

LE ESPLOSIONI DI POLVERI NELLE ATTIVITA' INDUSTRIALI: MISURE DI PREVENZIONE E PROTEZIONE

P. Qualizza (*), P. Fargione (**)

(*) Ministero dell'Interno - Corpo Nazionale dei Vigili del Fuoco - S.T.C. - Ispettorato per le Sedi di Servizio e Infrastrutture - Via Cavour, 5 - 00184 Roma

(**) Università di Roma "La Sapienza" - Scuola di Specializzazione in Sicurezza e Protezione - C.so Vittorio Emanuele II, 244 - 00186 Roma

1. INTRODUZIONE

Il rischio di esplosione di polveri è un problema presente in un grande numero di attività lavorative e coinvolge una ingente varietà di materiali e prodotti. Esso infatti può essere riscontrato in modo significativo nell'ambito di molte tipologie industriali, quali ad esempio l'industria per la lavorazione del legno, per la produzione della carta, quella estrattiva e per la lavorazione del carbone, l'industria alimentare, l'industria per la lavorazione e trasformazione dei prodotti agricoli, l'industria per la produzione di plastiche e resine, per la lavorazione di alcuni metalli, l'industria farmaceutica, ecc. Ciò ha indotto a studiare in modo approfondito il problema per consentire l'adozione di misure di prevenzione e protezione sempre più efficaci a tutela dei lavoratori ed a salvaguardia degli impianti.

Gli incidenti provocati da esplosioni di polveri sono abbastanza frequenti e spesso producono danni ingenti non solo in termini economici, ma anche per numero di morti e feriti. La produzione di effetti dannosi particolarmente gravi è una caratteristica di tutte le esplosioni di polveri, come si può constatare esaminando i dati disponibili. Tale caratteristica è conseguenza della dinamica con cui si sviluppa il fenomeno. Le esplosioni di polveri infatti di solito sono costituite da un evento iniziale, detto esplosione primaria, che si verifica a seguito dell'innesco di una nube di polvere ed aria, compresa nel proprio campo di esplosività; il fenomeno poi si evolve dando luogo ad una o più esplosioni secondarie costituite da successivi inneschi di nubi di polvere messe in sospensione dall'onda di pressione provocata dalla esplosione primaria. L'esperienza insegna che gli effetti delle esplosioni secondarie sono più dannosi di quelli indotti da quella primaria, essendo le pressioni generate più elevate.

Dai dati disponibili riguardanti le esplosioni di polveri verificatesi nel passato, si riscontra che il settore maggiormente a rischio è quello agro-industriale, seguito poi dalle altre attività sopra elencate. A titolo di esempio si riporta di seguito una tabella relativa ai dati riguardanti circa 600 eventi incidentali, costituiti da esplosioni di polveri, rilevati in Germania e raccolti dal Berufsgenossenschaftliche Institut für Arbeitssicherheit (BIA) [1].

Materiali/Prodotti	Eventi (%)
Prodotti alimentari e mangimi	32
Legno	22
Carbone/Torba	14
Altri materiali	13
Metalli	11
Materiali sintetici	7
Carta	1

Tabella 1. Suddivisione degli incidenti per tipologia di materiali e prodotti coinvolti nelle esplosioni

Nonostante gli incidenti accaduti e l'importanza economica delle attività coinvolte, fino ad oggi il problema non è stato trattato specificamente nella normativa italiana, ad eccezione di misure generali contenute in alcune leggi in materia di sicurezza sul lavoro ed in materia di prevenzione incendi. Questa lacuna normativa, propria anche di altri Stati europei, è stata avvertita con intensità crescente negli anni passati, fino a determinare, recentemente, l'emanazione di una direttiva comunitaria, la 1999/92/CE del 16.12.1999, che prende in considerazione i luoghi di lavoro con rischio di atmosfere esplosive, con specifico riferimento alle polveri, la quale prevede una serie di misure di prevenzione e protezione minime che il datore di lavoro deve adottare per poter esercire l'attività.

2. LA DIRETTIVA 1999/92/CE

La direttiva 1999/92/CE: “*prescrizioni minime per il miglioramento della tutela della sicurezza e della salute dei lavoratori che possono essere esposti al rischio di atmosfere esplosive*”, nota anche come ATEX 118A, “...*fissa le prescrizioni minime nel settore della protezione della sicurezza e della salute dei lavoratori che possono essere esposti al rischio di atmosfere esplosive...*” e definisce “*atmosfera esplosiva una miscela di aria, in condizioni atmosferiche, con sostanze infiammabili allo stato di gas, vapori, nebbie o polveri in cui, dopo ignizione, la combustione si propaga all’insieme della miscela incombusta*”.

Questa direttiva prevede che il datore di lavoro garantisca la sussistenza di tali prescrizioni mediante l’adempimento di una serie di obblighi riconducibili a quelli di seguito elencati:

- adozione di misure di prevenzione e protezione contro le esplosioni, in modo da prevenire la formazione di atmosfere esplosive, evitare l’ignizione delle stesse, a seguito di loro eventuale formazione e, nel caso di fallimento delle precedenti misure, attenuare i danni di una esplosione;
- valutazione dei rischi di esplosione effettuata sulla base della probabilità e durata della presenza di atmosfere esplosive, della probabilità della presenza, dell’attivazione e dell’efficacia di fonti di ignizione, comprese scariche elettrostatiche, delle caratteristiche dell’impianto, delle sostanze utilizzate, del processo e delle loro possibili interazioni e dell’entità degli effetti prevedibili.

2.1. Principali adempimenti del datore di lavoro

Uno dei punti fondamentali della direttiva è quello contenuto nell’art.7 dove viene sancito l’obbligo per il datore di lavoro di ripartire in zone le aree in cui possono formarsi atmosfere esplosive.

