conseguenza a posteriori il caso è stato sottoposto a numerose indagini e perizie per analizzare le problematiche riscontrate quel giorno, e che hanno dato luogo all’esplosione.
Come detto in precedenza la causa effettiva dell’innesco è dovuta ad una scintilla elettrostatica durante l’azione di ricarico da autocisterna a fariniera, generata dall’attrito della polvere con il tubo in gomma utilizzato per il trasporto pneumatico della farina. Le cause prime però si devono riscontrare già nelle fasi precedenti di valutazione e gestione del rischio.
Per la valutazione del rischio negli ambienti di lavoro, nel 2007, si faceva ancora riferimento al D.lgs. 626/94 sostituito ora dal D.lgs.81/08. Inoltre l’attività era soggetta a valutazioni specifiche come per esempio la compilazione del documento di protezione contro le esplosioni.
La valutazione dei rischi era stata affidata ad una società esterna, nota per la specializzazione in ambienti di lavoro a rischio esplosione. Nonostante ciò la valutazione non raggiungeva i requisiti principali che essa doveva avere.
In primis il documento risultava generico e impreciso nei contenuti, a causa della mancata presenza di materiali importanti, come il diagramma di processo strumentato, impiegato per la descrizione delle apparecchiature, dello schema delle tubazioni e delle valvole, delle strumentazioni, di protezione fondamentale per un’analisi di rischio in un contesto come quello del molino in questione.
Nel 2010 il tribunale di Cuneo ha inflitto le condanne ai due titolari dell’azienda. Dario Cordero è stato condannato a 4 anni con l’accusa di omicidio colposo plurimo, e il figlio Aldo Cordero a 6 anni per omicidio colposo plurimo e crollo colposo, più 2 anni per omissione dolosa di misure antinfortunistiche secondo l’art.437 del Codice Penale.
In appello in Cassazione, nel 2018, la pena di Aldo Cordero è stata ridotta da 8 a 5 anni per la richiesta di rito abbreviato che implica la diminuzione di un terzo della pena iniziale.

3.7 Discussione delle misure di prevenzione atte a evitare ripetizione di eventi analoghi

La comprensione negli anni delle cause principali di incidenti nati da polveri combustibili organiche ha permesso di sviluppare azioni preventive per far sì che fenomeni di questo tipo non accadano. Bisogna pensare che oltre ai danni dell'esplosione incidenti, come questo del molino Cordero, implicano danni economici incredibili sia per i risarcimenti alle vittime sia per quelli derivanti dalle cause che si protraggono per anni. Per esempio l'impresa è riuscita a proseguire la lavorazione ancora per qualche mese successivo all'incidente, grazie all'utilizzo di un altro stabilimento, ma poco dopo ha dovuto chiudere, dichiarando il fallimento.

La filosofia della prevenzione permette quindi di evitare che possano accadere eventi da cui poi non è più possibile tornare indietro. Di seguito saranno esplicitate le principali metodologie per evitare l'accadimento di questi incidenti.

3.7.1 Analisi di rischio

Le misure principali atte ad evitare il ripresentarsi di un evento di questo tipo sono presenti nelle direttive sulle atmosfere esplosive e sulla sicurezza sul lavoro. In particolare si devono eliminare le condizioni di formazione dell'atmosfera esplosiva e del suo successivo innesco.

La prima cosa da tenere in conto è la corretta valutazione del rischio, da attuarsi già in fase di progettazione dell'impianto produttivo.

Ciò significa garantire il concetto di "Prevention through Design", cioè integrare la sicurezza nella primissima fase di progettazione dell'attività.

Per poter garantire risultati in qualità bisogna tener conto di tutte le migliori tecniche disponibili sul mercato per il settore della sicurezza e della produzione di farine.

Fondamentale è la stesura dello schema di impianto, compreso di tutte le attrezzature, gli apparecchi e le tubazioni, e della successiva analisi delle operazioni che vengono svolte al suo interno, come anche tutte le attività in cui è coinvolto un lavoratore.

La mansione e le operazioni svolte devono essere analizzate per mezzo di tecniche di investigazione in grado di individuare i pericoli specifici che possono essere causa di un'esplosione, per esempio con la Job Safety Analysis.

Come analizzato nel caso in questione, la principale causa dell'esplosione non è l'errore umano dell'operatore dell'autocisterna che ha dimenticato di collegare alla presa di terra il mezzo, ma è la mancata valutazione dei rischi relativa all'operazione di scarico della farina dall'autobotte alle fariniere e le conseguenti lacune nell'informazione e formazione sull'operazione. Inoltre la mancanza della presa di terra per il collegamento dell'autocisterna obbligava l'attività ad essere compiuta in condizioni di pericolo.

Ciò dimostra che un'analisi di rischio deve sempre tener conto dell'ambiente e dell'attività svolta.

Nello specifico delle polveri di cereali si devono individuare le caratteristiche di infiammabilità con analisi chimiche che tengono conto degli standard tecnici di riferimento. Successivamente si deve eliminare qualsiasi dispersione nell'ambiente di particelle e di conseguenza eliminare le fonti d'innesco come scintille e fonti di calore.

Per esempio l'esplosione secondaria generata nella fariniera in legno a valle del tubo di ripompaggio poteva essere evitata se il fronte di fiamma non avesse incontrato una nube di polvere sollevata nella fase di deposito al suo interno. Per evitare ciò sarebbe bastato inserire tra i due elementi un ciclone che abbattesse le polveri sollevate.

Se ciò non è possibile devono progettarsi metodi di inertizzazione per abbassare la concentrazione di ossigeno nell'aria in modo che la carenza di comburente non permetta al combustibile di reagire con esso.

Si deve imporre il collegamento a terra degli impianti ed individuare se già presenti o eliminare in principio quelli isolanti in grado di sovraccaricarsi e generare inneschi di tipo elettrostatico.

3.7.2 Documento di protezione contro le esplosioni(DPE)

In secondo luogo le misure preventive per evitare che si verifichino esplosioni simili devono appunto emergere dalla valutazione del rischio e devono agire in primis sulla formazione dell'atmosfera esplosiva. Per poter lavorare in condizioni di rischio esplosione il datore di lavoro deve redigere il documento di protezione contro le esplosioni. Il documento prescrive che nelle aree a rischio esplosione le azioni devono essere impartite dal datore di lavoro.

Inoltre devono essere indicate le autorizzazioni per le attività che interferiscono con la lavorazione principale e che possono essere pericolose e innescare delle atmosfere esplosive.

Tutte le misure protettive da utilizzare sui dispositivi e le attrezzature devono essere indicate nel documento e devono essere conformi alla Direttiva ATEX.

Deve essere indicato il sistema e le modalità di evacuazione nel momento di una possibile esplosione e quindi garantire che venga effettuata in sicurezza.

Quindi la prima azione da svolgere è l'eliminazione del materiale combustibile dall'ambiente di lavoro, in questo caso la polvere di frumento, ove possibile, agendo sulla miglior efficienza dei macchinari, sull'incremento della pulizia delle superfici presenti, evitando l'accumulo di strati di polvere, ed utilizzando sistemi di ventilazione e filtraggio per l'abbattimento delle particelle. Queste operazioni ovviamente devono essere fatte con l'utilizzo di strumenti conformi alla Direttiva ATEX.

Nel caso specifico dell'incidente l'atmosfera esplosiva è stata generata dalla bassa portata di farina utilizzata nel trasporto pneumatico.

Ciò poteva essere evitato con l'utilizzo di una valvola automatica, e non manuale, in modo da impedire lo scarico con una portata bassa e di conseguenza con una concentrazione di polvere rientrante nei limiti di infiammabilità della farina in questione.
La seconda azione o misura preventiva è l'eliminazione del comburente, o meglio l'abbassamento della concentrazione di ossigeno sotto il LOC (Lower Oxygen Concentration) tale per cui la reazione non può avvenire.
Per applicare questa misura preventiva si utilizza la tecnica di inertizzazione, di cui sì è discusso nel capitolo 1.6.3.
Questa tipologia di prevenzione deve tener conto anche dei pericoli derivanti da un calo di ossigeno nell'ambiente e quindi del rischio di soffocamento per i lavoratori, di conseguenza deve essere valutata questa opzione facendo uso di sistemi confinati che escludano l'ambiente di lavoro.
La terza misura preventiva consiste nell'eliminazione della sorgente d'innesco.
Questi ultimi possono essere di numerosi tipi, come già descritto nel capitolo 1.6.1, e quindi l'indicazione delle possibili sorgenti e la loro mitigazione ed eliminazione è fondamentale. Per il caso in esame la fonte d'energia è stata una scintilla elettrostatica formatasi dall'accumulo di carica sulla manichetta del trasporto pneumatico, per evitare che questo accada, l'autocisterna doveva essere collegata al dispositivo di messa a terra, il materiale della manichetta doveva essere in materiale non isolante in modo da evitare l'accumulo della carica elettrica.

3.7.3 Risultati CCCP

Lo studio dell'evento accidentale per mezzo del software CCCP è finalizzato a comprendere le cause dell'infortunio mortale occorso ai lavoratori senza valutazioni soggettive e valutare i metodi di prevenzione e protezione necessari a evitare che si ripeta.
La situazione in esame ha coinvolto cinque lavoratori i quali sono deceduti tutti per le ustioni provocate dall'esplosione. Di conseguenza è stato analizzato solo l'infortunio occorso a Mario Ricca, l'autista dell'autocisterna, poiché per tutti gli altri la causa dell'infortunio è stata la stessa, cioè l'esplosione.
L'incidente occorso al Molino Cordero è stato di tipo rilevante e di conseguenza si differenzia rispetto alla maggior parte degli infortuni che avvengono sul luogo di lavoro in Italia e dalla caratteristica del programma, nato per infortuni non rilevanti, ma comunque è stato possibile ottenere dei risultati utili che soddisfano l'obiettivo di ottenere informazioni sugli interventi da eseguire per evitare che l'evento accadesse.
Il programma inoltre presenta al suo interno un linguaggio standardizzato e utilizzato nelle banche dati infortunistiche nazionali europee, di conseguenza è molto generale nell'indicare le cause e le soluzioni tecniche ed organizzative da utilizzare.

Inoltre l'utilizzo necessita della conoscenza dettagliata delle caratteristiche dell'infortunio e la catena incidentale, comprese le cause prime che hanno portato all'evento. Per questo motivo di seguito verranno descritti i passaggi dettagliati svolti durante il lavoro.

La prima azione da fare è inserire nella scheda “Dati identificativi dell’evento” tutte le informazioni sull’evento, in particolare si indica la data e l’ora di accadimento, il luogo dell’infortunio e di conseguenza l’azienda sanitaria locale di competenza, la classe di età dell’infortunato. Non tutti i dati sono obbligatori da inserire, e nel caso specifico del caso sono stati immessi solo i dati di cui si era a disposizione, e lo stesso vale per tutte le schede successive. In Figura 20 si può vedere la grafica presente nel software e le numerose informazioni che possono essere introdotte nei campi. Le scritture evidenziate indicano la possibilità dell’inserimento di un allegato.

