

LE ESPLOSIONI DA POLVERE: CASI STUDIO IN REGIONE PIEMONTE

*N. Piccinini**, *V. Filippetti*, *A. Robotto*, *G.N. Ruggiero*, *C. Zonato*

ARPA Piemonte, Unità Operativa Autonoma di Coordinamento Rischio Tecnologico,
Via Principessa Clotilde, 1 - 10144 Torino, ucrt@arpa.piemonte.it

* Dipartimento di Scienza dei Materiali e Ingegneria Chimica, Politecnico di Torino,
Corso Duca degli Abruzzi, 24 - 10129 Torino

SOMMARIO

La movimentazione e l'utilizzo industriale di sostanze polverulente possono dar luogo a fenomeni esplosivi al di là dell'esplicita classificazione di pericolosità loro attribuita: infatti qualsiasi materiale solido combustibile finemente suddiviso e disperso in aria può provocare, se innescato, un'esplosione.

Per la tipica fenomenologia esplosiva associabile alle polveri che, apparentemente innocue, possono manifestare la loro pericolosità improvvisamente ed inaspettatamente al variare delle condizioni di utilizzo, solo un'attenta e scrupolosa analisi dei rischi, insieme ad uno studio approfondito dei pericoli intrinseci legati alla specifica sostanza, possono consentire l'identificazione delle possibili cause e condizioni operative che potrebbero condurre all'evento esplosivo e l'adozione delle conseguenti azioni preventive e protettive.

1. PREMESSA

Una delle prime notizie riportate in letteratura su esplosioni da polveri risale al 1785, quando nella bottega di un fornaio di Torino, mentre "...un garzone era intento a spostare dei sacchi di farina alla luce di una lampada...", si verificò l'esplosione di una nube di farina. L'evento fu riportato dal Conte Carlo Ludovico Morozzo di Bianzè, un matematico e chimico autorevole in un'epoca in cui, benché fosse già nota l'infiammabilità dell'idrogeno, del metano e di altri gas, ben pochi avrebbero considerato la possibilità che anche le polveri potessero esplodere [1].

Ma se da un lato le conoscenze sui pericoli legati all'utilizzo di gas e vapori infiammabili sono state ampiamente sviluppate e approfondite nel tempo, anche perché da sempre associate al rischio di incendio e di esplosione, quelle relative alle polveri e al loro utilizzo nell'industria sono state, e sono tutt'oggi, di difficile diffusione e spesso sottovalutate proprio per la tipica fenomenologia associabile alle polveri che, apparentemente innocue, possono manifestare la loro pericolosità improvvisamente ed inaspettatamente al variare delle usuali condizioni operative.

2. FENOMENOLOGIA DELLE ESPLOSIONI DA POLVERI

2.1 Condizioni di esplodibilità

A differenza dei gas e dei vapori infiammabili, per i quali la possibilità di originare fenomeni esplosivi richiede la contemporanea presenza di una fonte di innesco e di un'adeguata quantità di ossigeno, affinché una polvere combustibile esploda è indispensabile, oltre a questo, che essa sia facilmente disperdibile ed in grado di formare una sospensione con l'aria, ad esempio in un ambiente confinato.

In generale, quindi, qualsiasi polvere *combustibile*, sia essa classificata esplosiva dalla normativa con frasi di rischio specifiche (polimeri, resine, carboni, metalli, sostanze farmaceutiche, ecc.) oppure no (granaglie, latte in polvere, zucchero, farina, polvere di legno, ecc.), è potenzialmente soggetta ad esplodibilità, e tale proprietà non dipende solo dalle sue caratteristiche chimico-fisiche (come nel caso di gas e vapori), ma anche da altre condizioni al contorno, ad esempio granulometria, umidità e grado della dispersione in aria.

A titolo esemplificativo in tabella 1 si riportano i valori di concentrazione di una polvere generica nelle possibili situazioni. È interessante notare come l'intervallo di esplosività corrisponda a valori di alcuni ordini di grandezza superiori a quelli ammessi dalla normativa relativa all'igiene industriale.