Queste aree sono elencate nell’allegato I e, per quanto riguarda le polveri, risultano suddivise nel seguente modo:

Zona	Descrizione
20	Area in cui è presente in permanenza o per lunghi periodi o spesso un’atmosfera esplosiva sotto forma di nube di polvere combustibile nell’aria.
21	Area in cui occasionalmente durante le normali attività è probabile la formazione di un’atmosfera esplosiva sotto forma di nube di polvere combustibile nell’aria.
22	Area in cui durante le normali attività non è probabile la formazione di un’atmosfera esplosiva sotto forma di nube di polvere combustibile e, qualora si verifici, sia unicamente di breve durata.

Risulta importante sottolineare che il parametro utilizzato per definire la pericolosità di una determinata zona non è la quantità di materiale lavorato o depositato o la quantità di polvere prodotta, bensì il tempo per il quale un’atmosfera esplosiva può perdurare, in condizioni normali o accidentalmente, nell’ambito dello stesso.

Una volta effettuata la ripartizione in zone delle aree in cui possono formarsi atmosfere esplosive, il passo successivo è quello di assicurare l’applicazione delle prescrizioni minime elencate nell’allegato II.

Tale allegato risulta suddiviso in due parti, una riferita alle prescrizioni minime da applicare per il miglioramento della protezione della sicurezza e della salute dei lavoratori che possono essere esposti al rischio di atmosfere esplosive, l’altra relativa ai criteri per la scelta degli apparecchi e dei sistemi di protezione.

Per quanto riguarda la prima parte, sono previste due tipologie di intervento: provvedimenti organizzativi e misure di protezione contro le esplosioni.

I provvedimenti organizzativi servono a definire i comportamenti che i lavoratori devono tenere nell’ambito della propria attività lavorativa in modo da ridurre la possibilità dell’insorgere di situazioni tali da ingenerare un incidente. Questo obiettivo, secondo la direttiva, deve essere conseguito mediante la formazione professionale dei lavoratori, con la stesura di istruzioni scritte e, quando ve ne sia la necessità, con la pratica dell’*autorizzazione al lavoro*.

Quindi, analogamente a quanto accade in materia di salvaguardia della salute e sicurezza sui luoghi di lavoro, ai sensi di alcune norme già vigenti, gli strumenti principali per conseguire un grado di sicurezza accettabile, nell’ambito di un’attività lavorativa, sono la formazione del personale e la stesura di documenti indicanti, per le varie tipologie di lavoro, i passi da compiere, i controlli da effettuare e le azioni da evitare. Questo serve ad impedire che il singolo soggetto esegua operazioni di sua iniziativa, senza la necessaria consapevolezza del rischio che corre.

E’ interessante poi notare che oltre alla formazione e informazione, fra i provvedimenti organizzativi vi è una novità costituita dall’*autorizzazione al lavoro*. Tale autorizzazione deve essere rilasciata da una persona

responsabile prima dell'effettuazione di determinate operazioni potenzialmente pericolose o tali da occasionare rischi quando interagiscono con altre operazioni di lavoro. Questa prescrizione garantisce i lavoratori contro i rischi derivanti dallo svolgimento contemporaneo di operazioni fra loro incompatibili.

Per quanto riguarda le misure di protezione minime da adottare, l'allegato II prevede che:

- eventuali fughe di sostanze in grado di poter determinare un'esplosione vengano eliminate o indirizzate in luoghi sicuri ;
- le misure da adottare debbano fronteggiare il pericolo dovuto alla sostanza esplosiva più pericolosa presente nell'ambito lavorativo;
- vengano adottate idonee misure contro le scariche elettrostatiche;
- gli impianti, le attrezzature, i sistemi di protezione ed i relativi dispositivi di collegamento vengano utilizzati solo se il loro impiego in atmosfere esplosive non comporta un rischio aggiuntivo;
- vengano adottate tutte le misure per ridurre al massimo il rischio di esplosione connesso all'utilizzo delle attrezzature di lavoro e contenere il più possibile gli effetti di un'eventuale esplosione;
- vengano installati dispositivi di rivelazione e di allarme in grado di consentire ai lavoratori di mettersi in salvo prima che l'esplosione abbia luogo;
- vengano adottati e installati idonei dispositivi di fuga per il rapido allontanamento dei lavoratori;
- nell'ambito di ambienti di lavoro con aree a rischio di esplosione venga verificata la sicurezza dell'intero impianto;
- vengano adottate idonee misure per contenere i rischi connessi all'interruzione dell'alimentazione elettrica, al cattivo funzionamento dei dispositivi di sicurezza installati o alla necessità di arresto di emergenza dell'impianto.

La seconda parte dell'allegato II specifica quali devono essere le caratteristiche degli apparecchi e dei sistemi di protezione da impiegare e cioè, con riferimento alla direttiva 94/9/CEE, recepita in Italia con il D.P.R. 23 marzo 1998, n. 126, "Regolamento recante norme per l'attuazione della direttiva 94/9/CEE in materia di apparecchi e sistemi di protezione destinati ad essere utilizzati in atmosfera potenzialmente esplosiva", a quali categorie devono appartenere in funzione della zona di installazione:

Zona	Cat. apparecchi
20	1
21	1 o 2
22	1 o 2 o 3

2.2. Documento sulla protezione contro le esplosioni

Oltre a quanto sopra esposto, la direttiva prevede che il datore di lavoro rediga il documento sulla protezione contro le esplosioni. Tale documento dovrà essere corretto ed aggiornato ogni volta che i luoghi, le attrezzature o l'organizzazione del lavoro subiscano modifiche o trasformazioni. La direttiva specifica anche i contenuti minimi del documento che dovrà precisare in particolare:

- che i rischi di esplosione sono stati individuati e valutati;
- che saranno prese misure adeguate per raggiungere gli obiettivi fissati;
- i luoghi che sono stati ripartiti in zone a norma dell'allegato I;
- i luoghi in cui si applicano le prescrizioni minime di cui all'allegato II;
- che i luoghi e le attrezzature di lavoro, compresi i dispositivi di allarme, sono concepiti, impiegati e mantenuti in efficienza tenendo nel debito conto la sicurezza;
- che, a norma della direttiva 89/655/CEE, sono stati adottati gli accorgimenti per l'impiego sicuro di attrezzature di lavoro.

