

# SICUREZZA SUL LAVORO

Marzio Marigo

## Rischio atmosfere esplosive

Classificazione Valutazione  
Prevenzione Protezione

**Normativa tecnica e Linee guida**

**Analisi del rischio**

**Misure tecniche di prevenzione e protezione**

Seconda edizione



IPSOA

Gruppo Wolters Kluwer



INDICIALIA

Gruppo Wolters Kluwer



# SICUREZZA SUL LAVORO

Marzio Marigo

## **Rischio atmosfera esplosive**

**Classificazione Valutazione  
Prevenzione Protezione**

**Normativa tecnica e Linee guida**

**Analisi del rischio**

**Misure tecniche di prevenzione e protezione**

Seconda edizione



**IPSOA**

Gruppo Wolters Kluwer



**INDICIALIA**

Gruppo Wolters Kluwer

**QUESTO EBOOK È UN'ANTEPRIMA GRATUITA**

Per ordinare la versione integrale utilizzare il link [SHOPWKI.it](http://SHOPWKI.it)  
o rivolgersi all'agente di zona

PROPRIETÀ LETTERARIA RISERVATA

© 2013 Wolters Kluwer Italia S.r.l Strada I, Palazzo F6 - 20090 Milanofiori Assago (MI)

ISBN: 9788821741371

---

Il presente file può essere usato esclusivamente per finalità di carattere personale. I diritti di commercializzazione, traduzione, di memorizzazione elettronica, di adattamento e di riproduzione totale o parziale con qualsiasi mezzo sono riservati per tutti i Paesi.

La presente pubblicazione è protetta da sistemi di DRM. La manomissione dei DRM è vietata per legge e penalmente sanzionata.

---

L'elaborazione dei testi è curata con scrupolosa attenzione, l'editore declina tuttavia ogni responsabilità per eventuali errori o inesattezze.

# SOMMARIO

<i>Introduzione</i> .....	p. IX
<i>Autore</i> .....	» X

## CAPITOLO 1 IL FENOMENO DELL'ESPLOSIONE NELL'INDUSTRIA

1.1	Le esplosioni nel luogo di lavoro.....	» 2
1.2	Le esplosioni delle polveri combustibili.....	» 5
1.3	Le esplosioni di gas, vapori e nebbie infiammabili .....	» 9
1.4	Asfissia e prevenzione dell'ATEX.....	» 11
1.5	Case History .....	» 11
1.5.1	Esplosione di vapori infiammabili: Umbria Olii (Italia), Novembre 2006 .....	» 11
1.5.2	Esplosione di vapori infiammabili: Barton Solvents Wichita (USA), Luglio 2007 .....	» 13
1.5.3	Esplosione di gas infiammabili: Manutenzione su cisterna (Italia), 2007.....	» 14
1.5.4	Esplosione di vapori infiammabili: Feyzin (Francia), Gennaio 1966 .....	» 14
1.5.5	Esplosione di vapori infiammabili: Paloma Condensate (USA), Luglio 1952... ..	» 15
1.5.6	Esplosione di vapori infiammabili: Impianto petrolchimico (Italia), 2004 .....	» 16
1.5.7	Esplosione di vapori infiammabili: Azienda di produzione di carrelli elevatori (Italia), 2003 .....	» 16
1.5.8	Esplosione di vapori infiammabili: Azienda del settore legno (Italia), 2008.....	» 17
1.5.9	Esplosione di nebbie e spray: ThyssenKrupp (Italia), Dicembre 2007 .....	» 18
1.5.10	Esplosione di nebbie e spray: Ingersoll-Rand & Co (USA), 1959 .....	» 23
1.5.11	Esplosione di polveri combustibili: SEMABLA (Francia), 1997 .....	» 23
1.5.12	Esplosione di polveri combustibili: DeBruce Grain Co. (USA), 1998.....	» 25
1.5.13	Esplosione di polveri combustibili: Fabbricazione accessori per abbigliamento (Italia), 2003 .....	» 26
1.5.14	Esplosione di polveri combustibili: Operazioni di caricamento delle polveri nell'industria farmaceutica .....	» 27
1.5.15	Esplosione di polveri combustibili: Molino Cordero di Fossano (Italia), 2007... ..	» 28
1.5.16	Asfissia dovuta a gas inerti: Valero Energy Corporation (USA), 2005 .....	» 29
1.6	Conclusioni .....	» 30

## CAPITOLO 2 L'ESPLOSIONE, LE SOSTANZE E I PARAMETRI

2.1	I parametri di esplosione .....	» 35
2.1.1	I limiti di esplosione.....	» 35
2.1.2	Concentrazione limite di ossigeno (LOC) .....	» 37
2.1.3	Temperatura di accensione .....	» 37
2.1.4	Minima energia di accensione .....	» 38
2.1.5	Punto di infiammabilità (Flash Point) e temperature limite di infiammabilità... ..	» 43
2.1.6	Velocità di combustione.....	» 49
2.1.7	Granulometria delle polveri .....	» 50
2.1.8	I parametri caratteristici di esplosione .....	» 51
2.1.9	Le caratteristiche di caricamento elettrostatico .....	» 56
2.1.10	Le incompatibilità tra le sostanze.....	» 57
2.1.11	Test di combustibilità delle polveri.....	» 61
2.1.12	Test di screening di esplosibilità (US Bureau of Mines Report of Investigations 5624, Laboratory Equipment and Test Procedure for Evaluating Explosibility of Dusts) .....	» 62
2.1.13	Polveri combustibili e scelta dei metodi di prova.....	» 63
2.2	Le miscele ibride .....	» 65
2.3	Le miscele infiammabili in atmosfere arricchite d'ossigeno .....	» 66

2.4	Esempi applicativi ed approfondimenti .....	p. 67
2.4.1	Ampliamento del campo di infiammabilità conseguente ad un aumento di pressione.....	» 67
2.4.2	Calcolo del LOC dell'esano .....	» 67
2.4.3	Le condizioni atmosferiche secondo la direttiva 94/9/CE .....	» 68
2.4.4	Calcolo della MIE dell'ATEX della polvere di latte disidratato a 100 °C .....	» 69
2.4.5	Calcolo delle temperature limite per uno stoccaggio di acetone.....	» 69
2.4.6	Calcolo della modifica del punto di infiammabilità in una miscela metanolo-acqua .....	» 70
2.4.7	Caratterizzazione statistica di un campionamento di polveri .....	» 70
2.4.8	Calcolo del valore di $K_g$ dell'acetone .....	» 71
2.4.9	Approfondimento: Proprietà particolari di alcuni gas e vapori infiammabili ...	» 72
2.5.	Parametri caratteristici di alcune sostanze.....	» 73

### CAPITOLO 3

#### SCENARI INCIDENTALI DI RIFERIMENTO

3.1	Tipologie di esplosione .....	» 85
3.1.1	Deflagrazione e detonazione .....	» 85
3.2	Le principali tipologie di incidente.....	» 87
3.3	Esplosioni causate dal rilascio di gas e vapori infiammabili .....	» 90
3.3.1	Esplosione di vapori, VCE .....	» 91
3.3.2	Flash Fire .....	» 93
3.4	Alberi degli eventi per rilascio di liquidi e gas infiammabili .....	» 94
3.4.1	Scenari connessi all'emissione di gas infiammabili in fase singola .....	» 94
3.4.2	Scenari connessi all'emissione di liquidi che non evaporano all'emissione .....	» 95
3.4.3	Scenari connessi all'emissione di liquidi che evaporano all'emissione .....	» 95
3.5	Esplosioni confinate di gas e vapori infiammabili e polveri combustibili....	» 96
3.5.1	Esplosioni confinate di gas e vapori infiammabili .....	» 97
3.5.2	Esplosioni confinate di polveri combustibili .....	» 101
3.6	Alberi degli eventi per esplosioni confinate in impianti contenenti liquidi infiammabili o polveri combustibili.....	» 105
3.6.1	Scenari connessi ad impianti contenenti liquidi infiammabili con presenza o meno di venting ed isolamento .....	» 106
3.6.2	Scenari connessi ad impianti contenenti liquidi infiammabili con presenza o meno di soppressione chimica ed isolamento .....	» 107
3.6.3	Scenari connessi ad impianti contenenti polveri combustibili con presenza o meno di venting ed isolamento .....	» 108
3.6.4	Scenari connessi ad impianti contenenti polveri combustibili con presenza o meno di soppressione chimica ed isolamento .....	» 108
3.6.5	Le misure di prevenzione e protezione .....	» 109
3.7	Esempi applicativi ed approfondimenti .....	» 111
3.7.1	Scenario prevedibile per rilascio di liquidi infiammabili .....	» 111