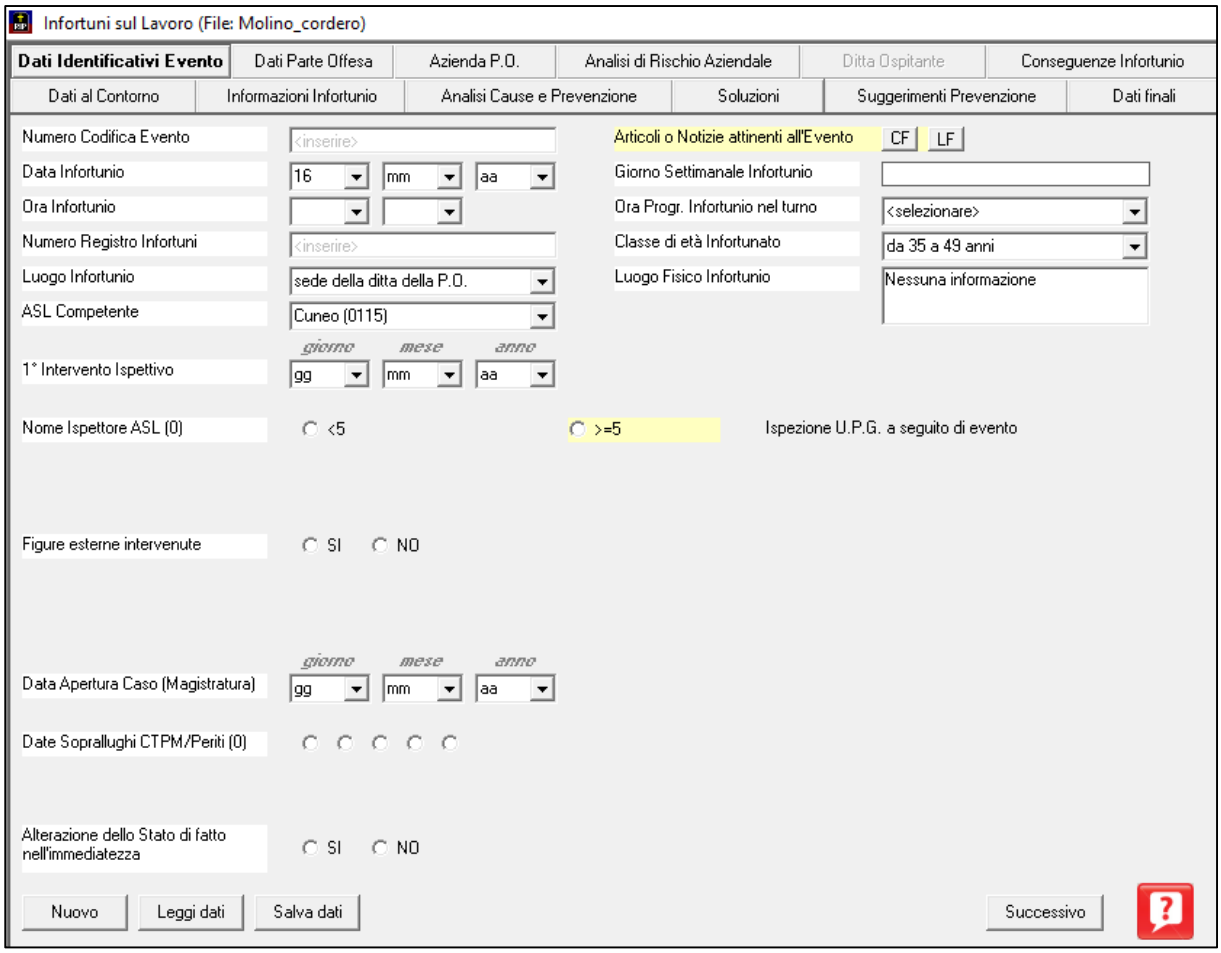

Figura 20 CCCP, Dati Identificativi Evento

La scheda successiva è “Dati Parte Offesa”. Anche in questo caso numerosi informazioni sono necessarie per l’ampliamento della banca dati del software e non influenti sulla valutazione delle cause dell’incidente, come si può vedere in Figura 21. Vengono inseriti principalmente i dati anagrafici dell’infortunato, ma in particolare la mansione svolta al momento dell’infortunio, nel caso specifico dal menu a tendina che si apre, è stata inserita la mansione di autotrasportatore poiché il lavoratore doveva effettuare il traporto della farina ai clienti del mulino.

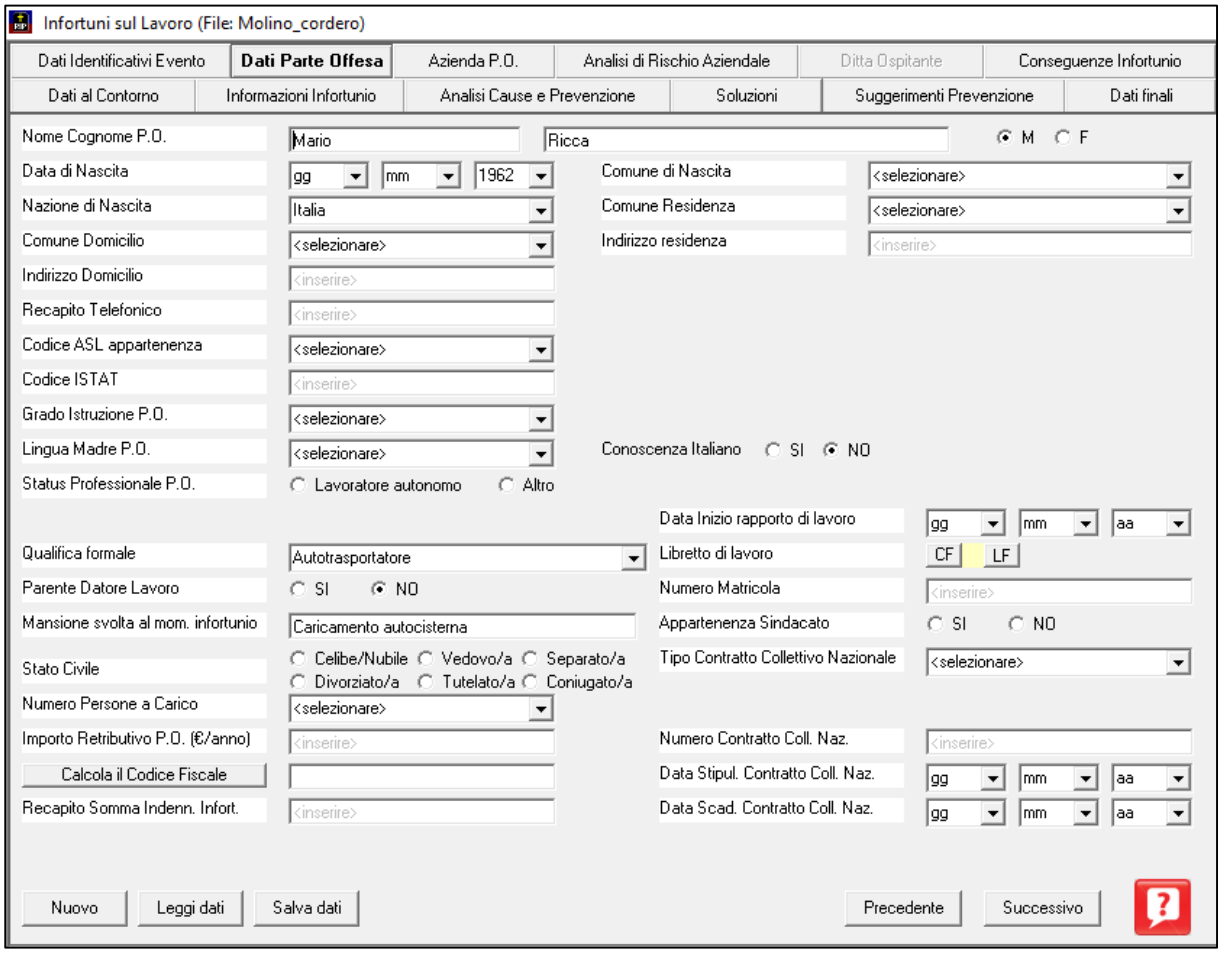

Figura 21 CCCP, Dati Parte Offesa

La scheda “Azienda P.O.” serve per inserire i dati dell’azienda in cui il lavoratore coinvolto è assunto. Nel caso analizzato si fa riferimento all’impresa Molino Cordero S.p.A. Infatti nello stesso evento è stato coinvolto anche il lavoratore esterno Antonio Cavicchioli, di conseguenza se fosse stato valutato il suo infortunio, questi dati sarebbero dovuti cambiare nonostante la causa principale sia la stessa.

Si possono indicare moltissime informazioni, molto importante per le statistiche è l’inserimento del tipo di attività economica, Figura 22, a cui appartenenva il mulino, poiché permette di correlare l’incidente a situazioni simili passate e future nella fase di archiviazione nel database e prevenzione di eventi simili. Si possono inserire anche i dati sul numero di dipendenti e le figure della sicurezza aziendale, come per esempio l’RSPP.

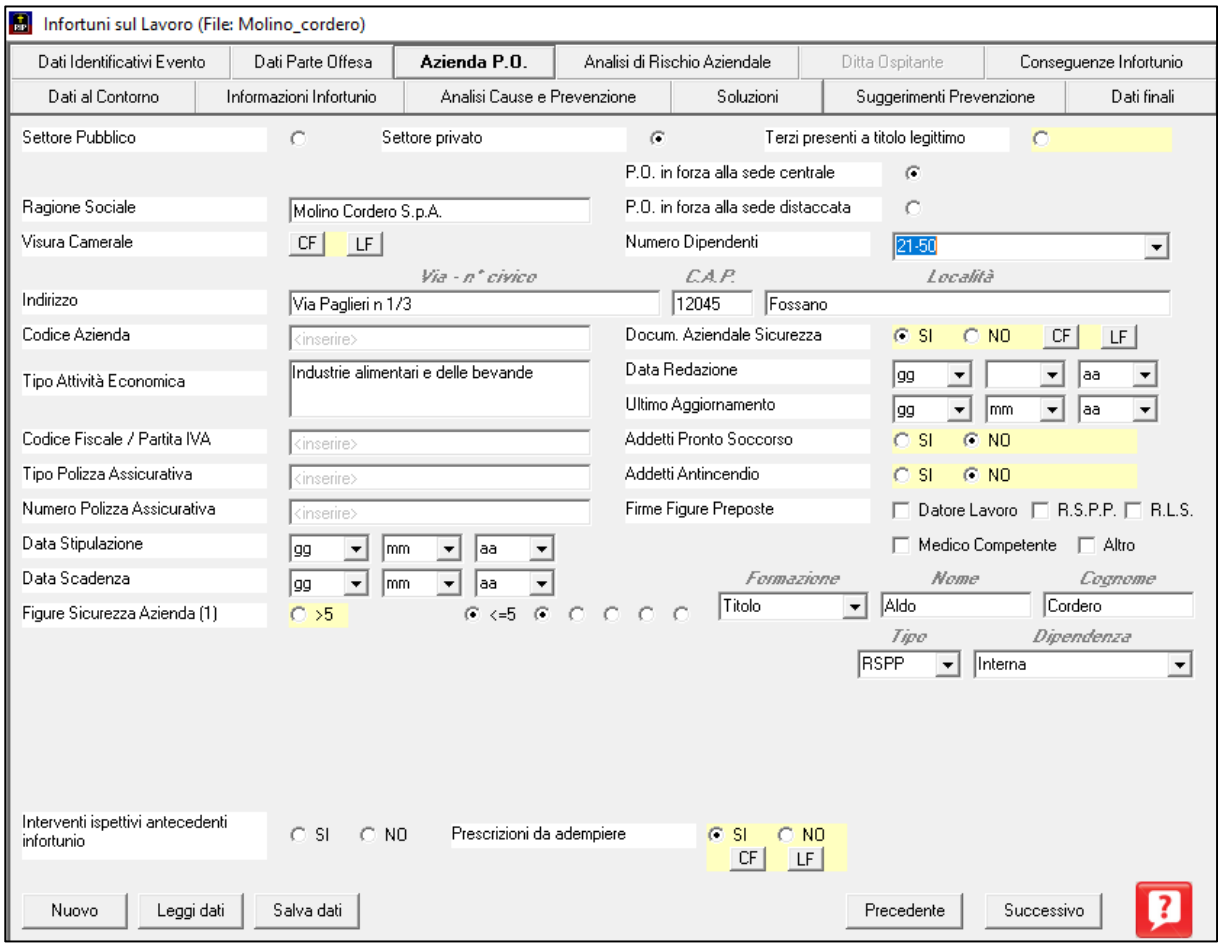

Figura 22 CCCP, Azienda P.O.

La sezione “Analisi di Rischio Aziendale” è utilizzata per inserire le informazioni sulla valutazione e analisi di rischio utilizzati nell’azienda in cui è avvenuto l’incidente. Interessante è poter inserire la metodologia di identificazione del pericolo e i metodi di calcolo del rischio, in questo modo si indica se la valutazione è risultata soggettiva, Figura 23.

Il documento di analisi del rischio del molino risultava carente di informazioni e molto generale e di conseguenza non completa per l’attività specifica in cui è avvenuto l’incidente.