Al pari dei gas infiammabili, sono definiti anche per le polveri l'*energia di innesco* ed i *limiti* "inferiore e superiore" di *infiammabilità*. Tali proprietà, tuttavia, non sono costanti per una determinata polvere, ma variano in funzione della granulometria, che influenza la superficie di contatto complessivamente disponibile per l'ossidazione e il trasferimento di calore.

In particolare, al diminuire della *granulometria* media di una polvere aumenta il pericolo di esplosione, in quanto aumenta la sua *dispersibilità* in aria, diminuisce l'energia minima di innesco e si abbassa la concentrazione corrispondente al limite inferiore di esplodibilità. Al decrescere del diametro delle particelle si assiste, inoltre, ad un aumento della pressione massima di esplosione e della velocità di incremento della pressione e, di conseguenza, degli effetti dannosi conseguenti.

In tabella 2 si riportano, a titolo esemplificativo, le proprietà esplosive, quali LEL (limite inferiore di esplosività), T_{ign} (temperatura di ignizione), MIE (minima energia di ignizione), P_{max} (pressione massima generata nell'esplosione) e dP/dT_{max/medio} (incremento massimo/medio di pressione), di alcune polveri organiche e metalliche [2].

Per i diversi meccanismi di combustione delle singole polveri e per alcune operazioni a cui le stesse sono soggette, risulta impossibile definire un diametro massimo limite al di sopra del quale non si verifichi il fenomeno esplosivo. Dall'esperienza, tuttavia, si può presumere che polveri con particelle di diametro superiore a 0.5 mm non siano in grado di dar luogo ad esplosione.

Un altro aspetto, spesso determinante, è la presenza di un *ambiente confinato*, generalmente rappresentato da apparecchiature di impianto, condotti e tubazioni, silos, locali e fabbricati.

Tabella 1. Confronto tra intervalli di concentrazione di polveri.

Polveri	Concentrazione (g/l)
Deposito di polveri	> 100
Intervallo di esplosività	10-1
Igiene industriale	< 0,00001

Tabella 2. Proprietà esplosive di alcune polveri [2].

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

2.2. Effetti delle esplosioni di polveri

L'effetto esplosivo è determinato da un rapido rilascio di calore accompagnato da un improvviso aumento della pressione conseguente alla repentina espansione dei gas caldi. Il fenomeno è di tipo deflagrante, con velocità del fronte di fiamma dell'ordine dei m/s.

Gli effetti provocati dall'esplosione di polveri variano principalmente in funzione della granulometria della sostanza coinvolta e della percentuale di ossigeno presente nella miscela, oltre che di altri parametri, come ad esempio le condizioni atmosferiche, la presenza di ostruzioni o confinamenti lungo il percorso di propagazione, la velocità di rilascio, la direzione in cui l'esplosione avviene e il peso specifico rispetto a quello dell'aria.

Gli effetti consistono spesso nella distruzione dei condotti di ventilazione e dei locali in cui l'esplosione si verifica mentre le distanze alle quali l'onda d'urto può causare ulteriori danni sono in genere meno rilevanti di quelle indotte da gas e vapori.

Un altro fenomeno è specifico delle esplosioni di polveri: l'onda barica in propagazione, causata da una piccola esplosione primaria, può mettere in sospensione strati di polvere depositata nelle vicinanze che, così dispersa in aria, è innescata dallo stesso fronte di fiamma generando un'esplosione secondaria di violenza anche maggiore.

Al fine di confrontare la violenza esplosiva delle polveri sono stati adottati diversi sistemi di classificazione. Uno dei più noti fa riferimento alla classificazione di Bartknecht, che suddivide le polveri combustibili in quattro classi di pericolo in relazione alla violenza dell'esplosione che sono in grado di generare, in funzione del valore di K_{st} (indice di deflagrazione per le polveri), così definito:

$$K_{st} = (dP/dt)_{max} \cdot V^{1/3}$$

essendo (dP/dt) il massimo incremento di pressione e V il volume del contenitore. La correlazione tra i valori di K_{st} e la classe di appartenenza di una polvere è riportata in tabella 3, mentre in tabella 4 si riporta il valore di K_{st} per alcune polveri comunemente utilizzate.