### CAPITOLO 4

#### LA PROBABILITÀ E LA DURATA DELL'ATEX

4.1	Analisi degli scenari di emissione catastrofica di ATEX .....	» 118
4.2	Introduzione alla classificazione delle zone a rischio di esplosione .....	» 119
4.3	Classificazione delle zone a rischio di esplosione per gas, vapori e nebbie infiammabili.....	» 131
4.3.1	Le sorgenti di emissione .....	» 133
4.3.2	I fori di guasto nelle tenute .....	» 135
4.3.3	La classificazione di campo lontano .....	» 139
4.3.4	La classificazione di campo vicino .....	» 146

4.3.5	La procedura di classificazione delle zone a rischio di esplosione.....	p. 152
4.3.6	Modelli di emissione e dispersione .....	» 160
4.3.7	Ulteriori relazioni utili alla determinazione della distanza pericolosa.....	» 177
4.3.8	La classificazione delle zone a rischio di esplosione dovute a gas, vapori e nebbie ed il D.Lgs. n. 81/2008 .....	» 186
4.3.9	La classificazione delle zone a rischio di esplosione dovute a gas, vapori e nebbie ed il D.P.R. n. 126/1998 .....	» 189
4.4	Classificazione delle zone a rischio di esplosione per polveri combustibili....	» 190
4.4.1	Le sorgenti di emissione.....	» 190
4.4.2	La procedura di classificazione delle zone a rischio di esplosione.....	» 192
4.5	Esempi applicativi ed approfondimenti .....	» 205
4.5.1	Approfondimento: Il sisma ed il rischio di esplosione .....	» 205
4.5.2	Scenari di emissione catastrofica .....	» 206
4.5.3	Domande su polveri e gas.....	» 208
4.5.4	Definizione delle condizioni atmosferiche nel caso di ATEX derivante da metano .....	» 212
4.5.5	Procedura di esclusione delle sorgenti di emissione da un reparto di finitura per intermedi farmaceutici .....	» 213
4.5.6	Esempi di sorgenti di emissione di gas, liquidi infiammabili e polveri combustibili .....	» 214
4.5.7	Studio del campo lontano per un'emissione di gas di secondo grado .....	» 215
4.5.8	Esclusione di una sorgente di emissione potenziale con l'ausilio del triangolo di infiammabilità.....	» 216
4.5.9	Determinazione della classificazione ATEX dovuta ad una flangia convogliante gas metano .....	» 217
4.5.10	Determinazione della classificazione ATEX dovuta ad una flangia convogliante gas metano ed azoto .....	» 220
4.5.11	Confronto tra i limiti minimi di classificazione proposti dalla CEI 31-35, CEI EN 60079-10-1 ed IP15 .....	» 223
4.5.12	Classificazione di un impianto di estrazione olio operante ad esano collocato in capannone chiuso .....	» 225
4.5.13	Determinazione della zona pericolosa di campo vicino, a seguito di rilascio di un gas liquefatto .....	» 233
4.5.14	Esempi di tipici errori di classificazione delle zone a rischio di esplosione .....	» 234
4.5.15	Semplificazione della classificazione e valutazione delle zone a rischio di esplosione .....	» 235
4.5.16	Utilizzo del software ALOHA per determinare gli effetti di uno sversamento in pozza .....	» 236
4.5.17	Calcolo della distanza di classificazione con simulazione software agli elementi finiti. Rilascio di gas compresso.....	» 236
4.5.18	Calcolo della distanza di classificazione con simulazione software agli elementi finiti. Rilascio di gas liquefatto .....	» 240
4.5.19	Simulazione CFD nel caso di rilasci di gas naturale, propano e metano: la posizione dell'HSL britannico .....	» 245
4.5.20	Calcolo della frazione di evaporata durante la fase di flashing in occasione del rilascio di propano da un recipiente in pressione.....	» 247
4.5.21	Classificazione interna di un silos di stoccaggio polveri.....	» 248
4.5.22	Classificazione interna in tubazioni dedicate al trasporto pneumatico di zucchero .....	» 248
4.5.23	Esempi di classificazione delle zone per presenza di polveri.....	» 249
4.5.24	Determinazione dell'effetto dell'aspirazione localizzata in una lavorazione del settore legno .....	» 254

## CAPITOLO 5

### LA PREVENZIONE DELLA FORMAZIONE DI ATEX

5.1	Inertizzazione .....	» 260
5.1.1	Possibili configurazioni impiantistiche.....	» 263
5.1.2	Purgaggio in pressione .....	» 265

5.1.3	Purgaggio sottovuoto .....	p. 266
5.1.4	Flussaggio .....	» 267
5.1.5	Interruzione del servizio di inertizzazione .....	» 268
5.1.6	Affidabilità del sistema di monitoraggio e controllo .....	» 268
5.1.7	Classificazione delle zone a rischio di esplosione .....	» 270
5.1.8	Il rischio per la sicurezza dei lavoratori .....	» 271
5.1.9	L'inertizzazione e il D.Lgs. n. 81/2008 .....	» 273
5.1.10	L'inertizzazione e il D.P.R. n. 126/1998 .....	» 275
5.2	Concentrazione delle miscele infiammabili esterne al campo di esplosione LEL-UEL .....	» 277
5.3	Sostituzione o riduzione della quantità di sostanze in grado di formare ATEX .....	» 277
5.3.1	Diluizione di liquidi infiammabili con acqua.....	» 277
5.3.2	Inumidimento delle polveri .....	» 278
5.4	Esempi applicativi ed approfondimenti .....	» 278
5.4.1	Calcolo dei cicli di purgaggio a pressione e sottovuoto .....	» 278
5.4.2	Esempio di calcolo di un impianto a inertizzazione.....	» 279
5.4.3	Infiammabilità dei vapori contenuti in recipienti atmosferici .....	» 282
5.4.4	Infiammabilità di una miscela etanolo-acqua .....	» 283