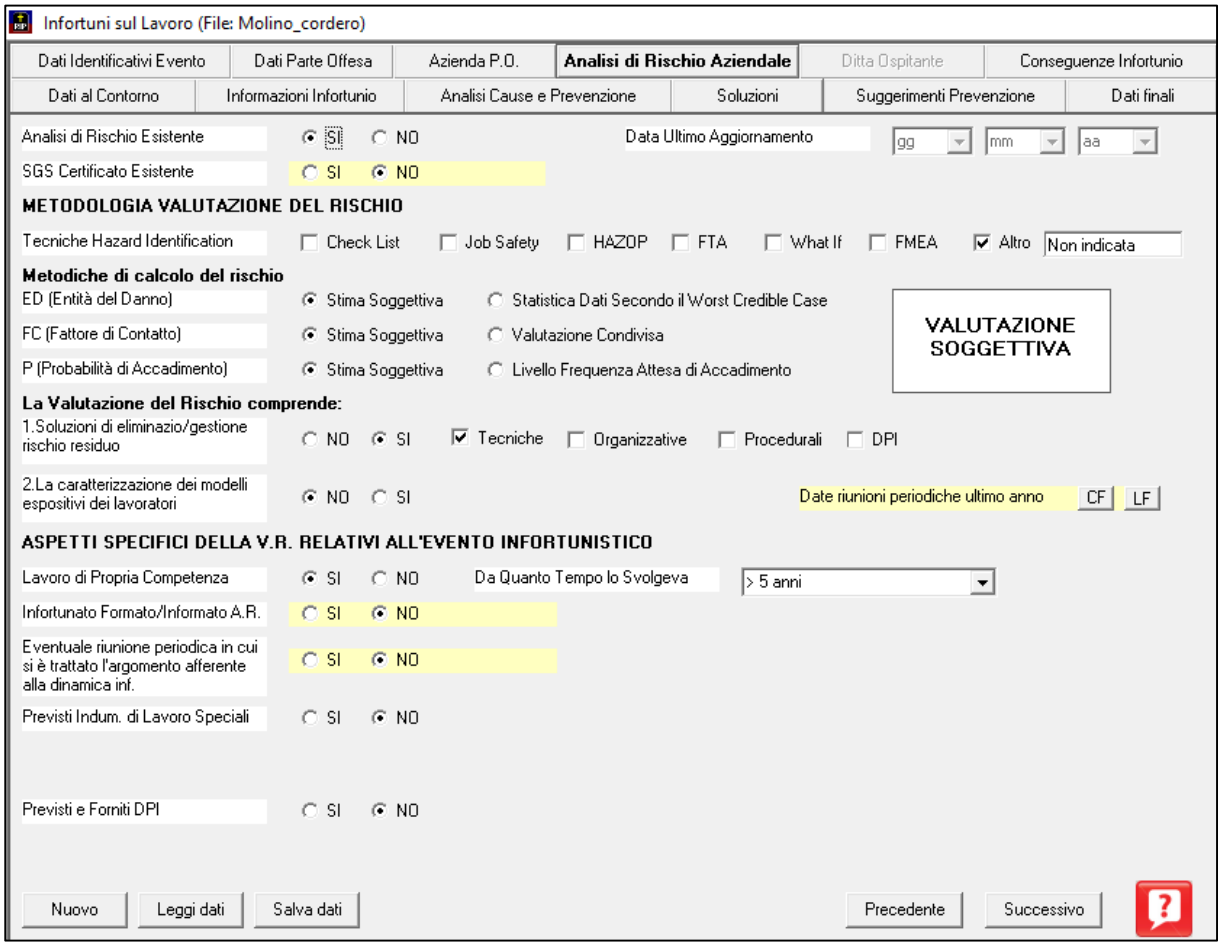

Figura 23 CCCP, Analisi di Rischio Aziendale

Nelle “Conseguenze Infortunio” sono indicate tutte le informazioni relative all’assenza dal lavoro e le lesioni riportate dall’infortunato. Nel caso analizzato il lavoratore è morto a causa delle numerose ustioni riportate nell’esplosione. In Figura 24 si nota come nel programma è possibile scegliere la natura e la sede della lesione scorrendo un menu a tendina in cui sono elencate le conseguenze secondo i termini della classificazione ESAW.

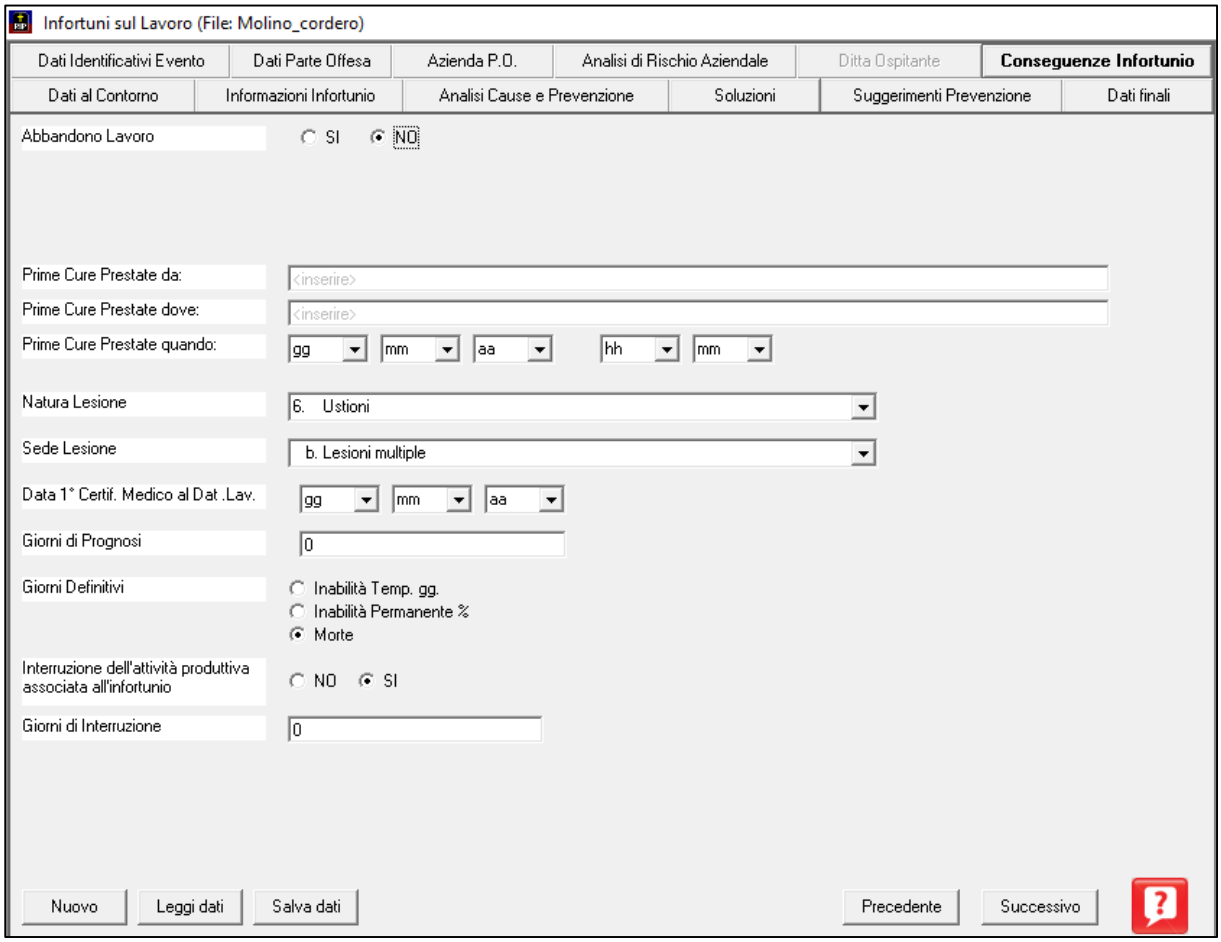

Figura 24 CCCP, Conseguenze Infortunio

Ulteriori informazioni vengono inserite nella scheda “Dati al Contorno”, che consiste nel caratterizzare il luogo dell’infortunio come espresso in Figura 25. L’incidente è avvenuto per lo più all’interno, il luogo di lavoro poteva essere caratterizzato da rumore, dovuto per esempio al sistema di trasporto pneumatico per il trasporto della farina, e ovviamente dalle presenza di polvere. Inoltre è possibile indicare le persone che hanno assistito all’infortunio o erano presenti in azienda.

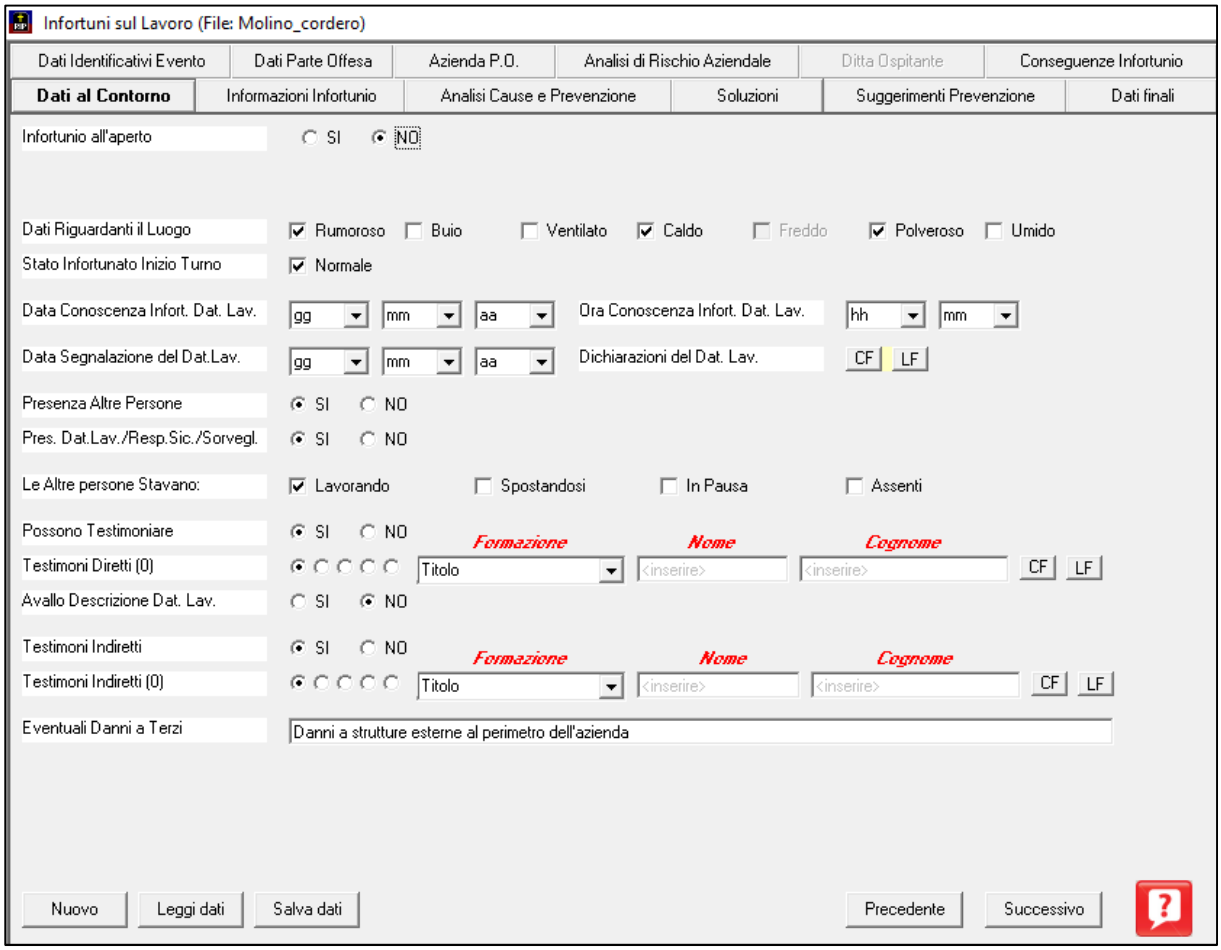

Figura 25 CCCP, Dati al Contorno

Avanzando nelle sezioni il grado di specificità delle informazioni aumenta. In “Informazioni Infortunio” vengono introdotte le caratteristiche dell’attività condotta dal lavoratore. Le differenti scelte vengono fatte selezionando un menu in cui sono elencate differenti settori lavorativi e per ognuno di essi è possibile associare un fattore di pericolo principale e uno secondario. Come si vede in Figura 26 si possono inserire anche informazioni sulle macchine e attrezzature utilizzate, con l’opzione di inserire eventuali allegati.