Tabella 3. Correlazione tra i valori di K_{st} e la classe di appartenenza [4].

Classe di esplodibilità	K_{st} (bar·m/s) in presenza di un innesco da 10 kJ	K_{st} (bar·m/s) in presenza di 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

Tabella 4. Valori di K_{st} di alcune polveri.

Polvere	K_{st} (bar·m/s)
Farina	87
Amido	150
Aspirina	217
Alluminio	555

3. CASI DI ESPLOSIONI DI POLVERI IN REGIONE PIEMONTE

Per quanto esposto appare evidente come il rischio della possibile esplosione di polveri combustibili possa essere presente in tutte le attività industriali in cui esse vengono manipolate; a titolo esemplificativo si possono ricordare:

- Lavorazione del legno
- Industria alimentare
- Industria farmaceutica
- Industria delle materie plastiche
- Lavorazione dei metalli
- Industria tessile

In ognuno di questi settori andrebbe perciò affrontato uno studio per individuare le azioni e gli accorgimenti di natura tecnica o gestionale per la prevenzione, adottando eventuali misure di protezione o mitigazione dei potenziali effetti.

Nel seguito sono discussi tre casi significativi di esplosioni da polveri occorsi recentemente in Regione Piemonte sia in aziende soggette ai disposti del D.Lgs. 334/99 “Attuazione della Direttiva 96/82/CE relativa al controllo dei pericoli di incidenti rilevanti connessi con determinate sostanze pericolose” che in aziende non soggette, in cui si impiegavano sostanze non esplicitamente classificate pericolose. In particolare gli incidenti riportati hanno interessato comparti produttivi differenti (industrie farmaceutiche, stabilimenti per il trattamento superficiale dei metalli, aziende tessili...) e sostanze diverse tra loro, evidenziando come la movimentazione e l’utilizzo di polveri combustibili possa dar luogo a fenomeni esplosivi, indipendentemente dalla loro classificazione e come alla base della maggior parte di tali episodi ci sia una mancanza di conoscenza delle specifiche caratteristiche di pericolosità delle sostanze coinvolte.

3.1 Esplosione in un’azienda farmaceutica

Un caso tipico di esplosione da polvere è quello verificatosi in un’azienda produttrice di principi attivi farmaceutici durante il caricamento di un intermedio in un reattore che, secondo le procedure di stabilimento, avrebbe dovuto essere preventivamente inertizzato con azoto [3].

Dopo aver caricato regolarmente un primo fusto da 30 kg di sostanza nel reattore vuoto e raffreddato, proveniente dalla lavorazione precedente della stessa campagna di produzione, fu caricato un secondo fustino mediante svuotamento diretto attraverso il boccaporto del contenitore di tipo “Kraft” con doppio sacco di polietilene garantito antistatico. Si verificò lo sviluppo di un’improvvisa fiammata che investì gli operatori addetti alle operazioni, propagandosi ad alcune tubazioni in plastica limitrofe. I due operatori coinvolti nell’evento si dettero alla fuga ma, con i loro abiti incendiati appiccarono il fuoco ai vapori di etere isopropilico che nel frattempo venivano scaricati da una centrifuga vicina, creando un secondo principio di incendio.

I fattori che molto probabilmente concorsero a determinare l'incidente furono le caratteristiche del materiale, una polvere combustibile e finemente disperdibile in aria, la possibilità che il reattore non fosse stato correttamente inertizzato o bonificato al termine della lavorazione precedente e perciò contenesse ancora vapori residui di solventi e, infine, la presenza di una fonte di innesco di tipo elettrostatico, attribuibile al passaggio della polvere all'interno della manica di aspirazione, allo sfregamento contro i sacchetti o a una non perfetta messa a terra dell'impianto.

3.2 Esplosione in un'azienda di filati poliammidici

La produzione di filo floccato è realizzata generalmente per mezzo di una linea costituita da una cantra, da un floccatore, ovvero un apparecchio in cui i fili grezzi di cotone sono imbevuti di resina e il flock è fatto aderire all'anima tramite un processo di tipo elettrostatico, e da una linea di finissaggio in cui si realizza l'essiccazione e la polimerizzazione della resina.