## CAPITOLO 6

### LA PREVENZIONE DELLE SORGENTI DI ACCENSIONE

6.1	Apparecchi elettrici e non elettrici secondo il D.P.R. n. 126/1998 e la norma EN 60079-0.....	» 286
6.1.1	Apparecchi non elettrici .....	» 287
6.1.2	Apparecchi elettrici .....	» 288
6.2	Gli assiemi, i componenti, i dispositivi di sicurezza, i luoghi di impiego previsti e le installazioni secondo il D.P.R. n. 126/1998 .....	» 291
6.2.1	Assiemi .....	» 291
6.2.2	Componenti .....	» 291
6.2.3	Dispositivi di sicurezza, di controllo e di regolazione .....	» 292
6.2.4	Luogo di impiego previsto .....	» 293
6.2.5	Installazioni .....	» 294
6.3	La valutazione del rischio dovuto alla presenza di sorgenti di accensione ai sensi del Titolo XI, D.Lgs. n. 81/2008 .....	» 295
6.4	Sorgenti di accensione e misure di prevenzione e protezione .....	» 298
6.4.1	Superfici calde .....	» 298
6.4.2	Fiamme e gas caldi .....	» 302
6.4.3	Scintille di origine meccanica .....	» 314
6.4.4	Materiale elettrico .....	» 318
6.4.5	Elettricità statica .....	» 318
6.4.6	Fulmini .....	» 334
6.4.7	Onde elettromagnetiche .....	» 334
6.4.8	Reazioni esotermiche, inclusa l'autoaccensione delle polveri .....	» 337
6.5	Gli apparecchi installati precedentemente al 30 giugno 2003 .....	» 338
6.5.1	Le sorgenti di accensione e il D.Lgs. n. 81/2008 .....	» 340
6.6	Esempi applicativi ed approfondimenti .....	» 346
6.6.1	Il contenuto della marcatura CE-ATEX .....	» 346
6.6.2	Il contenuto delle istruzioni per l'uso .....	» 346
6.6.3	Il contenuto della dichiarazione di conformità .....	» 347
6.6.4	Esempio di marcatura CE .....	» 348
6.6.5	Marcatura supplementare specifica .....	» 348
6.6.6	La procedura CE-ATEX degli apparecchi non elettrici .....	» 350
6.6.7	Analisi funzionale di un ciclo di verniciatura a spruzzo in cabina .....	» 351
6.6.8	Esempio di compilazione del modulo di registrazione del rischio di accensione .....	» 352

6.6.9	Valutazione dell'efficacia di accensione di un ventilatore in caso di guasto	» p. 358
6.6.10	Il rischio di accensione in caso di surriscaldamento di una pompa centrifuga	» 359
6.6.11	I DPI ed il rischio di innesco elettrostatico	» 359
6.6.12	Calcolo del caricamento elettrostatico per strofinio	» 360
6.6.13	L'applicazione della direttiva 94/9/CE a silos e filtri	» 360

## CAPITOLO 7

### LA PROTEZIONE E L'ISOLAMENTO CONTRO LE ESPLOSIONI

7.1	La sicurezza intrinseca ed i sistemi di protezione	» 364
7.1.1	La sicurezza intrinseca nell'industria	» 364
7.1.2	I sistemi di protezione	» 367
7.2	L'adozione delle misure di protezione ed isolamento	» 368
7.3	La progettazione resistente all'esplosione	» 370
7.3.1	La progettazione delle strutture EPR/EPSR	» 378
7.3.2	I materiali utilizzabili e le loro resistenze di progetto	» 378
7.3.3	Analisi e progetto delle strutture	» 379
7.4	Lo sfogo dell'esplosione	» 386
7.4.1	Sistemi per lo sfogo delle esplosioni	» 389
7.4.2	Calcolo delle superfici di minima resistenza in contenimenti isolati	» 394
7.4.3	Marcatura e manutenzione	» 401
7.5	La soppressione dell'esplosione	» 402
7.5.1	Rilevatori di pressione	» 404
7.5.2	Soppressori pressurizzati HRD	» 405
7.5.3	Agenti estinguenti	» 406
7.5.4	Centraline di monitoraggio e controllo	» 408
7.5.5	Calcolo dei sistemi di soppressione HRD	» 408
7.5.6	I limiti di applicazione dei sistemi di soppressione HRD	» 410
7.5.7	Marcatura e manutenzione	» 411
7.6	I sistemi di isolamento contro le esplosioni	» 411
7.6.1	Sensori di rilevazione	» 412
7.6.2	Dispositivi di isolamento	» 412
7.6.3	Centraline di monitoraggio e controllo	» 414
7.6.4	Sistemi di rilevazione di braci e scintille	» 414
7.7	I sistemi di protezione installati precedentemente al 30 giugno 2003	» 417
7.8	L'emergenza e l'evacuazione in caso di esplosione	» 419
7.8.1	Le misure di protezione ed il D.Lgs. n. 81/2008	» 421
7.9	Esempi applicativi ed approfondimenti	» 425
7.9.1	Tipologia di sollecitazione in un contenimento protetto con venting	» 425
7.9.2	Calcolo della pressione ridotta in un ciclone depolveratore	» 426
7.9.3	Test di validazione dell'eq. 7.18 relativa alla deformazione plastica di una membrana di forma rettangolare (IChemE, 2000)	» 428
7.9.4	Fattori che influenzano il dimensionamento dei sistemi di venting	» 429
7.9.5	Calcolo delle superfici di venting in un silos di stoccaggio	» 431
7.9.6	Valutazione economica nell'adozione di un sistema di sfogo dell'esplosione in un silos d'acciaio	» 437
7.9.7	Esempi di calcolo del rapporto L/D	» 438
7.9.8	Esempi di calcolo di un sistema di protezione HRD	» 442
7.9.9	Esempio di protezione ed isolamento contro l'esplosione	» 442
7.9.10	Esempi di misure di prevenzione e protezione da adottare in impianti industriali	» 443

## CAPITOLO 8

### GLI EFFETTI PREVEDIBILI DELLE ESPLOSIONI

8.1	L'esposizione agli effetti dell'esplosione	» 450
-----	--	-------

8.1.1	Gli effetti del Flash Fire sulle persone .....	p. 450
8.1.2	Gli effetti di una VCE sulle persone .....	» 452
8.1.3	I limiti di esposizione agli effetti dell'esplosione .....	» 452
8.2	La valutazione quantitativa degli effetti dell'esplosione .....	» 455
8.2.1	Il metodo del Tritolo Equivalente (TNT <sub>eq</sub> ) .....	» 458
8.2.2	Il metodo TNO-Multienergy modificato.....	» 460
8.2.3	Il metodo CEI 31-35 modificato .....	» 462
8.2.4	Il metodo NFPA 68 .....	» 463
8.2.5	Il metodo INERIS modificato.....	» 464
8.3	Esempi applicativi ed approfondimenti .....	» 465
8.3.1	Applicazione del metodo TNT <sub>eq</sub> .....	» 465
8.3.2	Applicazione del metodo TNO-Multienergy modificato.....	» 466
8.3.3	Applicazione della funzione di PROBIT .....	» 466

## CAPITOLO 9

### LA VALUTAZIONE DEI RISCHI E IL DOCUMENTO SULLA PROTEZIONE CONTRO L'ESPLOSIONE

9.1	La valutazione del rischio di esplosione .....	» 470
9.1.1	Parte 1: Sicurezza dell'impianto, del processo, delle sostanze e delle possibili interazioni .....	» 470
9.1.2	Parte 2: Valutazione della mansione esposta al rischio di esplosione .....	» 472
9.2	Il documento sulla protezione contro le esplosioni .....	» 478
9.3	Informazione e formazione dei lavoratori .....	» 479
9.3.1	L'art. 294-bis, D.Lgs. n. 81/2008 .....	» 479
9.4	L'installazione, i controlli, le verifiche e la manutenzione degli apparecchi e dei sistemi di protezione .....	» 481
9.4.1	Il controllo iniziale degli impianti .....	» 482
9.4.2	Controlli degli impianti .....	» 484
9.4.3	La manutenzione .....	» 488
9.4.4	Le verifiche .....	» 490
9.4.5	Il coordinamento e la gestione delle modifiche .....	» 490

## CAPITOLO 10

### LA LEGISLAZIONE ATEX

10.1	Testo e sanzioni del Titolo XI, D.Lgs. n. 81/2008 .....	» 496
10.2	Allegati del Titolo XI, D.Lgs. n. 81/2008 .....	» 502