Sulla base di questa direttiva europea, a cui tutti gli Stati membri dovranno adeguarsi entro il 30 giugno 2003, ogni attività dovrà possedere dei requisiti minimi di sicurezza derivanti in parte da misure di prevenzione e protezione, in parte da una adeguata organizzazione del lavoro.

Ferma restando la difficoltà di suddividere in zone le attività lavorative ricadenti nell'ambito di applicazione di questa direttiva, per cui sarà necessario fornire metodi oggettivi, vi è la necessità di dotare tali luoghi di adeguate misure di prevenzione e protezione. Nelle attività a rischio di esplosione di polveri molte misure di questo tipo vengono già adottate e la tecnologia rende disponibili efficaci sistemi di prevenzione e protezione specifici. Di seguito verranno illustrate alcune delle misure maggiormente utilizzate in questo settore, alcune delle quali ancora in fase di evoluzione.

3. CARATTERIZZAZIONE DI UNA POLVERE ESPLOSIVA

L'analisi del rischio effettuata per una data attività lavorativa, ove vi sia la possibilità di formazione di atmosfera esplosiva, consente di dare una valutazione sul grado di pericolosità dell'attività stessa tenendo conto della natura dei prodotti, delle condizioni ambientali presenti e della tipologia di lavorazioni svolte nell'ambito del processo.

Il rischio finale dipende dalla combinazione di questi elementi: pertanto ogni attività deve essere studiata separatamente, poiché al variare di uno dei suddetti fattori potrebbe cambiare, anche notevolmente, il rischio ad essa connesso. Tuttavia fra gli elementi sopra elencati, quello relativo alla natura della polvere è da considerare per primo; infatti la conoscenza delle caratteristiche della polvere permette di decidere se e quanto approfondire la valutazione del rischio di esplosione. Per poter fare ciò bisogna fare riferimento ad alcuni parametri che consentano di caratterizzare oggettivamente le polveri considerate.

Quindi, la prima serie di operazioni da effettuare quando ci si trova di fronte ad un'attività con presenza di polveri è quella di eseguire una serie di prove standardizzate (ad esempio secondo norme ISO, CEN, CENELEC, VDI, ASTM) che consentano di acquisire dati quanto più possibile oggettivi ed indipendenti da processi industriali.

Di seguito vengono indicati i principali parametri e le prove per la loro determinazione.

Pressione massima sviluppata da un'esplosione di polveri P_{max} : è uno dei principali parametri caratteristici di una polvere. Il suo valore viene determinato provocando un'esplosione all'interno di contenitori di volume noto; spesso a questo scopo si utilizza una camera sferica denominata "20-l-explosion ball" (Figura 1) [8].

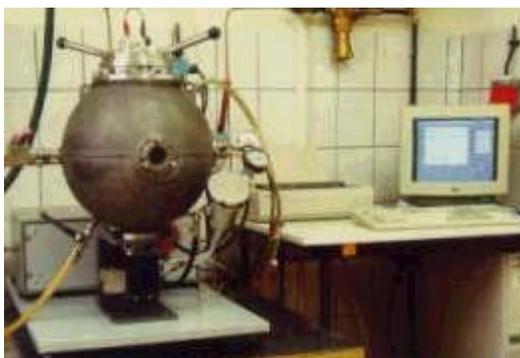


Figura 1. 20-l-explosion ball per l'esecuzione di test sulle polveri

Gradiente massimo di pressione $(dp/dt)_{max}$: questo parametro viene determinato con la stessa apparecchiatura descritta al punto precedente. Dal valore del gradiente di pressione massimo si ricava la costante K_{st} , caratteristica di ogni singola polvere, con la seguente relazione:

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

Limite inferiore di esplosività: tale limite viene determinato con l'ausilio del contenitore sferico da 20 litri o da 1 m³; in tale contenitore vengono provocate esplosioni utilizzando quantitativi di polvere decrescenti per far scendere gradualmente la concentrazione fino a raggiungere quella per cui non si ha più l'esplosione.

Tasso minimo di ossigeno: definisce la quantità minima di ossigeno richiesto, all'interno di una nube di polvere, di concentrazione almeno pari al limite inferiore di esplosività, per consentire il verificarsi di un'esplosione; la prova è simile alla precedente solo che in questo caso si fa variare gradualmente il tasso di ossigeno all'interno del contenitore.

Energia minima di attivazione: il valore di tale energia viene determinato provocando, con l'utilizzo di un apposito apparato, una scarica elettrica capacitiva di energia nota.

Temperatura minima di ignizione: questo parametro si può misurare riscaldando gradualmente una superficie investita da una nube di polvere in concentrazioni adeguate (VDI 2263).

Temperatura di accensione di uno strato di polvere: tale parametro rappresenta la più bassa temperatura a cui bisogna riscaldare una superficie sulla quale si trova uno strato uniforme di polvere per determinarne l'accensione. Il test viene eseguito riscaldando elettricamente una superficie di rame sulla quale è stato posto uno strato di polvere dello spessore di 5 mm e di diametro pari a 100 mm (VDI 2263).

Infiammabilità di una nube di polvere: è un test per determinare la classe di infiammabilità della polvere e viene effettuato mediante il riscaldamento di un filo di platino inserito nella polvere stessa (VDI 2263).

Conduttività elettrica, caratteristiche elettrostatiche: sono dati che si determinano con appositi test (ad es. VDE 0170/0171).

I test effettuati sulle polveri consentono di caratterizzare le stesse fornendo, per una serie di parametri, valori minimi al di sotto dei quali l'esplosione non può avvenire e permettono quindi di definire le condizioni per cui una data polvere può essere considerata a rischio di esplosione. A seguito di ciò si potrà procedere all'individuazione delle misure di prevenzione e protezione ritenute più adatte alla situazione considerata.