In quell'occasione, a causa di una fermata prolungata della linea di finissaggio, il flock accumulatosi sulla batteria di scambio si surriscaldò dando origine ad un fenomeno di combustione a brace che, al momento del riavvio del ventilatore, innescò la sospensione di flock in aria causando un'esplosione primaria nel condotto di ricircolo dell'aria. A tale esplosione ne seguì una seconda più violenta che si propagò nei condotti di evacuazione determinando la fuoriuscita di materiale in fiamme nel reparto, danni generalizzati sulle apparecchiature coinvolte, danni meccanici alle strutture degli edifici e gravi ustioni ad alcune persone presenti.

3.3 Esplosione da polveri metalliche

Un'altra esplosione da polveri si verificò in una ditta specializzata nella smerigliatura e in operazioni di finitura superficiale di manufatti in alluminio.

Durante le operazioni di smerigliatura, un pezzo in lavorazione cadde all'interno della macchina smerigliatrice provocando la rottura del nastro continuo abrasivo; quest'ultimo, muovendosi in modo disordinato all'interno del carter, rimescolò la polvere di alluminio accumulata consentendone l'innesco per la produzione di scintille dovute allo sfregamento.

Si verificò così una prima esplosione che investì l'operatore sotto forma di vampata, favorendo la produzione di altre scintille e frammenti incandescenti della tela smeriglio, i quali, aspirati dall'impianto di abbattimento, causarono l'accensione della polvere di alluminio presente nel ciclone di quest'ultimo dando origine ad un'esplosione secondaria di entità maggiore.

Il repentino incremento di pressione provocò il cedimento strutturale del ciclone, la deformazione plastica del suo condotto di uscita, il cedimento della tubazione di aspirazione interna al capannone, l'apertura di diversi portelli d'ispezione posti lungo le due tubazioni principali e la deformazione e l'apertura dei carter delle altre smerigliatrici, con il conseguente spandimento in reparto di una grande quantità di polvere di alluminio. Infine il fronte di fiamma, incanalandosi verso il filtro a manica favorito dall'aspirazione in atto, provocò l'innesco multiplo delle polveri finissime presenti negli interstizi, causando una terza esplosione che distrusse il filtro, proiettandone i frammenti anche a distanza superiore ai 50 m.

Prove sperimentali condotte su campioni di polvere prelevati dimostrarono la grande influenza della granulometria delle polveri sul loro limite inferiore d'infiammabilità: il LEL per la polvere trovata nel filtro a maniche, più fine, risultò pari a 0.125 g/l, mentre quello della polvere trovata nel ciclone era pari a circa 1 g/l.

4. PREVENZIONE E PROTEZIONE DALLE ESPLOSIONI DA POLVERI

Dall'analisi degli eventi riportati emerge come l'utilizzo e la manipolazione di polveri potenzialmente esplosive di qualunque natura, indipendentemente dal fatto che la normativa gli attribuisca frasi di rischio specifiche, dovrebbero essere preceduti da uno studio dei pericoli intrinseci, attraverso gli strumenti tipici dell'analisi dei rischi, in modo da identificare le condizioni operative e le anomalie che possono condurre all'evento esplosivo, potendo così adottare le conseguenti azioni preventive e protettive. Inoltre, per un approfondimento mirato a particolari tipologie di sostanze, può essere necessario il ricorso a tecniche analitiche specialistiche per la caratterizzazione del loro comportamento in condizioni particolari, anche diverse da quelle normali di esercizio.

4.1 Prove sulle polveri

Tra le tecniche analitiche che possono essere impiegate per la caratterizzazione di sostanze potenzialmente esplosive si possono ricordare:

- prove di esplosività e di infiammabilità, per mezzo del “Tubo di Hartmann”: si valuta la sensibilità all’accensione, il comportamento al fuoco, i rischi termici, ecc. della polvere classificandola di gruppo A, qualora si incendi con propagazione di fiamma lontano dalla sorgente di accensione, o di gruppo B, qualora la sua fiamma non si propaghi lontano dalla sorgente di accensione.
- minima concentrazione esplodibile, mediante il “Tubo di Hartmann”;
- prove di caratterizzazione chimica: si analizza la struttura, il bilancio di ossigeno, la granulometria, la percentuale di umidità, il comportamento adiabatico, ecc.;
- prove di stabilità termica, mediante l’utilizzo, ad esempio, della “Cella a Diffusione” o “Cella areata” e mediante prove con aria calda sulla superficie;
- prove sulla minima energia di innesco, mediante il “Forno di Godbert – Greenwald”.