### ALLEGATI

Allegato A	– Analisi statistiche .....	» 507
Allegato B	– Calcolo della tensione di vapore .....	» 515
Allegato C	– Punti della distribuzione t-Student .....	» 516
Allegato D	– Principali eventi incidentali che possono essere causa o effetto di un'esplosione .....	» 517
Allegato E	– Punti di infiammabilità di alcune miscele acquose .....	» 518
Allegato F	– Sostanze con tendenza al riscaldamento spontaneo.....	» 522
Allegato G	– Classificazione sostanze secondo lo standard IP 15 .....	» 523
<i>Bibliografia</i> .....		» 525
<i>Contenuti del Cd-Rom</i> .....		» 531

## INTRODUZIONE

La nuova edizione del manuale *Rischio Atmosfere Esplosive* è rivolta a tutte le professionalità coinvolte nel processo di valutazione del rischio di esplosione e di individuazione delle misure di prevenzione e protezione. Si fa riferimento, in particolare al responsabile del servizio di prevenzione e protezione, al consulente tecnico in materia di sicurezza e salute sul lavoro, al progettista di impianti di processo, al tecnico di prevenzione incendi ed agli organismi statali di vigilanza e controllo (ispettori e personale tecnico di ASL e VV.F.).

Il testo propone un approccio multidisciplinare comprendente, oltre all'aspetto chimico-fisico di questa particolare forma di combustione, anche la conseguente valutazione dei rischi.

Nella presente seconda edizione, il volume è stato integralmente revisionato ed aggiornato, alla luce dei profondi cambiamenti avvenuti, sia con riferimento alle novità introdotte nella normativa tecnica attualmente in vigore, sia in seguito all'introduzione del D.Lgs. n. 106/2009. Tali modifiche hanno avuto profonde ricadute applicative e hanno fatto emergere sia negli addetti ai lavori, sia nei lettori della precedente edizione, la necessità di affrontare alcune nuove problematiche tecniche.

Chi si occupa di analizzare e valutare i rischi di esplosione presenti in un luogo di lavoro deve possedere, oltre alle basi della legislazione ATEX e della normativa tecnica, anche (e soprattutto) competenze significative in materia di chimica, fisica ed impianti.

Si è così deciso di ampliare e approfondire alcuni argomenti specifici, con l'obiettivo di fornire ulteriori strumenti per l'analisi, la valutazione del rischio e la progettazione delle misure tecniche ed organizzative di prevenzione e protezione.

La contestualizzazione applicativa, proposta con nuovi esercizi ed approfondimenti al termine di ogni Capitolo, analizza gli aspetti di chimica-fisica posti a fondamento delle dinamiche dell'esplosione accidentale, rendendo evitabili la maggior parte degli errori di sopra/sottovalutazione dei fenomeni, purtroppo ancora molto frequenti nel campo delle atmosfere esplosive. In tutti i Capitoli, la parte degli esempi applicativi ha subito un sostanziale arricchimento con numerosi casi progettuali illustrati e risolti.

La struttura dei contenuti segue, anche in questa nuova edizione, la filosofia applicativa del Titolo XI, D.Lgs. n. 81/2008; pertanto nel Capitolo 1, che descrive alcuni incidenti accaduti nel recente passato, sono stati introdotti ulteriori casi di esplosione accidentale, ampliando, in particolare, i contenuti tecnici delle grandi esplosioni purtroppo accadute anche in Italia negli ultimi anni.

Il Capitolo 2 è stato interessato da una sostanziale revisione concentrata sugli aspetti inerenti l'innescò delle ATEX, i nuovi criteri di etichettatura previsti dal Regolamento CLP per liquidi e gas infiammabili, le caratteristiche di resistività dei liquidi infiammabili, le incompatibilità tra sostanze pericolose, nonché i criteri di selezione dei metodi per l'esecuzione di test su polveri combustibili.

Nel Capitolo 3 si affina maggiormente il dettaglio di descrizione degli scenari incidentali di riferimento, attraverso lo studio e la costruzione di alberi di eventi.

Il Capitolo 4, relativo alla classificazione delle zone a rischio di esplosione (gas, vapori, nebbie e polveri combustibili), è la parte del manuale, unitamente al Capitolo 7, cui sono state apportate le modifiche più consistenti, in particolare a seguito dell'intro-

duzione delle nuove norme e Linee Guida di classificazione. Si citano, per esempio, i maggiori dettagli di descrizione relativi ai rilasci di nebbie, spray e gas liquefatti.

Nel Capitolo 4 si propongono, inoltre, innovativi criteri di classificazione elaborati a partire da simulazioni realizzate con il Software TNO-Effects. Tali risultati vengono altresì riportati nel Cd-Rom allegato al testo.

Il Capitolo 5, che esamina le principali strategie di prevenzione delle atmosfere esplosive, rispetto alla precedente edizione, introduce i criteri di progettazione dei sistemi di inertizzazione di contenimenti per polveri, con utili esempi applicativi e di contestualizzazione.

Il Capitolo 6, incentrato sull'analisi delle principali sorgenti di accensione, è stato integrato principalmente nella parte tecnica, relativamente alle modalità di caricamento elettrostatico e, nella parte gestionale, in riferimento alle procedure per l'esecuzione di lavori di manutenzione in zone a rischio di esplosione.

Il Capitolo 7 ha subito un rifacimento integrale introducendo i parametri per il dimensionamento e la progettazione dei sistemi di sfogo, soppressione ed isolamento dalle esplosioni.

Il Capitolo 8, relativo agli effetti prevedibili delle esplosioni, è stato ampliato ed arricchito, mentre nel Capitolo 9 si è meglio precisata la procedura di analisi e valutazione del rischio di esplosione, nonché la leggibilità della relativa matrice di valutazione.

Il Capitolo 10 conclude il volume con l'illustrazione e l'analisi degli aspetti legislativi che regolano la materia.

Un ulteriore valore aggiunto di questa seconda edizione è il Cd-Rom allegato al testo che contiene i file, in formato Excel, di classificazione per casi tipici, calcolati (con TNO-Effects) a partire da scenari di rilascio turbolento, formazione di pozze e rilascio di gas liquefatto. Nel Cd-Rom si trovano, inoltre, le Linee Guida applicative alle Direttive 1999/92/CE e 94/9/CE, aggiornate alla 4<sup>a</sup> revisione di settembre 2012. Di quest'ultima Direttiva sono riportati anche gli *Useful Facts*.

Infine, l'Autore intende ringraziare il TNO<sup>1</sup> olandese per avere concesso i propri software (*Effects* e *Riskcurves*) particolarmente utili per gli approfondimenti sviluppati nel presente manuale.

*Ing. Marzio Marigo*

## **AUTORE**

### **MARZIO MARIGO**

Ingegnere meccanico, è autore del primo testo italiano sulla deflagrazione delle polveri e le direttive ATEX. Opera in ambito nazionale in aziende convenzionali e a rischio di incidente rilevante (valutazione del rischio ATEX, progettazione dei sistemi di protezione contro le esplosioni). È docente dell'argomento in corsi di perfezionamento universitario ed ordini professionali nonché, nell'ambito dei corsi per RSPP previsti dal D.Lgs. n. 195/2003, per università, associazioni imprenditoriali ed enti di formazione.

<sup>1</sup> TNO: The Netherlands Organization of Applied Scientific Research.

# CAPITOLO 1

## IL FENOMENO DELL'ESPLOSIONE NELL'INDUSTRIA

**SOMMARIO:** 1.1 Le esplosioni nel luogo di lavoro – 1.2 Le esplosioni delle polveri combustibili – 1.3 Le esplosioni di gas, vapori e nebbie infiammabili – 1.4 Asfissia e prevenzione dell'ATEX – 1.5 Case History – 1.6 Conclusioni

*ABSTRACT:* Nel capitolo vengono descritte le principali statistiche connesse al fenomeno dell'esplosione accidentale nell'industria. Sono altresì riportati alcuni gravi ed emblematici incidenti accaduti nel recente passato, per contestualizzare l'importanza della valutazione del rischio di esplosione e l'individuazione delle misure di prevenzione e protezione.