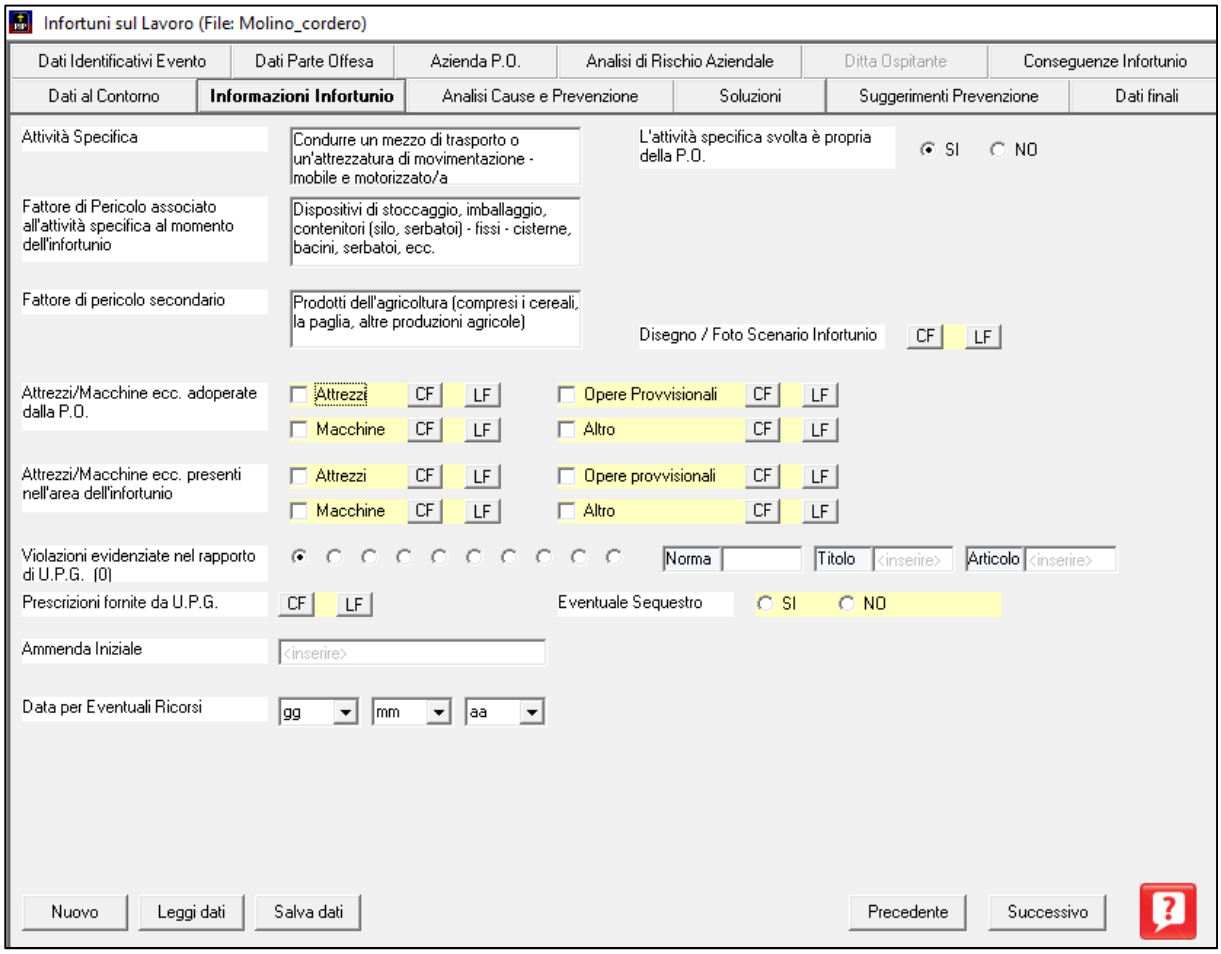

Figura 26 CCCP, Informazioni Infortunio

Da questo punto in poi comincia la vera fase di analisi dell'incidente e delle cause che caratterizza il programma. Nella sezione "Analisi Cause e Prevenzione" si sviluppano tre sotto menu:

- Analisi approfondita degli eventi intermedi;
- Identificazione delle Root Causes;
- Disamina delle soluzioni di prevenzione.

Selezionando il primo, è possibile inserire diversi elementi, in ordine di esecuzione, come evidenziato in Figura 27:

- Cause dirette;
- Cause Indirette di I Livello;
- Cause Indirette di II Livello;
- Associazione delle cause;
- Analisi delle cause;
- Interventi;
- Associazione Interventi;
- Analisi degli interventi.

Come causa diretta è stata selezionata "Contatto con fiamma viva o con oggetto ambiente caldo/arroventato".

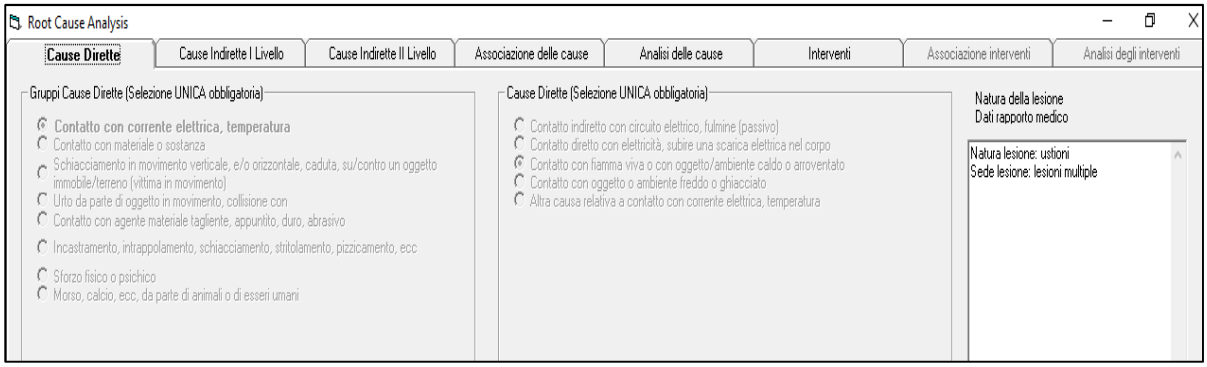

Figura 27 CCCP, Analisi approfondita degli eventi intermedi

Come causa indiretta di primo livello è stata scelta l'esplosione poiché è collegata con le conseguenze subite dal lavoratore indirettamente.

In seguito sono state scelte le cause indirette di secondo livello, esse rappresentano tutte le non conformità e mancanze avvenute in fase di progettazione e gestione della sicurezza. Sono suddivise in macrocategorie che di conseguenza saranno le cause radice dell'infortunio.

Le categorie riguardano, come si vede in Figura 28, per quanto riguarda la sicurezza in fase di progetto:

- le caratteristiche strutturali e impiantistiche esterne/interne;
- le attrezzature (macchine) ed opere provvisionali;
- gli aspetti chimici, fisici, biologici dell'ambiente di lavoro;
- le interferenze di volumi funzionali.

Mentre per la sicurezza in fase di gestione, le categorie sono:

- Audit, supervisione, procedure operative e IFT;
- Revisione ed aggiornamento di sistema, manutenzione;
- Aspetti fisiologici ed ideologici dei soggetti coinvolti.

Per ogni categoria si scelgono le caratteristiche riscontrate dall'analisi dell'infortunio, in particolare selezionando nella colonna di sinistra un "flag", compaiono le possibili cause spiegate in maniera più specifica.

Tra le criticità esterne non è stata evidenziata nessuna causa dell'esplosione.

Per le strutture è stata selezionata la causa relativa agli "Aspetti strutturali specifici e luoghi sicuri", facendo riferimento alla mancanza e identificazione delle aree a rischio esplosione e quindi di tutte le procedure e operazioni che ne derivano, come definito dalla direttiva ATEX.

Sugli impianti comuni sono stati selezionati tre punti: " Impianti genereali", "Impianti specifici" e "Interventi di adeguamento alle norme".

Per impianti generali si intende la presenza del sistema pneumatico di trasporto delle farine utilizzato per trasferire il carico dall'autocisterna alla fariniera all'interno dello stabilimento , mentre per quelli specifici si intende la mancata presenza di un sistema di rilevazione della concentrazione di polvere nei luoghi di lavoro. Infine per gli adeguamenti alle norme è stato selezionato per indicare la mancanza dell'impianto di messa a terra nel luogo di innesco dell'esplosione.

Per la categoria delle attrezzature e opere provvisionali è stata identificata come causa l'utilizzo di un'attrezzatura di lavoro non adatta, cioè il sistema localizzato di trasporto delle farine era formato da un tubo in gomma non conduttivo collegato alla tubazione in metallo dello stabilimento. La non equipotenzialità dei due materiali ha provocato l'innesco della miscela aria-farina e di conseguenza è stata selezionata come una delle cause dell'esplosione. Come ulteriore motivo è stata selezionata quella relativa ai "Dispositivi" con riferimento alla mancata messa a terra e l'utilizzo di una valvola

manuale senza controllo di portata che ha provocato la diluizione della farina portando la concentrazione nei limiti di esplosività.

Come criticità chimico-fisico-biologiche è stata selezionata la causa "Materie prime e prodotti di processo" facendo riferimento alla presenza di polvere combustibile derivante dal processo di produzione, quale la farina, e quella di formazione durante nella fase di movimentazione e pre trattamento delle granaglie.

Tutte le cause elencate vengono attribuite ad errrori in fase di progetto per la sicurezza dei lavoratori.

Tra le lacune in fase di gestione si è individuata una sola causa collegata all'esplosione e all'infortunio mortale. Nelle procedure operative è stata selezionata "Procedure per lavoratori" facendo riferimento alla mancanza dell'operazione di scarico della farina da autocisterna alle fariniere all'interno dello stabilimento e quindi la mancanza delle procedure di sicurezza ad essa collegate, cioè la messa a terra del mezzo.

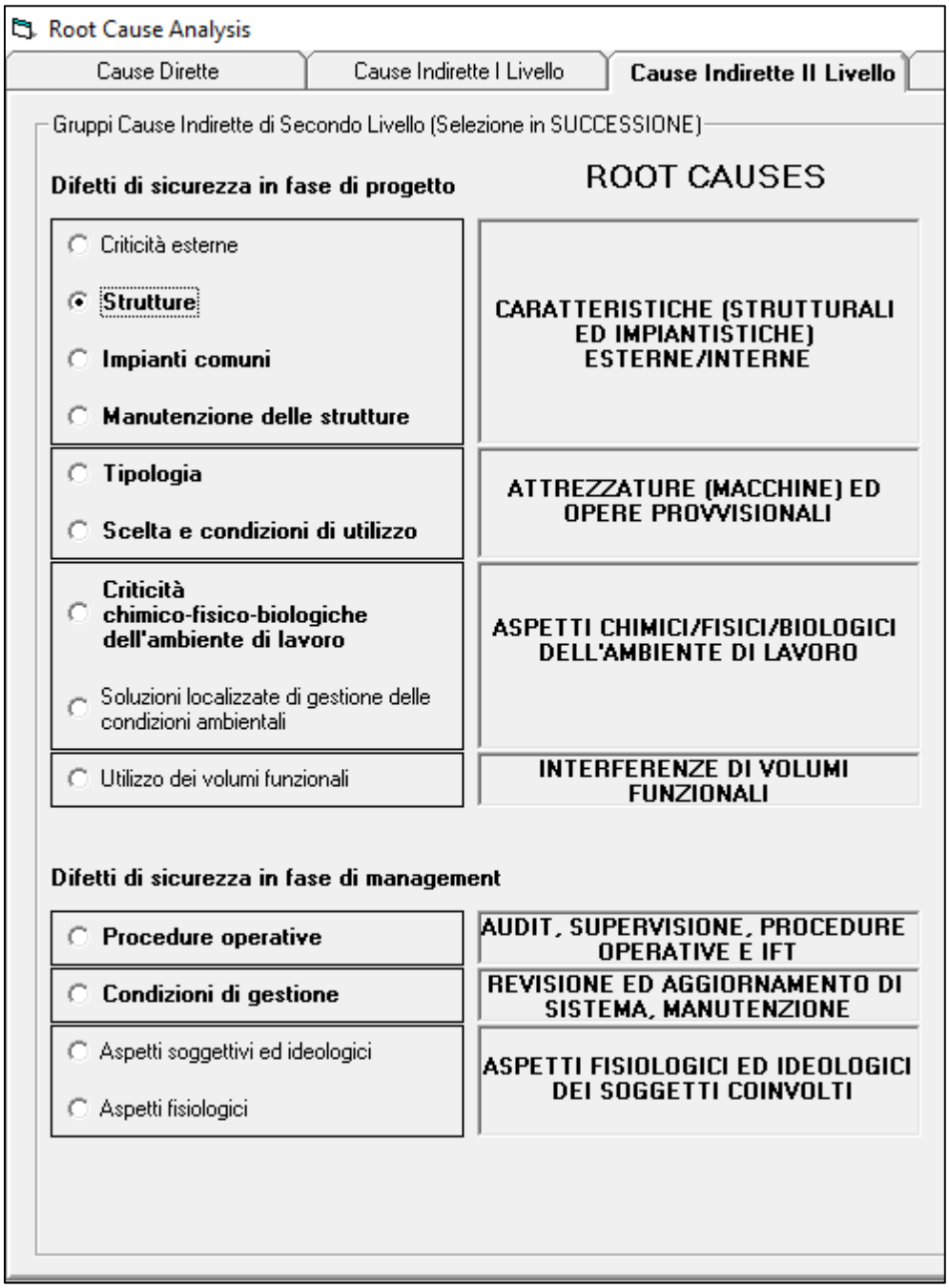

Figura 28 CCCP, Cause indirette di II livello

Selezionate le cause indirette di secondo livello devono essere associate tra di loro individuando i legami che hanno portato all'infortunio.