Dopo aver effettuato così un primo screening, si potrà individuare la necessità di sottoporre la sostanza a prove analitiche più specifiche. A tale scopo potranno essere effettuate, ad esempio, le prove di detonazione/deflagrazione proposte dall’HSE (ad es. *explosion test vessels*: per valutare l’andamento delle esplosioni in recipienti chiusi e muniti di dispositivo di sfogo, ecc.), riuscendo a caratterizzare meglio la polvere risalendo al suo valore di dP/dt_{max} , ossia la massima pressione generata dall’esplosione nell’unità di tempo.

4.2 Misure preventive

Una volta verificato che la sostanza polverulenta è combustibile e potenzialmente in grado di esplodere, per poterla utilizzare in sicurezza in un processo industriale, sarà necessario prendere adeguati accorgimenti al fine di ridurre notevolmente la probabilità di esplosione, come ad esempio:

- eliminare le possibili fonti di innesco (fiamme, scintille, attrito, urti, ecc.);
- ridurre al minimo il contatto del materiale con l’ossigeno, inertizzando l’ambiente;
- evitare qualsiasi contaminazione;
- collegare gli impianti a terra, controllando che non esistano parti di questi con caratteristiche isolanti o parti non perfettamente collegate a terra;
- ridurre al massimo le turbolenze nei locali di stoccaggio e di manipolazione, per esempio, minimizzando i percorsi orizzontali di tubazioni e di strutture di sostegno e assicurando la massima pulizia dell’ambiente di lavoro;
- se possibile, adoperare e stoccare le polveri allo stato umido, riducendo in tal modo l’entità della dispersione;
- stoccare il materiale in modo tale che l’energia liberata da eventuali fenomeni di decomposizione possa essere facilmente dissipata senza causare il coinvolgimento di altro materiale nel processo stesso;
- mantenere i locali destinati allo stoccaggio privi di sorgenti di riscaldamento, in modo che la temperatura non raggiunga mai valori superiori ai 50°C anche nelle giornate più calde;
- nei locali destinati a stoccaggio e manipolazione, i mezzi di estinzione dovranno essere sempre perfettamente funzionanti valutando altresì l’opportunità di installare sistemi fissi.

4.3 Sistemi di protezione

In generale per limitare i danni causati da un’eventuale esplosione da polveri, si può, invece, ricorrere ad uno dei seguenti sistemi di protezione:

- *Sistemi di contenimento*, ovvero sistemi che consentono di ottenere un contenimento totale dell’effetto esplosivo, essendo in grado di sostenere le pressioni statiche tipicamente generate dalle esplosioni da polvere (7-10 bar). Sono sistemi protettivi passivi, distinti in due diversi tipi: il primo è detto “resistente alla pressione”, in quanto costruito per resistere alla pressione statica, e il secondo è detto “resistente alla pressione d’urto”, poiché tiene conto della velocità di incremento della pressione durante il fenomeno esplosivo. Il primo tipo è costituito da un contenimento progettato per resistere all’esplosione senza deformarsi, mentre il secondo è progettato per potersi deformare e quindi, in caso di esplosione, non è più riutilizzabile.
- *Sistemi di isolamento*, ovvero sistemi ad isolamento automatico, a soppressione automatica o a materiale d’arresto. Il tipo ad isolamento automatico si applica generalmente alle tubazioni e prevede l’utilizzo di valvole d’intercettazione a chiusura rapida, simili a quelle utilizzate per i gas infiammabili. Il segnale di chiusura è dato da sensori di pressione o da sensori ottici. Le valvole sono generalmente localizzate ad una distanza di 5-10 m dal sensore e hanno un tempo di chiusura di circa 25 ms. Come il precedente, anche il sistema di soppressione automatica si applica per lo più alle

tubazioni e consiste in una barriera simile a quella realizzata dalle valvole d'intercettazione ma, a differenza di queste ultime, il rilevatore comanda il rilascio di una sostanza in grado di soffocare l'esplosione, (ad esempio bromoclorodifluorometano, clorobromometano e acqua) che viene rilasciata in brevissimo tempo per azione di un detonatore attivato elettricamente. Tale sistema è generalmente applicato con buona efficacia sulle tubazioni di diametro superiore a 0.5 m.