«Il giorno 14 di Dicembre 1785, circa alle sei di sera, dal Signor Giacomelli, Mastro Panettiere di questa città, vicino alla chiesa dello Spirito Santo, si verificò un'esplosione che abbatté i telai e i vetri della sua bottega che davano sulla strada: il rumore fu forte come quello di un grosso petardo e si fece sentire ad una distanza considerevole. Al momento dell'esplosione fu vista nella bottega una fiammata molto viva che durò soltanto pochi secondi. Si riconobbe subito che la fiammata era partita dal retrobottega, dove si trovava il garzone che rimescolava della farina alla luce di una lampada. Il garzone ne ebbe il viso e le braccia scottate, i suoi capelli furono bruciati e gli ci vollero più di 15 giorni per guarire dalle bruciature. Egli non fu l'unica vittima di questo evento.»

Conte Carlo Ludovico Morozzo di Bianzè  
Perito incaricato dalla Reale Accademia delle Scienze di Torino<sup>1</sup>

Nella maggioranza dei contesti manifatturieri la presenza di gas, vapori infiammabili e polveri combustibili, all'interno dei cicli industriali, possiede precise ragioni tecniche legate ad esigenze di produzione. Inoltre tale produzione genera, oltre al *prodotto* finito (es. produzione energetica, semilavorati, ecc.), anche sostanze di rifiuto in forma liquida, gassosa o solida pulverulenta che necessitano di impianti di trattamento a loro dedicati. Queste modalità di esercizio risultano presenti in molte filiere di produzione, sia con rischi di tipo convenzionale sia con possibilità di incidente rilevante (cfr. D.Lgs. n. 334/1999 e successive modifiche).

La presenza di queste sostanze pericolose in un processo industriale viene associata almeno a tre scenari di incidente con effetti sulla sicurezza dei lavoratori:

- incendio;
- esplosione;
- rilasci tossici.

<sup>1</sup> Morozzo di Bianzè, Carlo Ludovico, *Relazione su una Violenta Detonazione*, Politecnico di Torino Editore, Torino, 1996.

La prevalenza di un incidente rispetto ad un altro è funzione sia del tipo di ciclo produttivo realizzato sia della quantità di sostanze coinvolte nel possibile scenario. Per esempio, l'industria chimica di processo può risultare soggetta a tutte e tre le tipologie di incidente secondo le modalità indicate in Tabella 1.1.

**Tabella 1.1 - Tre tipi di incidente nell'industria chimica**

TIPO DI INCIDENTE	PROBABILITÀ TIPICA DI ACCADIMENTO	DANNO CONNESSO ALLA SICUREZZA DEI LAVORATORI	POTENZIALE DI PERDITA ECONOMICA
Incendio	Alta	Basso	Medio
Esplosione	Media	Medio	Alto
Rilascio tossico	Bassa	Alto	Basso

Fonte: Crowl *et al.*, 2002

Si rileva altresì che, nella maggioranza delle aziende “non chimiche” a rischio convenzionale (es. metalmeccanica, legno, alimentare), la possibilità di un rilascio tossico risulta limitata<sup>2</sup>.

## 1.1 LE ESPLOSIONI NEL LUOGO DI LAVORO

La maggioranza delle esplosioni che hanno luogo nelle filiere industriali del territorio nazionale risultano raramente estese a parti rilevanti di stabilimento, pur con eccezioni significative. Tuttavia, vista la frequente presenza di personale dipendente operante a ridosso del fronte di fiamma eventualmente generato, gli effetti del fenomeno non sono per questo meno significativi. Lesioni gravissime si possono generare, oltre che da esplosioni che rilascino grandi quantità di energia, anche da Flash Fire originati da semplici operazioni di travaso di liquidi infiammabili o polveri combustibili<sup>3</sup>.

I casi di esplosione più severi determinano, oltre a danni alle persone, anche perdite economiche significative causate da lesioni e/o cedimenti strutturali di impianti, attrezzature e luoghi di lavoro. Tali danni sono determinati dalle sovrappressioni generate dall'esplosione, dal passaggio del fronte di fiamma oppure dalla proiezione di frammenti. Descrizioni approfondite di esplosioni avvenute negli ultimi 30 anni in Occidente (Italia, Europa, Stati Uniti) sono presenti nei seguenti database di libero accesso:

- database INFOR.MO dell'INAIL nel quale è presente una raccolta qualitativa dei casi di infortunio contenuti nell'archivio del sistema di sorveglianza degli infortuni mortali, tra i quali è selezionabile come causa prima l'esplosione;
- database ARIA (Analysis, Research and Information on Accidents) del Ministero dell'Ambiente Francese nel quale sono raccolti report dettagliati di eventi incidentali avvenuti in Francia ed Europa in aziende a rischio di incidente rilevante;

<sup>2</sup> È tuttavia possibile che incendi di vaste dimensioni che coinvolgano, in particolare, materiali plastici, possano causare rilevanti impatti interni ed esterni (anche psicologici).

Per esempio, si consulti la relazione tecnica elaborata dall'ARPA, realizzata in conseguenza ad un incendio di vaste dimensioni che ha coinvolto una grande azienda di elettrodomestici: [http://www.arpa.veneto.it/arpav/chi-e-arpav/file-e-allegati/rischio-industriale/Relazione\\_tecnica\\_DeLonghi\\_24-04-2007.pdf](http://www.arpa.veneto.it/arpav/chi-e-arpav/file-e-allegati/rischio-industriale/Relazione_tecnica_DeLonghi_24-04-2007.pdf).

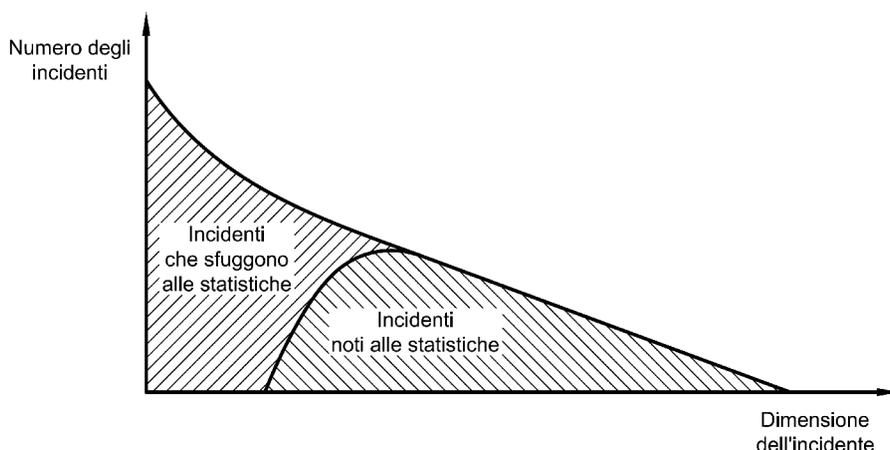
<sup>3</sup> A questo proposito si rileva che l'art. 294-bis, D.Lgs. n. 81/2008 prevede che una formazione particolare venga erogata agli operatori addetti a tali tipologie di attività.

- database MARS (Major Accidents Reporting System) che annota gli incidenti avvenuti in ambito europeo in aziende a rischio di incidente rilevante;
- rapporti completi di indagine sviluppati dall'U.S. Chemical Safety and Hazard Investigation Board (CSB).