Il programma permette di inserire diversi gruppi di cause, anche collegate tra loro, che per poter dar luogo all'incidente devono accadere contemporaneamente o comunque verificarsi.
Le cause sono collegate per mezzo di operatori Booleani "AND" e "OR" in modo da formare un grafico ad albero che collega l'evento principale agli eventi iniziatori. Inoltre grazie a questa funzione è possibile ricavare il percorso minimo che porta all'incidente. In Figura 29, dopo aver associato le cause viene formato lo schema seguente.

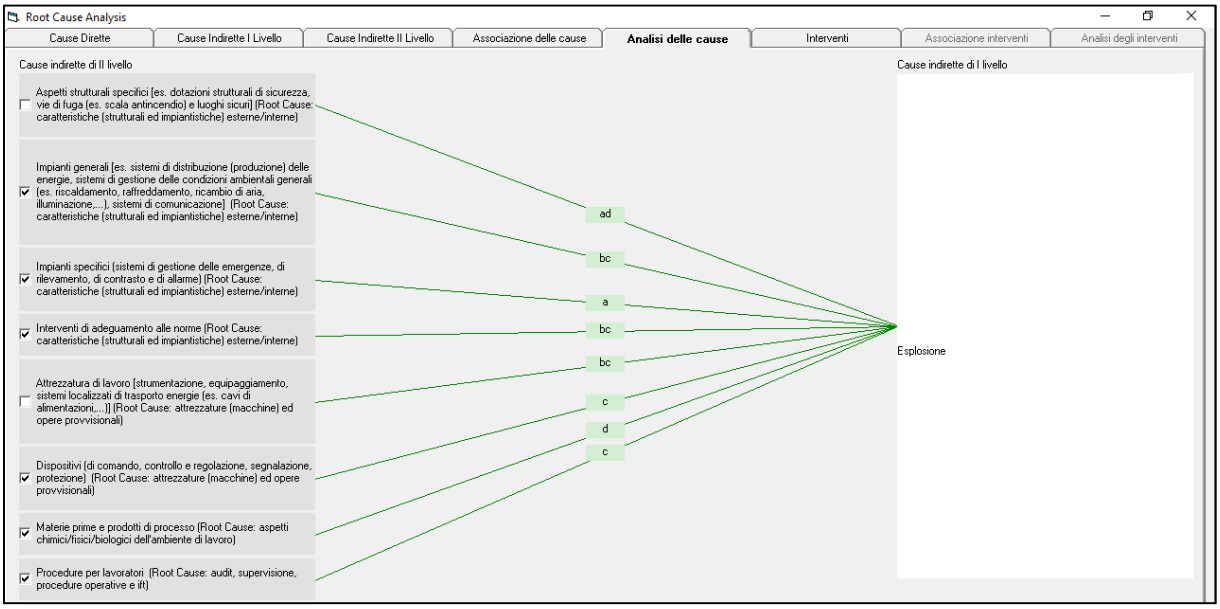

Figura 29 CCCP, Associazione delle cause e analisi schema

Come si può notare da ogni causa di II livello partono delle linee di collegamento alla causa di I livello. Le lettere indicano i diversi gruppi di associazione inseriti dall'utente. Per esempio il gruppo "a" indica che le cause che rientrano nelle categorie degli aspetti strutturali e degli impianti specifici, come la mancanza delle zone ATEX e dei sistemi di rilevazione della concentrazione di polvere nei locali sono associate, cioè se accade una accade anche l'altra, di conseguenza sono nello stesso gruppo (quindi tra loro è presente l'operatore "AND"). Le cause possono essere associate anche a diversi gruppi come si può vedere nelle linee con più di una lettera.

La scheda successiva è l'inserimento degli interventi atti ad eliminare le cause radice dell'infortunio.

Le categorie di intervento si dividono in tecnici e in programmazione e procedurali. Ognuna di queste categorie se selezionate permettono di identificare il miglior intervento per il contesto che si sta valutando.

In Figura 30 sono evidenziati gli interventi tecnici selezionati. Ovviamente il programma utilizza frasi molto generali e impostate a priori, di conseguenza si è dovuto correlare ognuna di queste a macchine, attrezzature e impianti specifici all'attività esaminata.

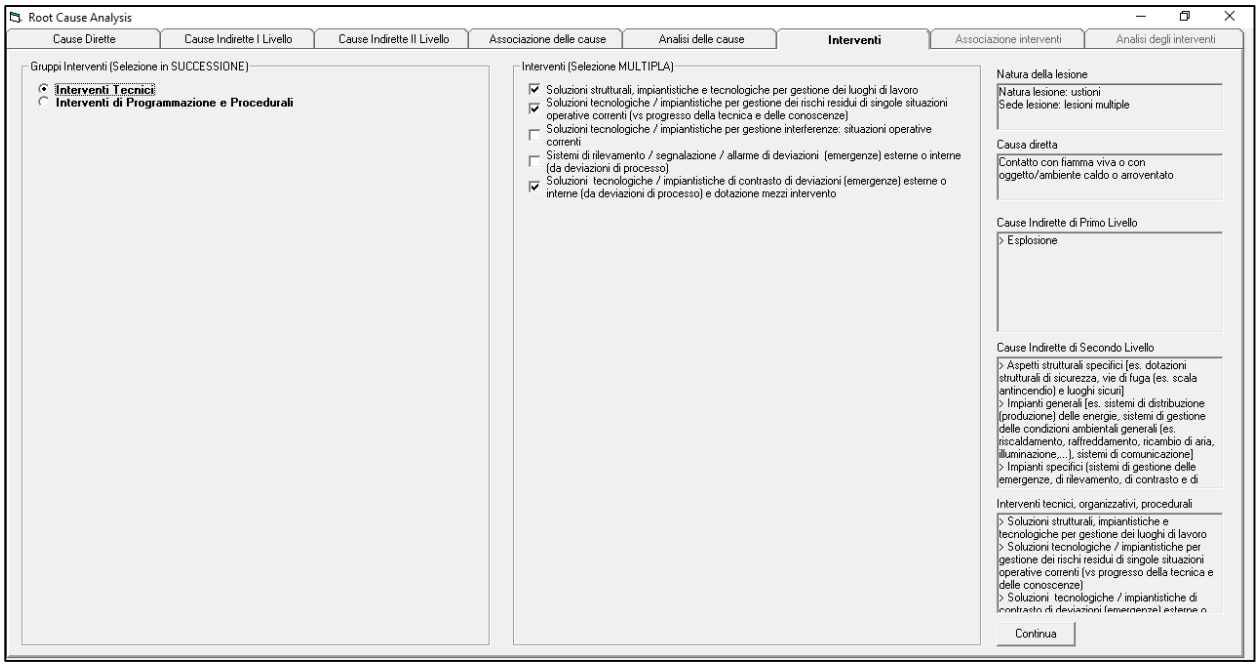

Figura 30 CCCP, Interventi tecnici

Sono state selezionata tre tipologie di intervento tecnico:

- Soluzioni strutturali, impiantistiche e tecnologiche per gestione dei luoghi di lavoro;
- Soluzioni tecnologiche/impiantistiche per gestione dei rischi residui di singole situazioni operative correnti;
- Soluzioni tecnologiche/impiantistiche di contrasto di deviazioni esterne o interne.

Gli interventi relativi alla programmazione e alle procedure sono selezionati in Figura 31.

In questo menu sono stati selezionati quattro punti:

- Procedure di azione dei preposti ai vari livelli;
- Procedure operative per situazioni operative correnti;
- Procedure di verifica, controllo ed individuazione / segnalazione / gestione di anomalie funzionali elementari;
- Procedure di manutenzione ordinaria e straordinaria di luoghi / impianti / attrezzature compresi di presidi di gestione delle emergenze esterne / interne.

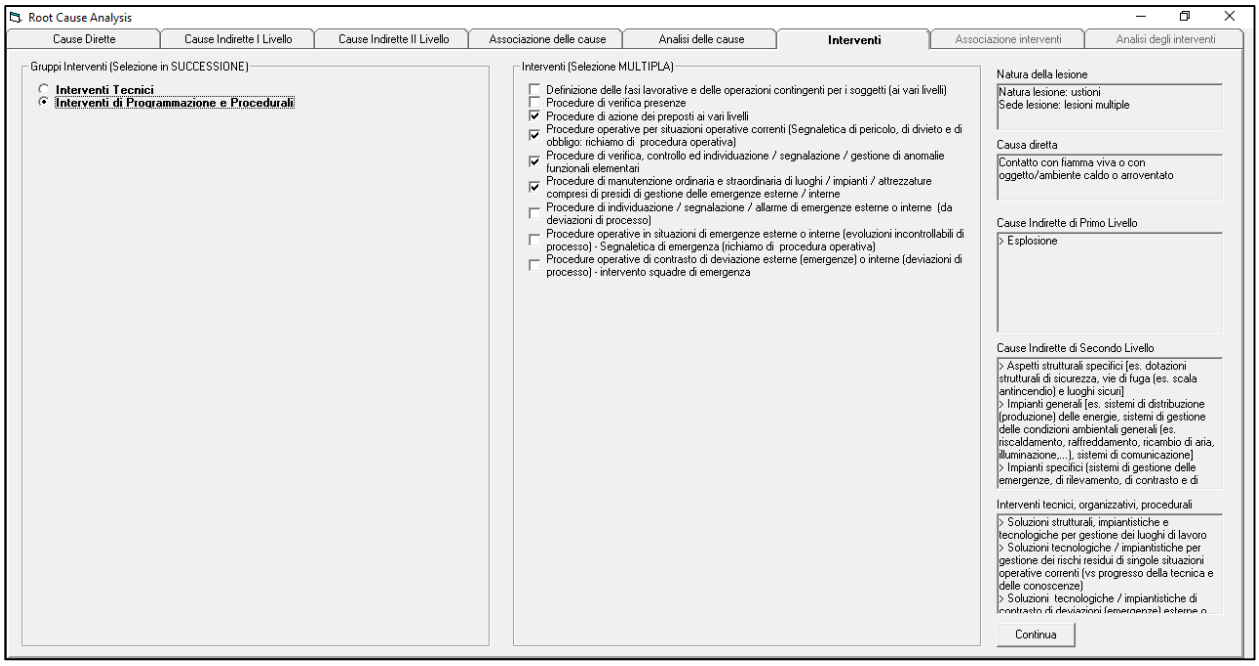

Figura 31 CCCP, Interventi di Programmazione e Procedurali

Successivamente devono essere associati gli interventi alle relative cause di II livello.

Il primo elemento su cui intervenire sono gli “Aspetti strutturali specifici e luoghi sicuri”. Si è scelto di utilizzare come intervento tecnico delle “Soluzioni strutturali, impiantistiche e tecnologiche per gestione dei luoghi di lavoro” intesi come i sistemi di soppressione dell’esplosione, come per esempio le ghigliottine o valvole che non permettono la propagazione della reazione in tutti i locali, cioè uno dei motivi per cui si sono formate le esplosioni secondarie che hanno coinvolto l’edificio centrale del mulino. Come intervento di programmazione e procedurale è stato selezionato “Procedure operative per situazioni operative correnti” inteso come sistemi di segnalazione delle aree a rischio ATEX e l’affissione dei cartelli appositi di pericolo.

Come in precedenza per le cause, anche gli interventi sono associabili tra di essi. In questo caso appartengono entrambi allo stesso gruppo poiché devono essere applicati congiuntamente.