- *Sistemi di soppressione*, ovvero sistemi il cui funzionamento richiama quelli utilizzati per le tubazioni, in grado di arrestare l'esplosione generatasi nei contenitori. Tali sistemi sono progettati in base alla massima velocità di incremento della pressione durante un'esplosione e i sistemi di rilevazione sono costruiti con materiale molto resistente alla corrosione, alla condensazione e all'urto. La soppressione dell'esplosione può avvenire mediante estinzione, cattura dei radicali liberi, impregnazione o inertizzazione.
- *Sistemi di sfogo*, che trovano applicazione, però, solo qualora esista uno scarico sicuro per il materiale sfiatato. Qualora la polvere da sfiatare sia tossica, non è possibile effettuare lo scarico direttamente in atmosfera, ma si dovrà prevedere il convogliamento in un sistema di blow down.

4.4 Misure gestionali

Oltre al ricorso a tecniche analitiche, misure preventive e di protezione è evidente che, per realizzare una strategia globale di prevenzione nei confronti delle esplosioni, sono rilevanti anche le misure di tipo gestionale.

Ai sensi della Direttiva CEE/CEE/CE n° 92 del 16 Dicembre 1999, discendente dalla direttiva 89/391/CEE, relativa alle prescrizioni minime per il miglioramento della tutela della sicurezza e della salute dei lavoratori che possono essere esposti al rischio di atmosfere esplosive, il datore di lavoro è tenuto infatti a redigere e ad aggiornare uno specifico documento sulla protezione nei confronti delle esplosioni, che comprende l'identificazione delle situazioni di pericolo, la valutazione dei rischi e la definizione delle misure specifiche da adottare per la tutela della salute e della sicurezza dei lavoratori esposti al rischio di atmosfere esplosive. Sono inoltre adottate procedure specifiche relative a processi e fasi di lavorazione in cui tali sostanze, potenzialmente esplosive, vengono impiegate e previsti piani di formazione, informazione e addestramento adeguati al grado di pericolosità delle sostanze manipolate.

5. CONCLUSIONI

Dall'analisi dei tre eventi incidentali riportati, appare evidente come, ogni qual volta si utilizzino e manipolino polveri potenzialmente esplosive, si dovrebbe effettuare uno studio dei pericoli intrinseci, al fine di identificare le possibili cause e condizioni operative che possono condurre all'evento esplosivo, adottando le conseguenti azioni preventive e protettive.

Inoltre, dal momento che la letteratura specialistica sull'argomento in termini di dati di esplodibilità è piuttosto recente e ancora limitata a pochi casi, per un approfondimento mirato a particolari tipologie di sostanze può rendersi necessario il ricorso a tecniche analitiche specialistiche in grado di caratterizzare il comportamento delle diverse polveri in particolari condizioni, anche diverse dalle normali di esercizio.

6. BIBLIOGRAFIA

- [1] *“Relation d'un violente détonation”*, Carlo Ludovico Morozzo di Bianzè, a cura di N. Piccinini, Politecnico di Torino, Torino, 1996;
- [2] *“Dust Explosions and Fires”*, K. N. Palmer, Head of Industrial and Toxic Hazards Section Fire Research Station, Volume 1 and 2, London Chapman and Hall, 1973;
- [3] *“Sicurezza dei reattori chimici”*, ANPA, Dip. Rischio Tecnologico e Naturale, Settore Rischio delle Attività Industriali, Roma, 2000;
- [4] *“Loss Prevention in the Process Industries: hazard identification, assessment, and control”*, Frank P. Less, second edition, Volume 2, Butterworth Heinemann, Oxford, 2001.