Descrizioni e statistiche di incidente sono inoltre reperibili presso i database MHIDAS dell'HSE britannico e FACTS realizzato dal TNO olandese diffusamente utilizzati nell'ambito delle valutazioni di rischio in aziende soggette a Direttiva Seveso.

L'estensione e l'accuratezza delle statistiche legate alle esplosioni e agli infortuni ad esse collegate è variabile e dipende dall'entità dell'incidente stesso. Mentre infatti è poco probabile che incidenti quali quelli avvenuti in ThyssenKrupp o in Umbria Olii passino inosservati, può accadere che eventi verificatisi senza causare danni rilevanti o infortuni non siano correttamente annotati, come rappresentato qualitativamente in Figura 1.1.

**Figura 1.1 - Indicazione qualitativa tra gli incidenti rilevabili e non rilevabili nelle statistiche**



Pur a fronte di tali difficoltà, si riporta un riepilogo delle principali esplosioni industriali avvenute nel trentennio 1971-2001 in Europa e negli Stati Uniti (vedi Tabella 1.2).

**Tabella 1.2 - Esempi illustrativi di esplosioni dovute a gas, vapori e polveri**

ANNO	LUOGO	SOSTANZE COINVOLTE	IMPIANTO	MORTI (M) FERITI (F)
1972	Norvegia	Polvere di alluminio	Miscelatori	5m/2f
1974	Flixborough, UK	Cicloesano	Impianto di caprolattame	28m/104f
1975	Antwerp, Belgio	Etilene	Impianto di polietilene	6m/13f
1975	Beek, Olanda	Propilene	Impianto petrolchimico	14m/-
1977	Galvesto, TX, USA	Polvere di cereali	Silos di cereali	15m/-

(segue)

(segue da p. 3)

ANNO	LUOGO	SOSTANZE COINVOLTE	IMPIANTO	MORTI (M) FERITI (F)
1977	Westego, Lousiana, USA	Polvere di cereali	Silos di cereali	36m/10f
1978	Texas City, TX, USA	LPG	Serbatoi di stoccaggio	7m/10f
1981	Corpus Christi, TX, USA	Polvere di cereali	Elevatori a tazze	9m/30f
1984	Romeoville, IL, USA	Propano	Colonne di assorbimento	15m/22f
1985	Priolo, Italia	HCs	Produzione etilene	1m/2f
1987	Grange-Mouth, UK	Idrogeno	Reattori di separazione	-/-
1988	Norco, LA, USA	C3HCs	Cracking catalitico	7m/28f
1988	Piper Alpha, Mare del Nord	Gas, petrolio	Piattaforma di estrazione	167m/-
1989	Antwerp, Belgio	Ossido di etilene	Colonne di distillazione	-/-
1989	Pasadena, TX, USA	Isobutano	Impianto di polietilene	23m/103f
1993	Monaco, Germania	Perossidi	Raffinazione di perossidi	2m/-
1997	Blaye, Francia	Polvere di cereali	Stoccaggio cereali	11m/-
2001	Tolosa, Francia	Ammoniaca, fertilizzanti, metanolo	Produzione fertilizzanti chimici	29m/2400f

Fonte: Abbasi *et al.*, 2006; Pekalski *et al.*, 2005

Questo riepilogo evidenzia un primo aspetto importante che differenzia le esplosioni causate da gas e vapori infiammabili rispetto a quanto accade con le polveri combustibili. Infatti, se le esplosioni di gas e vapori avvengono prevalentemente come conseguenza del rilascio di tali sostanze non combuste nell'ambiente e nel loro successivo innesco, le esplosioni che coinvolgono le polveri combustibili hanno tipicamente origine dall'interno di un contenimento e, solo successivamente all'innesco, si propagano all'ambiente circostante (e alla parte rimanente dell'impianto). Pur se tali aspetti saranno approfonditi in seguito, già fin d'ora si può quindi anticipare che le strategie di prevenzione e protezione contro il rischio di esplosione potranno differire a causa di questa prima, importante, constatazione.

Un secondo aspetto da sottolineare è collegato alla pericolosità *percepita* della sostanza infiammabile/combustibile. Mentre risulta evidente che sia i gas sia i vapori infiammabili hanno la potenzialità di causare un'esplosione, così non è per le polveri combustibili, la cui rischiosità esplosiva risulta spesso scarsamente considerata, soprattutto quando tali sostanze sono presenti ordinariamente negli ambienti di vita (es. zucchero, cereali, legno, ecc.).

Tra le più significative esplosioni industriali avvenute negli ultimi cinque anni nel nostro Paese si elencano le seguenti:

- anno 2006: Umbria Olii di Campello sul Clitunno (PG). Oleificio. Esplosione di serbatoi di stoccaggio olio che causa quattro morti;
- anno 2007: Molino Cordero a Fossano (CN). Mulino per cereali. Esplosione di silos di stoccaggio cereali che causa cinque morti;

- anno 2007: Acciaierie ThyssenKrupp a Torino. Produzione acciai speciali. Esplosione che avviene nel reparto trattamenti termici e che causa sette morti.

Questi accadimenti, pur essendo di assoluto rilievo sia per il carico di dolore che hanno causato sia per il loro risalto mediatico, non sono tuttavia realmente rappresentativi dell'insieme degli eventi incidentali causati da esplosioni nei luoghi di lavoro. A questo fine si riportano (Tabella 1.3) gli infortuni sul lavoro avvenuti nell'anno 2006 e indennizzati a tutto il 30/04/2008, analizzati dall'INAIL per *deviazione e agente materiale della deviazione*. Da tali dati emerge che gli infortuni attribuibili alla deviazione *elettricità, esplosione ed incendio* è causa di circa lo 0,4% degli infortuni nel settore industria e servizi.

Il fenomeno dell'esplosione manifesta, pertanto, una limitata frequenza di infortuni rispetto a tutte le altre ipotesi di incidente. Tuttavia, un'analisi approfondita sviluppata attraverso la banca dati interattiva dell'ISPESL-INAIL<sup>4</sup> e basata su informazioni fornite dall'INAIL (anni 2000-2006) relative alle gestione *Industria, Agricoltura e Conto Stato* (di cui si riporta un estratto in Allegato A) evidenzia che l'infortunio derivante da un evento esplosivo risulta statisticamente mortale una volta ogni (circa) 55 incidenti, secondo solo all'elettrocuzione (1 morto ogni 46 incidenti). Tale mortalità risulta molto più frequente della media complessiva degli infortuni, dato che risulta mortale, in media, un infortunio ogni (circa) 500.

L'esplosione è pertanto un evento infortunistico il quale, pur presentandosi con una limitata frequenza nei luoghi di lavoro, manifesta un'efficacia notevole nel determinare gravi lesioni ai lavoratori esposti.

Emerge inoltre che il settore delle *costruzioni di macchine* ed il settore delle *costruzioni e impianti* sono le attività INAIL del settore industria che espongono maggiormente i lavoratori al rischio infortunio derivante da un'esplosione.

## 1.2 LE ESPLOSIONI DELLE POLVERI COMBUSTIBILI

Nel settore delle esplosioni delle polveri combustibili, si rileva una discreta presenza di ricerche che hanno approfondito statisticamente il fenomeno (Stati Uniti, Germania e Gran Bretagna). Si ricorda, tuttavia, che queste statistiche riepilogano solo una piccola frazione di tutte le esplosioni dovute a polveri a causa, anche in questo caso, dell'assenza di un sistema centralizzato di raccolta ed analisi dei dati. In conseguenza di ciò gli indici di seguito riportati non potranno essere utilizzati per conclusioni generalizzate. Si presenta in Tabella 1.4 un riepilogo e confronto tra le principali statistiche dei materiali in polvere coinvolti nelle esplosioni.