La seconda causa radice su cui intervenire sono “Impianti generali delle energie, sistemi di gestione delle condizioni ambientali generali”, cioè la sicurezza del sistema di trasporto pneumatico della farina.

Gli interventi selezionati sono quattro, una di tipo tecnico e tre di tipo procedurale.

Come “Soluzioni tecnologiche/impiantistiche per gestione dei rischi residui di singole situazioni operative correnti” sono intesi tre differenti soluzioni:

- Installazione del sistema di messa a terra nella zona di scarico della farina in cui era presente l’autocisterna;
- Impianto di controllo del troppo pieno dell’autocisterna, in modo da impedire carichi errati e quindi indirettamente evitare di utilizzare il sistema pneumatico di trasporto della farina in eccesso alle fariniere;
- Utilizzo di materiale per le tubazioni che non permetta l’accumulo di carica elettrostatica.

Gli interventi ulteriori sono di tipo procedurale, il primo riguarda “Procedure di azione dei preposti ai vari livelli” cioè il controllo dell’effettiva messa a terra prima di iniziare lo scarico da parte di un preposto.

Il secondo è “Procedure operative per situazioni operative correnti” cioè l’utilizzo di segnalazione delle area in cui è obbligatoria la messa a terra dell’impianto.

L’ultimo intervento è “Procedure di manutenzione ordinaria e straordinaria di luoghi / impianti / attrezzature compresi di presidi di gestione delle emergenze esterne / interne”, cioè la continua manutenzione dei sistemi impiantistici descritti nel primo intervento per garantirne il funzionamento.

Per quanto riguarda gli “Impianti specifici”, cioè il sistema di rilevazione della concentrazione di polvere, si adotta una soluzione tecnica e una procedurale.

Le “Soluzioni tecnologiche/impiantistiche di contrasto di deviazioni esterne o interne” consistono nell’installazione dell’impianto di rilevazione della concentrazione, mentre la procedura consiste nella manutenzione ordinaria o straordinaria dell’impianto per garantire il funzionamento.

Per eliminare il problema degli “Interventi di adeguamento alle norme” anche in questo caso sono stati scelti un intervento tecnico e una procedura.

L’intervento tecnico rientra nella categoria generale “Soluzioni tecnologiche/impiantistiche per gestione dei rischi residui di singole situazioni operative correnti” e consiste nell’installazione dell’impianto di messa a terra in tutto lo stabilimento per poter collegare il sistema di tubazioni di trasporto delle farine.

Di conseguenza deve essere manutenuto e quindi si scelgono le “Procedure di manutenzione ordinaria e straordinaria di luoghi / impianti / attrezzature compresi di presidi di gestione delle emergenze esterne / interne”.

Per agire su “Attrezzatura di lavoro” e quindi sul sistema locale di trasferimento della farina formato da tubo flessibile in gomma e tubazione di acciaio, si è scelta la categoria “Soluzioni tecnologiche / impiantistiche per gestione dei rischi residui di singole situazioni correnti” cioè sostituendo il tubo in gomma con uno in un materiale con conducibilità simile a quello dello stabilimento, eliminando il problema del passaggio del prodotto attraverso due tipi diversi di tubazione che hanno provocato probabilmente l’innesco della nube di polvere.

Per eliminare la cause relativa ai “Dispositivi” sono stati selezionati quattro interventi, due di tipo tecnico e due procedurali.

Gli interventi tecnici consistono in una soluzione per la gestione dei rischi residui nelle situazioni operative correnti e cioè nella sostituzione della valvola manuale di regolazione della portata di farina con una di tipo automatico che la mantenga costante. La seconda soluzione, riguarda il contrasto delle deviazioni esterne o interne, cioè con un sistema di rilevamento della concentrazione di farina nelle tubazioni. Quest’ultima presuppone delle “Procedure di verifica, controllo ed individuazione / segnalazione / gestione di anomalie funzionali elementari” che presume una gestione dell’emergenza in caso di una concentrazione di polvere esplosiva.

Sia per la valvola che per il sistema di monitoraggio della concentrazione è necessaria la manutenzione ordinaria e straordinaria.

La presenza di farine e polveri combustibili può essere eliminata con l’utilizzo di procedure di manutenzione ordinaria e straordinaria dei luoghi di lavoro per mezzo di pulizie continue e frequenti delle superfici piane nei locali in modo da eliminare le sorgenti secondarie.

Infine come azione sulle procedure per i lavoratori, essendo riferito alla mancanza di valutazione del rischio dell’operazione di scarico della farina verso lo stabilimento, come intervento tecnico si è valutato l’utilizzo di un sistema di rilevamento del troppo pieno nelle autocisterne in modo da evitare di utilizzare il sistema di trasporto pneumatico.

Di conseguenza il sistema necessita di una manutenzione continua, quindi è stata selezionata l’opzione “Procedure di manutenzione ordinaria e straordinaria di luoghi / impianti / attrezzature compresi di presidi di gestione delle emergenze esterne / interne”.

La fase successiva, come nel caso delle cause di II livello è l'associazione degli interventi secondo la logica già impiegata in precedenza. In Figura 32 ci sono le cause radice e i rispettivi interventi applicabili collegati attraverso delle linee. Ognuno di questi interventi è definito in un gruppo con indicato la lettera minuscola. Da questo schema si produce il diagramma ad albero con le cause e le relative soluzioni per evitare che l'infortunio accada.

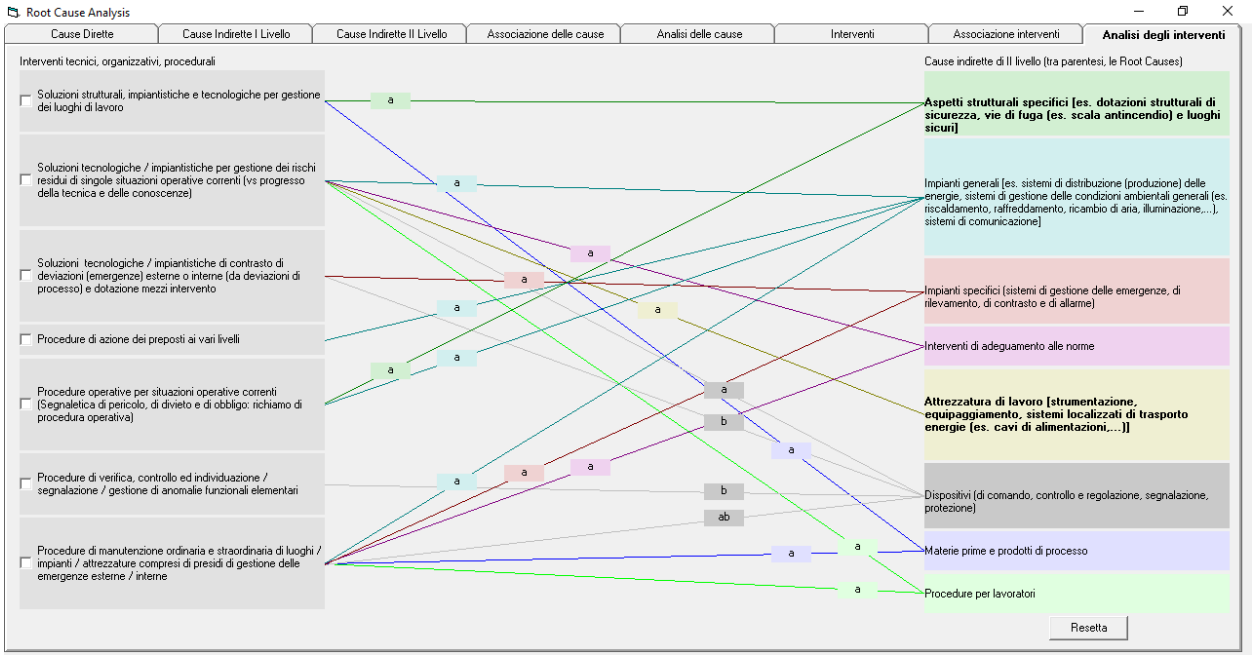

Figura 32 CCCP, Associazione interventi

Per individuare il percorso minimo che porta all'infortunio e quindi eliminarlo per mezzo degli interventi, il programma, in funzione dei blocchi formati in fase di associazione, calcola il MCS (Minimal Cut Set). Da quanto è emerso dalla risoluzione dello schema, gli interventi tecnici per eliminare la possibilità che lo stesso tipo di infortunio accada sono relativi a tre categorie, che sono selezionate in Figura 33, cioè:

- Soluzioni strutturali impiantistiche e tecnologiche per gestione dei luoghi di lavoro;
- Soluzioni tecnologiche / impiantistiche per gestione dei rischi residui di singole situazioni operative correnti;
- Procedure di manutenzione ordinaria e straordinaria di luoghi / impianti / attrezzature compresi di presidi di gestione delle emergenze esterne / interne

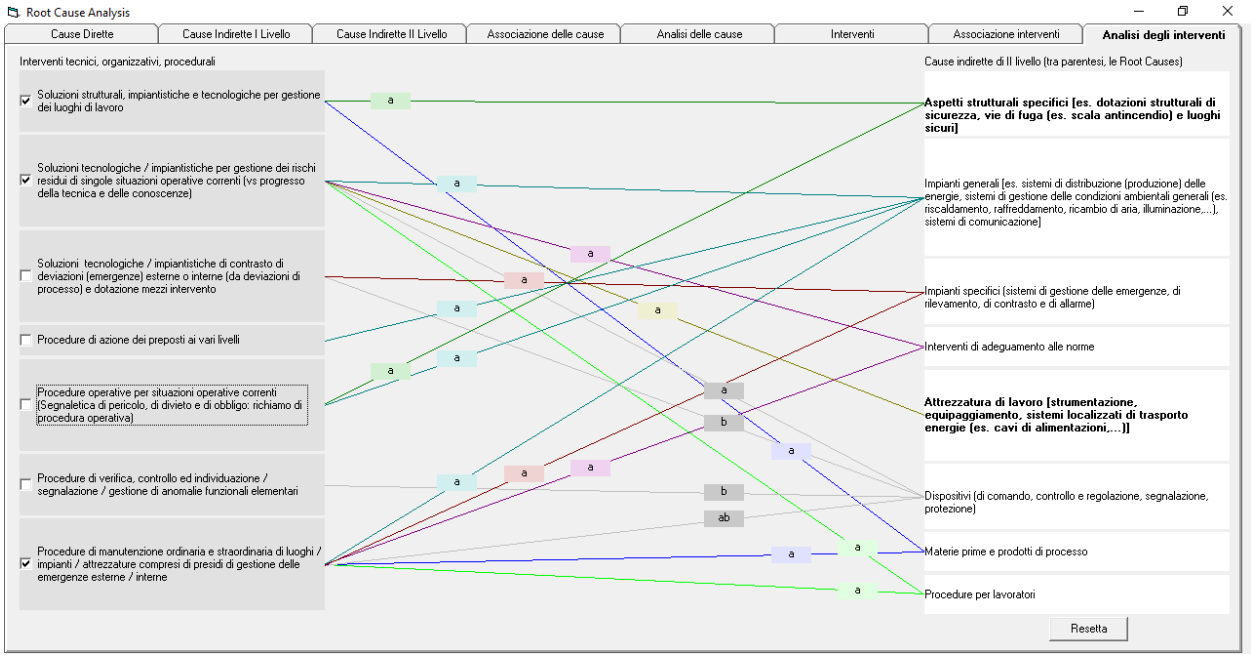

Figura 33 CCCP, Risoluzione infortunio

I tre interventi vanno ad eliminare le due cause che impediscono l'esplosione e l'evento mortale, queste sono evidenziate in grassetto nella colonna di destra. Per eliminare invece qualsiasi evento simile a quello del Molino Cordero, occorre attivare tutti gli interventi tecnici e procedurali.

La schermata di output di risultato del programma identifica lo schema minimo dell'incidente con l'insieme degli interventi per avere il riassunto dello studio eseguito.