4. MISURE DI PREVENZIONE

Si definiscono misure di prevenzione quelle adottate per ridurre la frequenza di accadimento di un dato evento incidentale ipotizzato. Queste misure sono volte ad impedire che, in prossimità dei luoghi considerati a rischio, si vengano a creare quelle condizioni, la cui concomitanza determinerebbe l'evento indesiderato. E' indispensabile quindi conoscere queste condizioni che, nel caso di esplosione di una nube di polvere ed aria, possono essere riassunte nelle seguenti:

- la polvere deve essere infiammabile;
- il tasso di ossigeno nell'aria deve essere pari ad un valore minimo, sufficiente per consentire la combustione;
- la concentrazione di polvere nella nube deve essere almeno pari a quella corrispondente al limite inferiore di infiammabilità;
- la sorgente di innesco deve possedere un'energia sufficiente per attivare la reazione di combustione.

Partendo da questi elementi si può quindi procedere a mettere in atto le misure di prevenzione più opportune per ridurre la possibilità che si presentino contemporaneamente le condizioni sopra descritte.

4.1. Pulizia dei luoghi di lavoro

Questo tipo di azione preventiva è volto ad impedire, per quanto possibile, che la polvere lavorata o prodotta durante i processi di lavorazione si accumuli all'interno o in prossimità dei luoghi di lavoro. Infatti, le eventuali stratificazioni o gli accumuli di polvere potrebbero causare, in particolari circostanze, la formazione di miscele esplosive. Per ovviare a questo inconveniente si deve intervenire predisponendo pulizie periodiche dei locali e delle superfici ed istituendo controlli adeguati per verificare che questa semplice, ma efficace operazione preventiva, venga svolta in modo corretto e con le cadenze stabilite.

E' molto importante che il personale addetto all'effettuazione di queste operazioni sia adeguatamente istruito, non solo relativamente alle azioni da compiere, ma anche in merito alle conseguenze che possono derivare dal mancato o errato adempimento delle stesse.

4.2 Inertizzazione dei contenitori di polveri

Quando ci si trova all'interno di ambienti chiusi, in cui si svolgono lavorazioni che determinano la produzione di polvere infiammabile dispersa nell'aria e dove la presenza di inneschi non risulta improbabile, una misura di prevenzione è quella di mantenere il tasso di ossigeno, all'interno di questi ambienti, al di sotto di quello necessario a consentire l'esplosione, con l'immissione di gas inerti (CO₂, N₂, ecc.).

Questa procedura, pur essendo molto efficace, trova applicazione soltanto in alcuni settori quali ad esempio l'industria farmaceutica, dove l'inertizzazione viene praticata nei reattori per gestire in sicurezza operazioni di miscelazione di polveri che, spesso, a seguito delle reazioni che si sviluppano in presenza di aria, possono dare luogo ad esplosioni.

4.3. Installazione di sistemi di ventilazione

Questa misura di prevenzione si basa sull'asportazione in continuo della polvere in sospensione nell'aria. I sistemi utilizzati a questo scopo possono essere diversi a seconda del grado di rischio valutato ed in base alla quantità di polvere che si può disperdere nell'aria.

Quando si prevede che la quantità di polvere in dispersione nell'aria nell'unità di tempo possa essere bassa, richiedendo tempi elevati per formare una atmosfera esplosiva, potrebbe risultare sufficiente realizzare un sistema di ventilazione, forzata o naturale, in grado di creare una corrente d'aria tale da asportare le particelle in sospensione. Nel caso in cui invece le possibili emissioni di polveri in aria abbiano una portata elevata e la formazione di atmosfere esplosive risulti altamente probabile, è necessario installare un sistema di aspirazione che consenta di raccogliere le polveri in appositi contenitori. Il sistema di aspirazione può essere

centralizzato e costituito da più condotte confluenti in un unico contenitore; alternativamente, per ogni luogo a rischio nell'ambito dello stabilimento potrà essere installato un aspiratore autonomo.

Questo sistema è sufficientemente semplice da realizzare, ma se utilizzato in modo improprio potrebbe essere causa esso stesso di esplosione. Infatti, come si evince anche da alcuni incidenti verificatisi nel passato, l'utilizzo di dispositivi non idonei, la non corretta installazione dell'impianto o la sua cattiva manutenzione possono concorrere a creare le condizioni favorevoli ad un'esplosione a seguito di rottura delle condotte di aspirazione o del contenitore di raccolta delle polveri, intasamento di filtri, surriscaldamenti o scariche elettriche dovute al cattivo funzionamento degli aspiratori, mancato svuotamento dei contenitori di raccolta, ecc..

4.4. Eliminazione delle sorgenti di innesco

Analizzando una attività a rischio di esplosione di polveri, si può rilevare che le possibili fonti di innesco possono essere numerose e legate a cause meccaniche, elettriche, oltre che ad altre cause (azione umana, fenomeni meteorologici, ecc.).

Per prevenire gli inneschi derivanti da azioni meccaniche bisogna considerare due possibilità: sorgenti di innesco dovute a cattivo funzionamento di macchinari, sorgenti di innesco derivanti da cause accidentali (presenza di corpi estranei nei materiali lavorati, ecc.).

Nel primo caso le misure di prevenzione sono costituite da procedure scritte, riguardanti il controllo periodico e la manutenzione degli apparecchi; a queste si deve aggiungere l'installazione di appositi sensori per il rilevamento di aumenti anomali di temperatura in prossimità di particolari apparecchiature.

Nel secondo caso bisogna valutare la singola attività per considerare le varie possibilità che si possono verificare, basandosi anche su dati reali a disposizione.

Ad esempio nel settore agro-industriale può succedere che, durante le fasi di carico e scarico, durante la macinazione o in altre fasi di lavorazione, si possano rilevare, nella massa dei prodotti, corpi estranei costituiti da pezzi metallici o di altro materiale che, venendo a contatto con parti meccaniche in movimento, potrebbero generare scintille ed innescare una nube di polvere. Per ovviare a questo inconveniente si possono installare, a monte di queste apparecchiature, appositi filtri o dispositivi in grado di intercettare o segnalare la presenza di corpi estranei.

4.5. Impianti e componenti elettrici

Nell'ambito delle misure di prevenzione non si possono trascurare certamente quelle relative alle apparecchiature ed agli impianti elettrici. Infatti, nell'ambito dei fenomeni che danno luogo ad una esplosione, e, nel caso specifico, ad una esplosione di polveri, le cause elettriche giocano un ruolo molto importante. A questo proposito quindi sono state predisposte apposite norme tecniche, la cui ottemperanza, secondo i disposti della legge 186/68, risulta obbligatoria.