Una lettura complessiva dei numeri fa emergere una situazione di particolare pericolosità nei settori del legno/carta ed alimentare. Il settore dei metalli (leghe leggere) risulta comunque presente con un discreto numero di eventi incidentali mentre nel settore farmaceutico, pur possedendo un rischio potenziale significativo, si manifesta una limitata presenza di accadimenti. Tale limitazione del fenomeno è dovuta alla presenza di misure di controllo tecnico ed organizzativo maggiormente sviluppate rispetto ad altre filiere di produzione.

<sup>4</sup> Si veda il sito <http://www.ispesl.it/dwh/dwh.asp>.

**Tabella 1.3 - Infortuni sul lavoro avvenuti nell'anno 2006 e indennizzati a tutto il 30 aprile 2008 per deviazione/agente materiale della deviazione. Settore industria e servizi**

AGENTE MATERIALE DELLA DEVIAZIONE	DEVIAZIONE										NON CODIFICATO NON DETERMINATO	TOTALE
	DA ELETTRICITÀ, ESPLOSIONE, INCENDIO	DA FUORIUSCITA	DA ROTTURA	DA PERDITA DI CONTROLLO	DA CADUTA DI PERSONA	DA MOVIMENTI	DA SORPRESA, VIOLENZA					
Strutture edili e superfici	526	1423	10032	8812	79868	33712	494			1126	135993	
Dispositivi di distribuzione	69	175	1250	1926	314	1544	2			88	5368	
Motori	303	110	882	1658	229	1277	3			36	4498	
Utensili	209	773	5156	32201	1096	9688	120			605	49848	
Macchine e attrezzature	125	275	1282	5110	1056	4043	33			157	12081	
Dispositivi di convogliamento	92	217	3636	10176	2682	9877	152			214	27046	
Veicoli terrestri	58	102	1935	75523	8753	10512	1895			612	99390	
Altri veicoli	14	16	126	667	746	618	35			47	2269	
Materiali	331	5300	22830	29203	3335	31806	235			896	93936	
Sostanze	120	3815	225	296	346	264	24			99	5189	
Attrezzature particolari	91	92	2372	2894	1309	5804	111			114	12787	
Organismi viventi	20	77	732	1109	821	6971	6739			149	16618	
Rifiuti	4	101	169	242	103	476	6			26	1127	
Fenomeni fisici	190	124	66	131	245	130	24			66	976	
Non codificato	385	1112	5203	19270	10520	41148	2957			19907	100502	
Non determinato	2537	13712	55896	189218	111423	157870	12830			24142	567628	
<b>% sul totale</b>	<b>0,4</b>	<b>2,4</b>	<b>9,8</b>	<b>33,3</b>	<b>19,6</b>	<b>27,8</b>	<b>2,3</b>			<b>4,3</b>	<b>100</b>	

Fonte: Rapporto Annuale INAIL, 2007

**Tabella 1.4 - Materiali coinvolti nelle esplosioni di polveri**

MATERIALI	USA (1985-1995) (FM GLOBAL)		UK (1979-1988) (HSE)		GERMANIA (1965-1980) (BECK, 1982)	
	NUMERO DI INCIDENTI	%	NUMERO DI INCIDENTI	%	NUMERO DI INCIDENTI	%
Legno/Carta	56	37	69	23	120	34
Carbone	27	18	24	8	33	9
Metalli	19	13	55	18	47	13
Plastica	8	5	10	3	46	13
Alimentare	ND*	ND*	94	31	88	25
Farmaceutici	ND*	ND*	27	9	ND*	ND*
Altro/sconosciuto	4	27	24	8	23	6
Totale	150	100	303	100	357	100

\*ND: Non disponibile  
Fonte: AICHE, 2005

D'altra parte, gli impianti di processo più frequentemente coinvolti in incidenti sono quelli indicati in Tabella 1.5. Le statistiche evidenziano che sia negli Stati Uniti che in Gran Bretagna le tipologie impiantistiche maggiormente soggette al rischio di esplosione sono rappresentate dai *sistemi di deposito e separazione* (filtri, elettrofiltri, cicloni, ecc.). Tale dato è spiegabile per almeno tre ragioni:

1. i sistemi di separazione diffusi in tutti settori industriali;
2. in essi si concentrano buona parte delle polveri sottili del processo. Polveri che, possedendo basse energie di accensione, risultano facilmente incendiabili;
3. le forme geometriche che tipicamente possiedono, e gli spessori ed i materiali con i quali sono realizzati, costituiscono la parte dell'impianto più debole strutturalmente.

Tuttavia, mentre in USA sono i sistemi di separazione delle polveri gli impianti in cui si concentrano la maggioranza degli eventi, in Gran Bretagna la situazione si presenta più sfumata con una distribuzione statistica delle esplosioni uniforme (ad eccezione del caso relativo ai *Dust Mixer*). In Germania le statistiche riportano una situazione molto simile a quella inglese, con una prevalenza di esplosioni avvenute in silos e bunker.

**Tabella 1.5 - Apparecchi coinvolti nelle esplosioni di polveri**

APPARECCHI	USA (1985-1995) (FM GLOBAL)		UK (1979-1988) (HSE)		GERMANIA (1965-1980) (BECK, 1982)	
	NUMERO DI INCIDENTI	%	NUMERO DI INCIDENTI	%	NUMERO DI INCIDENTI	%
Sistemi di deposito e separazione delle polveri	156	42	55	18	73	17
Mulini	35	9	51	17	56	13
Silos e bunker	27	7	19	6	86	20
Sistemi di trasporto	32	9	33	11	43	10
Essiccatoi	22	6	43	14	34	8
Miscelatori	> 12	> 3	7	2	20	5

(segue)

(segue da p. 7)

APPARECCHI	USA (1985-1995) (FM GLOBAL)		UK (1979-1988) (HSE)		GERMANIA (1965-1980) (BECK, 1982)	
	NUMERO DI INCIDENTI	%	NUMERO DI INCIDENTI	%	NUMERO DI INCIDENTI	%
Altro/sconosciuto	84	23	95	31	114	27
Totale	372	100	303	100	426	100

Fonte: AICHE, 2005

In generale, un'esplosione primaria (e le relative esplosioni secondarie) causano con molta frequenza un successivo incendio che coinvolge la frazione significativa delle polveri combustibili che non hanno preso parte all'esplosione stessa. Questo fenomeno è presente in circa il 70% del totale dei casi di esplosione (Thornberg, 2001) ed avviene con maggiore frequenza nei processi che coinvolgono polveri organiche.

Concentriamo ora l'attenzione sul rischio infortunistico derivante dall'esplosione delle polveri. Le aziende maggiormente esposte da questo punto di vista risultano quelle appartenenti alla *filiere alimentare* nelle quali si concentrano circa il 32% dei decessi complessivi (Tabella 1.6), mentre più uniforme risulta la distribuzione dei feriti nei vari ambiti industriali (ad eccezione dell'industria del carbone e carta, che possiede presenze limitate di entrambi i fenomeni).

**Tabella 1.6 - Esplosioni da polvere nella Repubblica Federale Tedesca tra il 1965 ed il 1980**

TIPO DI ATTIVITÀ	ESPLOSIONI (%)	MORTI		FERITI	
		%	PER ESPLOSIONE	%	PER ESPLOSIONE
Legno	31,6	11,7	0,11	25,0	1,10
Alimentare	24,7	36,8	0,43	26,0	1,44
Metalli	13,2	17,5	0,38	18,5	1,94
Plastica	12,9	17,5	0,39	20,0	2,13
Carbone	9,2	6,8	0,21	8,0	1,18
Carta	2,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Altro	6,4	9,7	0,43	2,5	0,56

Fonte: Beck, 1982

Spostandoci ora agli eventi incidentali rapportati alla singola esplosione, emerge anche in questo caso l'elevata letalità delle esplosioni che avvengono nel settore alimentare, probabilmente a causa della violenza intrinseca del fenomeno in questo ambito. Si rileva, tuttavia, che il maggior numero di feriti per esplosione avviene nel settore della plastica e dei metalli.