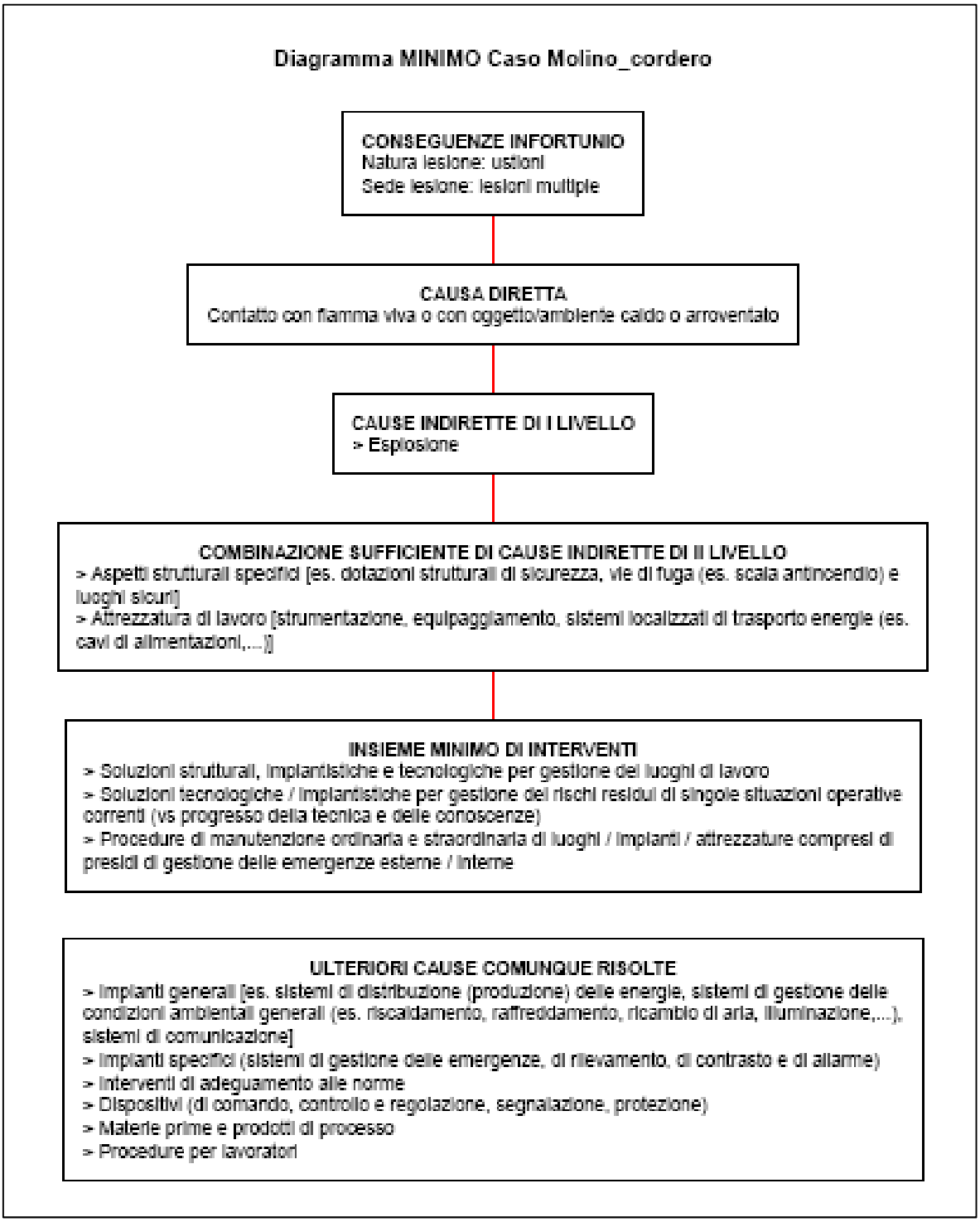

Figura 34 Risultati soluzione schema minimo (MCS)

Da quanto emerge in Figura 34 non sono specificati gli interventi previsti come nemmeno le cause, quindi per semplificare la visualizzazione del lavoro prodotto con il software è stata creata una tabella riassuntiva come si può vedere in Figura 35 e Figura 36.

Ricerca Cause				Misure preventive		
1	Conseguenze dell'infortunio		Morte per ustioni e lesioni multiple	—		
2	Causa oggettiva		Contatto con fiamma viva o con oggetto/ambiente caldo o arroventato	—		
3	Causa indiretta di I Livello		Esplosione	Eventuale sistema di protezione nel caso di soluzioni non adottabili	Sstemi di sfogo, soppressione, soffocamento, contenimento dell'esplosione	XIII
4.1	Cause indirette di II Livello	Aspetti strutturali	Mancanza identificazione zone ATEX	Controllo della gestione del rischio. Soluzioni alternative e tecniche di miglioramento	Sistema di soppressione delle esplosioni nelle tubazioni presenti nei locali per evitare esplosioni secondarie. Sistemi di segnalazione delle aree a rischio ATEX e posa di cartelli di pericolo EX	XII
4.2		Impianti generali	Operazione di scarico con sistema pneumatico da autocisterna a stabilimento		Installazione impianto di messa a terra Impianto monitoraggio carico autocisterna Uso materiali idonei tubazione di scarico della farina Controllo messa a terra da parte di un preposto Manutenzione impianti messa a terra e sistema di monitoraggio	XI
4.3		Impianti specifici	Mancnza sistema di rilevazione concentrazione di polvere		Installazione impianto rilevazione concentrazione Manutenzione impianto	X
4.4		Interventi di adeguamento alle norme	Mancanza sistema di messa a terra nel luogo di scarico della farina		Installazione impianto di messa a terra Manutenzione impianto	IX
4.5		Attrezzatura di lavoro	Materiali sistema di trasporto localizzato non adatti		Sostituzione tubazione in materiale con stessa conducibilità e antistatico rispetto a quello dello stabilimento	VIII
4.6		Dispositivi	Mancanza messa a terra tubazioni e autocisterna		Sistema di rilevamento concentrazione nelle tubazioni Procedure di gestione delle deviazioni nel caso di superamento dei limiti di concentrazione	VII
4.7			Utilizzo di valvola con regolazione manuale che ha portato alla diluizione della farina		Installazione valvola automatica con portata costante Manutenzione dispositivi installati	VI
4.8		Materie prime e prodotti di processo	Polveri organiche combustibili		Pulizia superfici di accumulo della polvere	V
4.9		Procedure per lavoratori	Mancanza di procedura di scarico da autocisterna nella valutazione dei rischi		Procedura di rilevamento troppo pieno Manutenzione rilevatore troppo pieno e dei luoghi di lavoro	IV

Figura 35 CCCP, Tabella 1 di dettaglio risultati

5.1	Cause radice		Caratteristiche (strutturali ed impiantistiche) esterne /interne	Applicazione della gestione dei rischi		III
5.2			Attrezzature (macchine) ed opere provvisionali			
5.3			Aspetti chimici / fisici / biologici dell'ambiente di lavoro			
5.4			Audit, supervisione, procedure operative e IFT			
RM	Criticità tecniche	6.1	Struttura	Interventi tecnici	Soluzioni strutturali impiantistiche e tecnologiche per gestione dei luoghi di lavoro	II RM
		6.2	Impianti		Soluzioni tecnologiche / impiantistiche per gestione dei rischi residui di singole situazioni operative correnti	
		6.3	Dispositivi di controllo e segnalazione emergenze o anomalie		Soluzioni tecnologiche/impiantistiche di contrasto di deviazioni esterne o interne	
	Criticità organizzative	6.4	Operazione non analizzata	Interventi procedurali	Procedure di azione dei preposti ai vari livelli Procedure operative per situazioni operative correnti	
	Criticità procedurali	6.5	No procedura e supervisione	Interventi organizzativi	Procedure di manutenzione ordinaria e straordinaria di luoghi / impianti / attrezzature compresi di presidi di gestione delle emergenze esterne / interne Procedure di verifica, controllo ed individuazione / segnalazione / gestione di anomalie funzionali elementari	
7	Identificazione dei fattori di pericolo		Cause non prevista in HI	Applicazione tecnica HI adeguata		I

Figura 36 CCCP, Tabella 2 di dettaglio risultati

Utilizzando il programma informatico è quindi possibile analizzare le cause dell'infortunio mortale capitato all'autista del mezzo e di identificare le soluzioni possibili perché lo stesso incidente o uno simile possano accadere. Ricordando sempre che ogni attività necessita di valutazione del rischio differente in funzione del contesto in cui si trova ed è per questo motivo che nel programma le voci da selezionare sono di tipo molto generale, in modo da adattarsi a qualsiasi attività lavorativa.

3.7.4 Misure di protezione

L'ultimo elemento utilizzabile per prevenire incidenti di questo tipo o meglio mitigare il danno che ne deriva, sono i sistemi di protezione contro le esplosioni, essi sono la soluzione nel caso in cui gli interventi tecnici e procedurali non permettano di prevenire l'esplosione.

Le azioni principali devono riguardare il contenimento dell'esplosione, la soppressione dell'esplosione e l'utilizzo di sistemi di sfogo che impediscono l'incremento della pressione in ambiente confinato.

Per esempio nel molino di cui si è parlato nel caso di specie, i silos, le fariniere e i condotti per il trasporto pneumatico non erano dotati di nessun sistema di sfogo o soppressione, e di conseguenza la pressione raggiunta dalla combustione ha provocato danni estesi a strutture e apparecchi.

La progettazione di sistemi di questo tipo sono normati da standard tecnici sia europei che americani, come ad esempio la EN 14491 e la NFPA 68 [14].

In generale i sistemi di sfogo sono costituiti da pannelli in metallo che applicati per esempio nei locali o sui contenitori come i sili, raggiunta una certa pressione si deformano senza rilascio di frammenti e permettono l'abbassamento della pressione interna. Si devono preventivamente ricavare i parametri delle polveri e la pressione che rilasciano durante la combustione.

Il dimensionamento dell'area di sfogo dipende dalla concentrazione di polvere, dalla turbolenza al suo interno e dal grado di dispersione.

Per esempio nel molino Cordero, prima delle fariniere, non erano presenti sistemi di eliminazione della polvere, che impedissero durante lo scarico la formazione di nubi con elevata turbolenza e restassero maggior tempo sospese, rischiando di raggiugere il limite di esplodibilità inferiore, oppure di depositarsi sulle superfici successivamente generando una possibile sorgente secondaria di polvere.

Anche le caratteristiche di resistenza del contenitore sono importanti poiché devono essere maggiori rispetto alla piastra di sfogo e possono dipendere dalla geometria, da parti più deboli strutturalmente come valvole ed eventuali aperture per le ispezioni o manutenzioni.

Il problema principale di questi sistemi è che possono provocare ulteriori rischi se non progettati in conformità con la normativa tecnica. Si deve considerare che dalla superficie di sfogo vengono espulsi materiali in combustione, incombusti e gas ad elevata temperatura e pressione, per cui è necessario che in prossimità non siano presenti lavoratori o altre attrezzature o materiali in grado di innescare un nuovo incendio o ulteriori esplosioni. Inoltre il materiale all'interno del contenitore può essere ancora in grado di bruciare e quindi è importante la presenza di sistemi antincendio che blocchino l'evento.

Stesso discorso se i sistemi di trasporto delle farine continuano ad essere in funzione e alimentare l'incendio, in questo caso si devono adottare misure di rilevamento dell'incendio e sistemi di disattivazione degli impianti collegati alla zona di pericolo.
I sistemi di soppressione dell'esplosione sono utilizzati in genere combinati con i sistemi di sfogo, questo per evitare che le superfici di sfogo siano troppo elevate. Questi sistemi necessitano di apparecchiature in grado di rilevare l'esplosione all'interno del contenitore e quindi di poter immediatamente scaricare le sostanze che inibiscono la combustione. Sono regolati dalla normativa tecnica EN 14373.
Le criticità maggiori di progettazione derivano dal fatto che i materiali usati per gli strumenti di rilevazione devono essere sempre monitorati e manutenuti per evitare fenomeni di corrosione che impediscano il corretto funzionamento. Un parametro da considerare è la velocità di aumento della pressione, poiché in base ad esso i sensori devono rilevare la reazione e attivare immediatamente gli apparecchi a rilascio rapido di soppressione. Importantissimo è il posizionamento dei sensori e la loro tipologia, infatti in meno di 50 ms un'esplosione può raggiugere livelli di pressione troppo elevati. I sensori possono essere di tipo ottico oppure a sensori di pressione, in genere gli ultimi sono utilizzati nei contenitori chiusi e in ambiente confinato.
I soppressori possono essere di diverso tipo in funzione del tipo di esplosione che si può generare. Le sostanze utilizzate sono sostanze chimiche, acqua e polveri estinguenti. Per poter agire immediatamente le sostanze vengono tenute sotto pressione in appositi contenitori che si collegano mediante tubazione agli ugelli di spegnimento.
I sistemi di isolamento dell'esplosione sono un altro metodo di protezione e seguono la norma tecnica EN 15089.
Si suddividono in due tipi:

- Attivi, cioè rilevano l'esplosione e si mettono in funzione;
- Passivi, cioè presentano dispositivi che lungo i condotti che non hanno bisogno di sensori.