Le norme tecniche che regolamentano questo settore sono le norme CEI 64/2, alle quali però bisogna associare tutta una serie di ulteriori norme europee già emanate o in fase di stesura. Le norme CEI 64/2 classificano i luoghi con pericolo di esplosione o incendio in quattro classi; i luoghi con possibilità di presenza di polveri infiammabili sono compresi nella classe 2.

5. MISURE DI PROTEZIONE

Quando le misure di prevenzione adottate per ridurre la probabilità dell'insorgere di una esplosione di polveri non sono sufficienti a garantire la sicurezza richiesta, bisogna intervenire con misure di protezione, indirizzate cioè al contenimento dei danni provocati da un eventuale incidente.

Le misure di protezione in questo caso dovranno impedire il collasso delle strutture o dei contenitori entro cui si possono sviluppare le esplosioni e, inoltre, evitare che eventuali frammenti, sotto forma di proiettili, investano luoghi estranei all'incidente determinando il propagarsi dello stesso (effetto domino).

Queste misure possono essere, in generale, di tipo passivo o attivo. Le misure di protezione passiva si realizzano in molti casi intervenendo sulle caratteristiche costruttive degli stabilimenti, mentre quelle di protezione attiva consistono nell'installazione di impianti aggiuntivi che devono intervenire in caso di esplosione.

I principali sistemi di protezione utilizzati nell'ambito delle attività a rischio di esplosione di polveri possono essere suddivisi in sistemi di soppressione, sistemi di contenimento e sistemi di sfogo.

La scelta del sistema da utilizzare dipende dal tipo di attività considerata, dalle caratteristiche della polvere presente e dalla valutazione economica in termini di costi – benefici.

5.1. Sistemi di soppressione delle esplosioni

Questo è un efficace sistema di protezione attiva nei confronti delle esplosioni di polveri, poiché determina il “soffocamento” dell’esplosione primaria nelle sue prime fasi, impedendo la propagazione della fiamma e, di conseguenza, la formazione di elevate pressioni; soprattutto, esso è indirizzato ad impedire il verificarsi di esplosioni secondarie. Lo scopo è quindi quello di ridurre il valore della pressione massima P_{max} , parametro caratteristico della polvere considerata, ad un valore ridotto P_{red} che risulta essere quello massimo sopportabile dalla struttura di contenimento. Un sistema di soppressione ben progettato consente di abbassare notevolmente il valore della P_{max} , fino a valori inferiori a 1 bar; esso presenta inoltre il vantaggio di poter essere applicato a una vasta gamma di contenitori (da volumi molto piccoli fino a volumi superiori ai 1000 m³).

Il principio su cui si basa il sistema della soppressione dell’esplosione è quello di impedire, o rallentare, l’evolversi della reazione di combustione che si è innescata, mediante l’immissione repentina nell’ambiente di una sufficiente quantità di sostanze inerti contenute in appositi contenitori detti soppressori HRD (high rate discharge). Tali sostanze sono costituite da polveri che vengono immesse nell’ambiente usando come propellente un gas inerte in pressione (di solito l’azoto).

Le polveri utilizzate a questo scopo possono essere diverse; alcune fra quelle frequentemente utilizzate sono il fosfato di ammonio e il bicarbonato di sodio. Il fosfato di ammonio, per le sue proprietà nocive nei confronti dell’uomo, richiede un trattamento di bonifica dell’ambiente dopo la scarica; esso non viene utilizzato in attività legate all’industria alimentare, per evitare l’inquinamento dei prodotti in caso di erogazione; in questo settore trova invece un grande impiego il bicarbonato di sodio che non risulta pericoloso per la salute.

Un altro efficace agente soppressore di esplosioni è l’acqua finemente nebulizzata, erogata a pressione da appositi contenitori e miscelata a gas inerti che fungono anche da propellenti.

Un sistema di soppressione di esplosioni è costituito da una serie di apparati che devono interagire con la massima precisione al fine di consentire l’intervento tempestivo in caso di necessità; tale sistema può essere suddiviso nei seguenti sotto sistemi:

Sistema di rilevazione: esso è progettato per rilevare in tempi brevissimi aumenti di pressione all’interno del contenitore considerato. I dispositivi di rilevazione possono essere del tipo statico (elettromeccanici) o di tipo dinamico (elettronici).

Nel primo caso il sistema si basa su un contatto elettrico provocato da una membrana azionata dalla pressione, quando questa raggiunge, o supera, un valore limite prestabilito; tale tipologia rileva solo i casi anomali.

Nel caso di rilevatori elettronici ci sono dei sensori che misurano in continuo la pressione all’interno del contenitore; il funzionamento di questi dispositivi è basato sulla velocità di incremento della pressione ed il loro intervento è concomitante al raggiungimento di un prefissato valore del gradiente di pressione. In questo modo si riducono i falsi allarmi determinati da anomalie di funzionamento dell’impianto.

Sistema di controllo e segnalazione: esso permette di ricevere il segnale da parte del rilevatore, di controllarne la veridicità e di comandare, di conseguenza, l’intervento dei soppressori installati sul contenitore. Naturalmente tutte queste operazioni devono essere automatiche ed è necessario che si verifichino in tempi brevissimi, dell’ordine dei millisecondi.

Sistema di soppressione: i dispositivi di soppressione sono costituiti da contenitori di polvere inerte e gas in pressione che, al momento richiesto, devono scaricare tutto il loro contenuto nel volume considerato; oltre al ridotto tempo di intervento, questi dispositivi devono garantire anche una elevata velocità di erogazione, per consentire la saturazione dell’ambiente e quindi l’arresto della combustione.

A questo proposito sono stati studiati vari dispositivi di soppressione che si distinguono fra loro per il diverso tipo di attivazione.