Tra questi vi sono le valvole di protezione, le valvole rotative e i deviatori.
Le prime sono attive se innescate dai sensori, mentre sono passive le valvole di non ritorno che impediscono la propagazione dell'esplosione. I sensori vengono in genere posti tra i 5 e i 10 metri dalla valvola, le quali si attivano in circa 25 ms [7].
Le valvole rotative sono ottime per il trasporto di polveri poiché permettono di regolarne il trasporto e in più possono bloccare il fronte di fiamma e ridurne la pressione grazie al blocco del rotore. In questo modo si evita che le polveri continuano ad essere scaricate e alimentare l'incendio o provocare un ulteriore esplosione.

I deviatori, come suggerisce il nome, riducono la pressione grazie alla variazione del flusso di polvere rispetto al suo normale andamento. La norma tecnica per il dimensionamento è la EN 16020. Spesso sono affiancati a sistemi di sfogo che influiscono nel diminuire ulteriormente la potenza esplosiva.

I sistemi di contenimento vengono utilizzati per resistere all'esplosione stessa e alle alte pressioni. La resistenza meccanica di questi apparecchi è molto elevata e varia in funzione dell'azione che deve avere. Esiste infatti la resistenza alla pressione, cioè il sistema è costruito per non deformarsi mentre il secondo tipo deve resistere all'urto e quindi si deforma. I parametri per la progettazione sono quindi la pressione massima dell'esplosione per il primo tipo di apparecchi, mentre per il secondo si valuta la velocità di aumento della pressione. La norma che regola i sistemi di contenimento è la EN 14460.

I mattoni forati utilizzati per riempire i finestrotti di collegamento tra i locali dell'edificio centrale e il magazzino sacchi non erano adatti come sistema di contenimento, sono stati divelti e scaraventati nei locali vicini e non impedendo al fronte di pressione e di fiamma di propagarsi.

4 Conclusioni

La farina è un materiale di facile reperibilità e uso nella vita quotidiana, ed è poco conosciuta la sua pericolosità nella formazione di nubi potenzialmente esplosive.

I primi casi di esplosione documentati sono da identificare già alla fine del XIX secolo. Inizialmente si riteneva che le cause di questi incidenti dovessero essere imputati a gas generati durante il deposito del prodotto. Con il passare del tempo, grazie al risultato di studi e ricerche approfondite, si è giunti alla conclusione che le particelle organiche in una certa concentrazione, se innescate, possono dare origine ad una reazione di combustione. Quest'ultima risulterà più violenta se verificatasi in un ambiente confinato.

Il gran numero di incidenti nell'industria molitoria e cerealicola hanno causato, fino ad oggi, un numero elevato di vittime e danni alle aziende, a dimostrazione che le misure di sicurezza in questo tipo di attività sono state adottate male o non sufficientemente in modo da evitare che ciò accadesse.

Con il passare degli anni le associazioni sulla sicurezza sul lavoro, nei paesi maggiormente coinvolti da incidenti provocati da polveri combustibili, hanno investito sulla raccolta dati e sull'investigazione delle cause di questi eventi, promuovendo la ricerca e l'innovazione degli standard di sicurezza oltre che nella redazione di leggi riguardanti le atmosfere esplosive.

Il caso Molino Cordero, accaduto nel 2007, ha dimostrato quanto nell'industria molitoria i rischi legati ai prodotti presenti nell'ambiente di lavoro, come le farine, possono generare situazioni di pericolo causando vittime e danni.

L'evento si è sviluppato con una dinamica complessa in cui l'innesco della farina, durante la fase di scarico dell'autocisterna verso lo stabilimento, ha provocato un'esplosione primaria che propagatasi nella tubazione interna ha generato diverse esplosioni secondarie, che hanno determinato la morte di cinque lavoratori presenti all'interno della struttura.

Le cause principali che sono emerse dall'utilizzo del CCCP, sono riconducibili a errori in fase di valutazione del rischio e quindi alla mancanza di una progettazione degli impianti e delle attività che prevedessero misure di sicurezza idonee. Quest'ultime possono essere individuate, nel caso trattato, nell'utilizzo di attrezzature e macchinari non adatti all'attività molitoria, alla presenza di polveri e alla mancanza di prevenzione che doveva emergere dalla valutazione dei rischi.

Tale valutazione, compiuta da soggetti esperti, deve essere diretta all'analisi di tutte le operazioni che implichino la presenza di polvere combustibile. Ciò deve avvenire con la partecipazione di tutti i lavoratori presenti nell'azienda.

Nel caso specifico mancava la valutazione dell'operazione di scarico della farina, durante la quale si è verificata la scintilla di natura elettrostatica che ha generato l'esplosione primaria. Infatti lo

scarico in eccesso dall'autocisterna alla fariniera all'interno della struttura era un'operazione non valutata e svolta senza seguire procedure specifiche da parte dei lavoratori. Il datore di lavoro non aveva fornito a loro nessun tipo di indicazione. A causa della mancanza di un impianto di messa a terra dell'autocisterna e della tubazione in gomma è avvenuto il caricamento elettrostatico della farina. Inoltre dalla valutazione del rischio aziendale erano già state riscontrate ben 17 criticità relative alle macchine e attrezzature presenti nei locali di lavorazione delle granaglie e delle farine. Di conseguenza non erano presenti nemmeno sistemi di protezione, come sistemi di sfogo o soffocamento, che potevano impedire la propagazione della reazione e la formazione di esplosioni secondarie. Anche la mancanza della descrizione dettagliata del processo produttivo e dello schema di impianto ha favorito il sorgere di una situazione di pericolo che si è manifestata con l'evento dannoso per i lavoratori e la struttura. La presenza di tali documenti avrebbe reso possibile, in primo luogo, la valutazione dei pericoli generati dalle macchine e attrezzature durante il processo lavorativo e poi, in caso di problematiche, avrebbe consentito interventi tecnici diretti a rendere conforme l'attività agli standard di sicurezza. L'informazione e la formazione dei lavoratori risultava non adatta poiché l'operazione di scarico dell'autocisterna doveva essere valutata dal lavoratore come pericolosa e segnalata al datore di lavoro. Infatti è fondamentale in un'azienda il coinvolgimento di tutti i lavoratori per un miglioramento continuo delle condizioni di sicurezza e per l'individuazione delle anomalie, pratica non sempre svolta in maniera corretta.
In conclusione l'incidente è accaduto per gravi lacune in fase di progettazione e organizzazione dell'impianto e delle operazioni, senza un'accurata "Prevention through Design" che permettesse un'identificazione di tutti i pericoli all'interno dall'attività, partendo dall'analisi del contesto e delle strutture fino ad arrivare alla gestione dei rischi residui e intervenendo con le misure di mitigazione o eliminazione del rischio. Inoltre la mancanza di tutto ciò ha portato a non intervenire con sistemi di protezione contro le esplosioni come indicato dalla Normativa Italiana del Testo Unico sulla Sicurezza sul Lavoro, D.lgs.81/2008. Lo scopo fondamentale dell'analisi di incidenti accaduti in passato permette di analizzare le cause e adottare metodi di prevenzione sempre migliori in modo da evitare il ripetersi degli stessi errori. Il software CCCP, è stato appunto creato, allo scopo di studiare tali eventi, in modo da individuare gli interventi tecnici, organizzativi e procedurali più conformi, volti ad impedire il verificarsi di casi simili al Molino Cordero.
Da quanto emerso dallo studio effettuato, il programma è più adatto per l'analisi di infortuni di tipo lavoro correlati poiché progettato principalmente con questo scopo.
Nonostante ciò il sistema è di tipo dinamico e permette all'utente di utilizzarlo anche in contesti particolari come quello di un incidente rilevante. Infatti uno studio attento della situazione presente nell'attività ha permesso di adattare al programma il caso studio e ottenere l'obiettivo prefissato

di descrivere le cause e gli interventi necessari per mantenere la sicurezza in ambienti di lavoro simili. Inoltre la possibilità di registrare nel database del software, l'evento e i risultati raggiunti dall'analisi approfondita dell'incidente, incrementa la base dati statistica, la quale dà la possibilità di un utilizzo in fase di prevenzione per contesti simili.

Un altro aspetto emerso dall'analisi dell'incidente è la presenza costante negli interventi procedurali, della manutenzione e miglioramento degli impianti per il mantenimento delle condizioni minime di sicurezza.

Fondamentale è ricordare che nelle attività lavorative gli incidenti ai lavoratori sono causati principalmente dalla mancanza di una cultura della sicurezza, essa deve essere fondata su principi che permettano a priori di applicare misure adatte all'attività lavorativa. Per questo motivo è importante la prevenzione in fase di progettazione, accompagnata dalla registrazioni degli incidenti accaduti e della analisi della catena di eventi approfondita. In questo modo è possibile incrementare la conoscenza degli aspetti critici di ogni attività e attuare le misure preventive migliori per l'eliminazione e minimizzazione del rischio.

5 Bibliografia

[1] https://it.wikipedia.org. [Online]. [Consultato il giorno Settembre 2018].

[2] Patrucco, Occupational risk assessment & management [RAM].

[3] B. C. A. I. S. -. A. P. Basso, La prevenzione delle esplosioni da polvere, 2015.

[4] M. P. M. N. T. Lembo, Esplosioni da polveri nei processi di finitura di manufatti in alluminio e leghe nella realtà produttiva ASL 14 VCO: metodi di progettazione e gestione degli impianti ai fini della conservazione e del miglioramento della sicurezza nel tempo.

[5] P. D. M. T. Lembo, Esplosioni da polveri nei processi di finitura di manufatti in alluminio e leghe nella realtà produttiva ASL 14 VCO: analisi del rischio e misure di prevenzione.

[6] A. Abbasi, «Dust explosions–Cases, causes, consequences, and control,» *Journal of Hazardous Materials 140 (2007) 7–44,* 2007.

[7] F. R. R. Z. Piccinini, Le esplosioni da polvere: casi studio in regione piemonte.

[8] C. Zani, La valutazione dei rischi in impianti a rischio di esplosione per la presenza di polveri infiammabili.

[9] C. Demontis, «Frequency of Dust Explosion in Grain Storage,» *Tecnica Molitoria,* 2012.

[10] Gazzetta Ufficiale della Repubblica Italiana, *D.lgs 81/2008-Testo Unico Sulla Salute E Sicurezza Sul Lavoro,* 2008.

[11] Luzzi, Maida, Monai e Patrucco, «Sviluppo e risultati di una metodica computer assistita per l'analisi approfondita di eventi infortunistici lavoro correlati,» [Online].

[12] Marigo, Rischio atmosfere esplosive, Classificazione Valutazione Prevenzione Protezione, IPSOA, 2013.

[13] D. Marmo, «Forensic reconstruction of a flour mill explosion,» in *8th ISHPMIE*, Yokohama, Japan, 2010.

[14] A. R. Tascòn, «Dust Explosion Venting in Silos: a Comparison of Santards NFPA 68 and EN 14491,» *Journal of Loss Prevention in the Process Industries 22,* pp. 220-225, 2009.

[15] Checola, «Progettazione e realizzazione ai fni antincendio di depositi di cereali,» *antincendio,* giugno 2013.

[16] E. M. M. M. Bisignano, «Valutazione del rischio infortunistico derivante da esplosioni di sostanze in polvere durante la manipolazione e lo stoccaggio,» in *3° seminario aggiornamento dei professionisti contarp. La prevenzione che cambia. I ruoli, Le strategie e le sinergie degli "attori" coinvolti..*

[17] Pukhlii, «Secondary Sites of Fire in an Explosion of Organic Dust,» *Combustion, Explosion, and Shock Waves, Vol.36, No. 3, 2000.*

[18] C. Piccinini, Gas, vapori e polveri a rischio di esplosione e incendio, Politecnico di Torino, www.regione.piemonte.it.

[19] M. A. M. N. Esposito C., « Valutazione dei rischi derivanti dall'elettricità statica: individuazione e valutazione delle misure di prevenzione e protezione,» in *Atti del 4° Seminario CONTARP*, Assisi, 2005.

[20] Gazzetta Ufficiale della Repubblica Italiana, *D.lgs.85/2016,* 2016.

[21] G. Pera, Il rischio di esplosione, misure di protezione ed implementazione delle Direttive ATEX 94/9/CE e 99/92/CE, INAIL, 2013.