Esistono tipi di apparecchi il cui ugello di scarico è ostruito da una membrana, che in condizioni normali impedisce la fuoriuscita della sostanza inerte, mentre in caso di esplosione, mediante una micro-carica esplosiva comandata dal sistema di segnalazione prima descritto, viene fatta collassare, consentendo così l’erogazione del prodotto estinguente..

Altri sistemi sono basati su valvole la cui apertura può essere comandata da micro-cariche esplosive o da dispositivi elettromeccanici.

Relativamente a questi dispositivi sono stati condotti, e sono tuttora in corso, molti studi ed esperimenti, volti alla determinazione di come e in quale misura alcuni parametri, come la forma geometrica dei soppressori e dei relativi ugelli erogatori, il posizionamento degli stessi sull’involucro del contenitore, la tipologia di erogazione, ecc. agiscono sulla loro efficienza.

Quando ci si trova a dover progettare un sistema di soppressione di esplosioni di polveri, una volta scelto il tipo di dispositivo da utilizzare ed il sistema di erogazione, sorge la necessità di determinare il numero di dispositivi da installare.

Per fare ciò si può fare riferimento a vari tipi di relazioni empiriche, come ad esempio la seguente [1] :

$$N_s = N_0 \cdot K_{st}^{2/3} \cdot V^{2/3} \quad (2)$$

dove:

N_s = numero di dispositivi da installare;

N_0 = valore sperimentale rappresentante il numero di dispositivi simili necessari a sopprimere una esplosione della polvere considerate provocata all'interno di un contenitore di prova, di volume pari a 1 m³;

K_{st} = costante propria della polvere considerata;

V = volume del contenitore.

La relazione sopra riportata è valida per contenitori tozzi ($H/D < 2$); per contenitori "snelli" ($2 \leq H/D \leq 10$), essa rimane invariata nella struttura, cambia solo il valore di K_{st} che assume il valore:

$$K_{st}^* = 0,95 \cdot 1,06^{H/D} \cdot K_{st} \quad (3)$$

5.2. Sistemi di contenimento

Questo sistema di protezione contro le esplosioni prevede che il contenitore, entro cui si sviluppa l'esplosione, resista alla sollecitazione indotta dalla pressione. Per essere efficace questo metodo deve considerare la pressione massima che si può sviluppare a seguito dell'esplosione di progetto. Teoricamente questo sistema è di facile concezione, nella realtà però viene poco utilizzato a causa dell'alto costo di realizzazione.

5.3. Sistemi di sfogo (venting)

Una delle principali misure di protezione che si possono adottare per ridurre l'effetto di esplosione di polveri all'interno di contenitori chiusi (silos di stoccaggio, reattori di miscelazione, locali adibiti a magazzino o a lavorazione, ecc.) è la realizzazione di una o più *superfici di minor resistenza*. Questo sistema, detto anche "venting", consente, in caso di esplosione, di evitare il collasso dell'involucro, con tutte le conseguenze che questo comporta, facendo sì che la pressione generatasi a seguito del fenomeno venga sfogata attraverso aperture predeterminate che si formano nelle prime fasi dell'esplosione per effetto della sovrappressione stessa.

La realizzazione di questo sistema di superfici richiede un'accurata progettazione che deve tenere conto delle caratteristiche sia della polvere - per poter valutare i parametri connessi alla esplosione - sia del contenitore. Infatti, per rendere efficace tale misura di protezione bisogna che le superfici di minor resistenza previste collassino ad un ben preciso valore di pressione. Tale valore non deve essere né troppo basso, per evitare la formazione di aperture durante la normale attività, né troppo elevato, altrimenti si potrebbe avere il collasso della struttura in corrispondenza di punti deboli prima che si pratichi l'apertura in corrispondenza della superficie programmata.

Un altro elemento da considerare è il posizionamento di queste superfici. A seguito dell'esplosione, infatti, da queste aperture, contestualmente allo sfogo di pressione, vi è la fuoriuscita di gas di combustione e di materiale messo in sospensione a seguito della turbolenza generatasi; tali flussi sia per effetti legati alla elevata temperatura, sia per potenziali effetti meccanici, potrebbero, investendo persone, macchinari o materiali all'esterno, propagare l'incidente, vanificando così la loro funzione protettiva.

Per poter calcolare la superficie di minor resistenza da realizzare in corrispondenza dell'involucro di un contenitore a rischio di esplosione di polveri, è necessario definire i parametri che intervengono nel calcolo. Questi parametri, oltre a P_{max} e K_{st} , di cui si è detto precedentemente sono i seguenti:

P_{red} : è il valore a cui bisogna ridurre la pressione interna del contenitore in caso di esplosione per evitare il suo collasso. Per determinare questo valore si deve conoscere perfettamente la resistenza del materiale costitutivo del contenitore ed in particolare bisogna considerare il punto più debole. Si può così determinare il valore di pressione massimo a cui resiste il contenitore e l'aliquota di pressione che deve essere sfogata dalla superficie di minor resistenza.

P_{stat} : è il valore di pressione per il quale si ha la rottura dell'elemento di chiusura in corrispondenza della superficie di minore resistenza progettata.

V : volume del contenitore.

H/D : è il rapporto fra l'altezza del contenitore e il diametro di base. Per valori bassi di H/D (contenitori "tozzi") la velocità della fiamma e la sovrappressione risultano pressoché uguali in tutte le direzioni, mentre

all'aumentare del rapporto H/D (contenitori "snelli") la velocità della fiamma subisce maggiori incrementi lungo la direzione assiale risentendo notevolmente della geometria del contenitore stesso.

Per calcolare la superficie totale di minore resistenza per un contenitore bisogna considerare, oltre alle caratteristiche della polvere, la geometria dell'involucro, l'eventuale collegamento fra più contenitori e la resistenza dei materiali costitutivi dell'involucro.

Al variare dei fattori sopra indicati, varia la dinamica dell'esplosione e sorge, di conseguenza, la necessità di adeguare il sistema di "venting" alle singole situazioni.

Per calcolare il valore di A_v esistono alcune equazioni proposte da organismi di normazione di vari Paesi. Di seguito ne vengono riportate alcune, a titolo di esempio, utilizzate per calcolare la superficie totale di facile cedimento di contenitori che si trovano in particolari condizioni.

Le norme tedesche VDI, forniscono per il calcolo di A_v la seguente equazione:

$$A_v = E_f^{-1} \cdot [3,264 \cdot 10^{-5} \cdot P_{\max} \cdot K_{st} \cdot P_{\text{red}}^{-0,569} + 0,29 \cdot (P_{\text{stat}} - 0,1) \cdot P_{\text{red}}^{-0,5}] \cdot V^{0,753} \cdot [1 + (-4,305 \cdot \log P_{\text{red}} + 0,758) \cdot \log H/D] \quad (4)$$

dove E_f è un coefficiente di efficienza.

I termini di validità della suddetta relazione sono:

- Dimensioni del contenitore $0,1 \text{ m}^3 \leq V \leq 10000 \text{ m}^3$;
- Pressione di rottura della superficie di facile cedimento $0,1 \text{ bar} \leq P_{\text{stat}} \leq 1 \text{ bar}$;
- Massima pressione ridotta dell'esplosione $P_{\text{stat}} \leq P_{\text{red}} \leq 2 \text{ bar}$;
- Massima pressione stimata dell'esplosione $5 \text{ bar} \leq P_{\max} \leq 10 \text{ bar}$ (per valori di $K_{st} \leq 300 \text{ bar m s}^{-1}$);
- Massima pressione stimata dell'esplosione $5 \text{ bar} \leq P_{\max} \leq 12 \text{ bar}$ (per valori di K_{st} compresi fra 300 e 800 bar m s^{-1});
- La nube di polvere deve essere omogenea;
- Le condizioni devono essere quelle atmosferiche.

E' necessario specificare, inoltre, che l'equazione sopra riportata è valida per $P_{\text{red}} \geq 0,1 \text{ bar}$ ed è applicabile esclusivamente a contenitori isolati.

Consideriamo ora il caso in cui $P_{\text{red}} < 0,1 \text{ bar}$. Ricadono in questa categoria i contenitori con involucro a bassa resistenza meccanica, come ad esempio gli edifici.

Per tenere conto di questi fattori, il calcolo di A_v può essere effettuato sulla base della seguente equazione, riportata dalle norme NFPA68:

$$A_v = C_1 \cdot A_s / (P_{\text{red}})^{0,5} \quad (5)$$

dove A_s è la superficie totale interna del contenitore e comprende i muri perimetrali, i pavimenti ed i soffitti (nel calcolo di A_s non vanno computate le superfici delle pareti divisorie interne); C_1 è un fattore che si misura in $(\text{bar})^{0,5}$ e dipende dal valore di K_{st} .

Il sistema che consente di abbassare i picchi di pressione al di sotto di un valore minimo, P_{red} , può essere realizzato in diversi modi. Il concetto su cui si basa tale tecnica è quello di prevedere, in corrispondenza di idonei punti dell'involucro, una serie di superfici che, in caso di esplosione, cedano prima di qualsiasi altra parte del contenitore e mettano in comunicazione lo stesso con l'esterno. Concettualmente, questo è un sistema molto semplice, ma richiede una serie di accorgimenti in fase di progettazione.

I sistemi utilizzati a questo scopo sono essenzialmente di due tipi: sistemi che presuppongono la rottura o l'espulsione di "tappi" adeguatamente realizzati e sistemi che si basano sull'apertura di portelli che, una volta cessata la sovrappressione, si richiudono automaticamente ripristinando le condizioni di esercizio.

Il primo tipo di sistema, che all'atto della costruzione risulta poco oneroso economicamente, dopo aver espletato la sua funzione deve essere sostituito al fine di ripristinare l'integrità dell'involucro. Ciò comporta quindi dei costi, sia in termini di materiali che di manodopera, a valle dell'evento incidentale.

Il secondo tipo di sistema, invece, richiede oneri economici molto più elevati in fase di installazione ed anche durante i processi lavorativi, per la necessità di controlli e manutenzione; esso consente però di ripristinare immediatamente le condizioni di esercizio a seguito di un'esplosione. Questa situazione risulta efficace anche perché, in molti casi, impedisce una lunga sospensione dell'attività. Tuttavia il sistema presenta un inconveniente che deve essere valutato in fase di progettazione: tale inconveniente è costituito dalla possibilità che, a seguito dell'apertura del portello, che determina l'abbassamento della pressione all'interno

dell'involucro, e della successiva chiusura dello stesso, all'interno del contenitore si crei una depressione la cui eliminazione è impedita proprio dalla immediata chiusura del portello di sfogo. Questo fatto può dare luogo, qualora non attentamente valutato, a fenomeni di implosione del contenitore che, in tale circostanza, dovrà essere rimosso e sostituito (Figura 2) [1] .

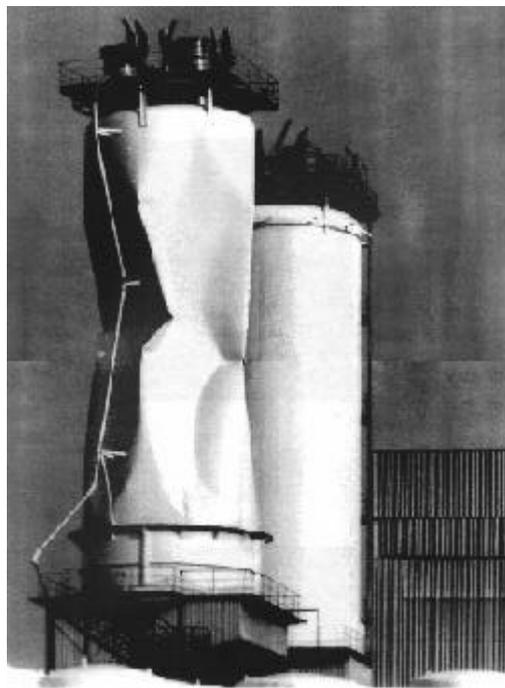


Figura 2. Effetti causati da errata progettazione del sistema di sfogo

Un altro elemento che interviene nella scelta e nella realizzazione di un sistema di “venting” è l’efficienza di collasso, o comunque, di apertura delle superfici di sfogo previste. L’efficienza misura il grado di “inerzia” che una data superficie oppone all’apertura del foro o lo “spunto” di pressione (kg/m^2) necessario ad innescare il fenomeno di collasso. Questa “inerzia” dipende dalla massa del pannello di chiusura e aumenta con l’aumentare della stessa. Pertanto l’efficienza di pannelli sottili e con massa ridotta sarà maggiore di quella relativa a pannelli di massa elevata. L’efficienza di questi sistemi viene determinata da prove specifiche che vengono condotte su questi elementi; secondo le norme VDI 3673 quando il grado di “inerzia” è al di sotto di 10 kg/m^2 la sua azione è considerata trascurabile.

Sulla base delle tipologie sopra indicate si riportano di seguito i principali sistemi di “venting” che vengono utilizzati:

Diaframmi

Sono membrane, costituite da materiali leggeri come tessuti o teli impermeabili, che vengono fissate in corrispondenza di fori, previsti “ad hoc”, distribuiti sull’involucro del contenitore da proteggere. Il vantaggio di queste membrane è che hanno un basso costo e sono di facile realizzazione e sostituzione in caso di rottura; inoltre intervengono prontamente in caso di esplosione. Uno dei problemi legati al loro utilizzo è l’azione meccanica esterna derivante sia da elementi estranei che all’azione dell’uomo che possono provocarne la rottura durante il normale esercizio. Questo inconveniente può essere ovviato collocando tali aperture in luoghi protetti o inaccessibili e prevedendo dei telai di irrigidimento, tali comunque da non influire sulla pressione di rottura P_{stat} per la quale le membrane sono state progettate.

Dischi di rottura

Sono elementi di chiusura posti in corrispondenza delle superfici di “venting” e possono essere realizzati con diversi tipi di materiali (ad esempio sottili pannelli di metallo). Questi elementi sono progettati per collassare ad una determinata P_{stat} e, per agevolare tale collasso, vengono predisposte, in corrispondenza di essi, delle linee di indebolimento che consentono la lacerazione del materiale lungo direzioni predeterminate.

Pannelli rigidi ad espulsione

Un altro sistema di chiusura di superfici di sfogo della pressione, in caso di esplosione, è quello costituito da pannelli rigidi. Questi elementi, che sono dei veri e propri “tappi”, vengono espulsi dalla loro sede quando la pressione raggiunge un valore predeterminato. Essi vengono bloccati nella loro sede con vari sistemi tra cui

ad esempio guarnizioni di gomma collocate in corrispondenza del loro perimetro. A questo proposito è bene sottolineare la necessità di prevedere periodici controlli e interventi di manutenzione in corrispondenza di tali sistemi di bloccaggio, per evitare che fenomeni di incrostazione o depositi di polvere determinino l'innalzamento del valore minimo della pressione di collasso, impedendo così il corretto funzionamento del sistema. Un problema da non trascurare in questo caso è quello costituito dal potenziale pericolo che i pannelli rigidi in argomento, in caso di esplosione, diventino dei proiettili non solo per le persone che potrebbero trovarsi sulla loro traiettoria, ma anche per elementi dell'impianto eventualmente presenti nelle vicinanze, determinando possibili effetti domino. A ciò si può ovviare mediante l'installazione di pannelli incardinati su un lato, o con l'applicazione di elementi tali da trattenere il tappo una volta espulso, impedendone l'allontanamento (catene, cavi, ecc. di adeguata resistenza).

Portelli di sfogo

Sono costituiti da pannelli incardinati su un lato (portelli) in grado di richiudersi automaticamente ripristinando le condizioni di esercizio una volta terminata la situazione di anomalia. Tale caratteristica di funzionamento impone di conferire a questi pannelli una resistenza sufficiente per impedirne l'espulsione o lo scardinamento a seguito dell'esplosione e per mantenere le loro caratteristiche geometriche senza subire deformazioni. Pertanto questi elementi richiedono un peso specifico maggiore rispetto ai casi esaminati precedentemente, per cui la loro risposta alla sollecitazione della sovrappressione risulta meno pronta.

Un problema legato all'utilizzo dei portelli di sfogo come sistema di "venting" è quello già citato, della possibile formazione di una depressione all'interno del contenitore, a seguito della loro chiusura, che può provocare l'implosione dello stesso. Per ovviare a ciò si devono prevedere adeguati sistemi in grado di riequilibrare le pressioni, interna ed esterna, del contenitore.

Anche in questo caso, come per i pannelli rigidi ad espulsione, vi è la necessità di una periodica manutenzione per evitare fenomeni di "saldatura" dei portelli, determinandone il cattivo o mancato funzionamento.

Le misure di protezione sopra indicate sono quelle generalmente adottate in attività che presentano rischio di esplosione di polveri. A queste naturalmente bisogna aggiungere tutta una serie di ulteriori misure comuni anche ad altre tipologie di settori industriali. Tali misure sono inerenti alle caratteristiche costruttive e distributive delle strutture, nonché a quelle di carattere organizzativo che tuttavia non vengono approfondite in questo contesto.

6. BIBLIOGRAFIA

- 1] Atti del Seminario Europeo "Dust Explosions", Metz (F) 13-15 aprile 1999.
- 2] B. Mazzarotta, Termofluidodinamica e chimica degli incidenti, Università degli Studi di Roma "La Sapienza", Scuola di Specializzazione in Sicurezza e Protezione Industriale.
- 3] R.K. Eckhoff, Dust explosions in process industries.
- 4] F. Masson, L'explosion d'un silo de céréales, Blaye, Rapport de synthèse, INERIS (1998).
- 5] NFPA 68, Guide for venting of deflagrations, National Fire Protection Association, Boston, Massachusetts (1984).
- 6] NFPA 68, Venting of Deflagrations, National Fire Protection Association, Quincy, Massachusetts (1994).
- 7] VDI 3673, Pressure Venting of Dust Explosion, July, Verein Deutscher Ingenieure, Berlin (1995).
- 8] www.ibexu.de/html/bestimmung_e.html