Un ultimo particolare che riteniamo importante sottolineare è relativo alle sorgenti di accensione che con più frequenza innescano le ATEX dovute a polveri combustibili (Tabella 1.7). Si rileva la preponderanza delle *scintille meccaniche* nei casi dell'industria del legno, alimentare e metalli. Il *caricamento elettrostatico* contribuisce con una certa significatività alle esplosioni nel settore della plastica, mentre il carbone trova causa di innesco frequente nelle *combustioni senza fiamma*.

**Tabella 1.7 - Esplosioni da polveri nella Repubblica Federale Tedesca (1965-1985). Relazione tra le sorgenti di ignizione e tipologie industriali**

TIPO DI FONTI DI ACCENSIONE	ESPLOSIONI TOTALI (%)	LEGNO (%)	CARBONE (%)	ALIMENTARE (%)	PLASTICA (%)	METALLI (%)
Scintille meccaniche	26,2	26,6	5,1	22,8	21,2	56,1
Combustione senza fiamma	11,3	19,5	20,5	5,7	9,6	0,0
Attrito meccanico	9,0	9,4	5,1	12,4	9,6	3,5
Scariche elettrostatiche	8,7	2,3	0,0	6,7	34,6	5,3
Incendio	7,8	14,8	12,8	4,8	2,0	2,0
Autocombustione	4,9	3,1	15,4	6,7	2,0	3,5
Superfici calde	4,9	5,5	10,3	2,8	3,9	3,5
Lavori a fuoco	4,9	2,3	2,6	12,4	2,0	2,0
Macchinari elettrici	2,8	0,0	2,6	5,7	2,0	0,0
Sconosciuto	16,0	16,5*	25,6*	20,0*	13,1*	24,1*
Altro	3,5	-	-	-	-	-

\* Include "Altro"

Fonte: Jeske *et al.*, 1989

### 1.3 LE ESPLOSIONI DI GAS, VAPORI E NEBBIE INFIAMMABILI

Varie possono essere le sorgenti di accensione che determinano un'esplosione di gas e vapori infiammabili ma, anche in questo caso, i dati e la distribuzione delle sorgenti di innesco risultano studiate parzialmente. Un approfondimento che ha cercato di dettagliare le cause e gli effetti delle esplosioni è stato condotto dall'HSE<sup>5</sup> britannico, attraverso uno studio prospettico, e ha coperto un anno di incidenti avvenuti in Gran Bretagna nel periodo che va dall'aprile 1987 al marzo 1988. Una prima serie di dati riepiloga gli eventi incidentali che hanno avuto origine all'interno degli impianti di processo (Tabella 1.8).

Negli impianti si rileva una prevalenza di eventi innescati da cause non note. Un aspetto sicuramente degno di rilevanza è rappresentato dal fatto che il totale degli infortuni è causato da inneschi legati a *fiamme/lavori a fuoco* e *superfici calde*. Queste forme di innesco risultano frequentemente attribuibili a lavori di manutenzione.

Un deciso incremento degli infortuni si verifica nel caso di impianti ed attività con superfici aperte (Tabella 1.9).

Nel passaggio da operazioni su impianti chiusi a quelle ad impianti aperti si rileva un incremento del 60% degli incidenti (da 86 a 139 eventi). Tale aspetto è probabilmente attribuibile sia alla contemporaneità tra lo sviluppo dell'esplosione e la presenza nelle vicinanze del lavoratore (dovuta prevalentemente ad esigenze di processo e/o lavorazione) sia alla maggiore probabilità che, con impianti aperti, le ATEX contenute possano venire più facilmente in contatto con le sorgenti di accensione. Gli infortuni che avvengono con superfici aperte possiedono inoltre altre cause di innesco oltre a quelle tipiche della manutenzione; l'elettricità causa infatti un totale di 29 incidenti con 4 infortuni significativi mentre l'assenza di divieto di fumo determina complessivamente 17 incidenti che causano 8 infortuni.

<sup>5</sup> HSE è l'acronimo di Health and Safety Executive.

**Tabella 1.8 - Indagine su incendi ed esplosioni. Incidenti in impianti chiusi**

<b>SORGENTI DI ACCENSIONE</b>	<b>IMPIANTI</b>	<b>REATTORI</b>	<b>RECIPIENTI A PRESSIONE</b>	<b>SERBATOI</b>	<b>SCAMBIATORI DI CALORE</b>	<b>VAPORIZZATORI</b>	<b>POMPE</b>	<b>PIPING</b>	<b>TUBAZIONI FLESSIBILI</b>	<b>TOTALE</b>
Fiamme/Lavori a fuoco	3 (2)		1 (1)	1 (1)		2		3		10 (4)
Superfici calde	1	1	1	1 (1)	1		1 (1)	3	1	10 (2)
Attrito meccanico	3						1			4
Elettricità							5	3		8
Particelle calde	1			1			1			3
Scariche elettrostatiche	1	2	2	1						6
Fumare										0
Auto-combustione	1	1	1		2		1	1		7
Sconosciuto	9	4 (1)	5	3	1		4 (1)	7	5	38
<b>Totale</b>	<b>19 (2)</b>	<b>8 (1)</b>	<b>10 (1)</b>	<b>7 (2)</b>	<b>4</b>	<b>2</b>	<b>13 (2)</b>	<b>17</b>	<b>6</b>	<b>86 (8)</b>

N.B. Tra parentesi si riporta il numero di incidenti che hanno causato infortuni

Fonte: Cox *et al.*, 1990

**Tabella 1.9 - Indagine su incendi ed esplosioni. Incidenti in impianti ed attività con superfici aperte**

<b>SORGENTI DI ACCENSIONE</b>	<b>FORNO DI EVAPORAZIONE SOLVENTI</b>	<b>CABINE DI VERNICIATURA</b>	<b>PICCOLI CONTENITORI</b>	<b>OPERAZIONI DI SGRASSAGGIO</b>	<b>SERBATOI MOBILI</b>	<b>ALTRO</b>	<b>TOTALE</b>
Fiamme/Lavori a fuoco	2 (1)	1	10 (6)	4 (2)	4 (3)	8 (2)	29 (14)
Superfici calde		2 (1)	2	3	6 (5)	7 (1)	20 (7)
Attrito meccanico		4 (1)		1		6 (1)	11 (2)
Elettricità	2	2	4	1	11 (4)	9	29 (4)
Particelle calde							0
Scariche elettrostatiche		2	3	1		4	10
Fumare		1	5 (4)	3 (2)	3 (1)	5 (1)	17 (8)
Auto-combustione				1		1	2
Sconosciuto		3	7 (2)	1	9 (4)	1	21 (6)
<b>Totale</b>	<b>4</b>	<b>15</b>	<b>31</b>	<b>15</b>	<b>33</b>	<b>41</b>	<b>139 (41)</b>

N.B. Tra parentesi si riporta il numero di incidenti che hanno causato infortuni

Fonte: Cox *et al.*, 1990

## 1.4 ASFISSIA E PREVENZIONE DELL'ATEX

In molte attività produttive si opera in regime di prevenzione dell'ATEX all'interno dei contenimenti di processo, attraverso varie strategie tecniche delle quali la principale è rappresentata dall'inertizzazione con gas inerti, azoto principalmente.

Il CSB statunitense a questo proposito ha identificato e studiato gli incidenti industriali connessi all'utilizzo di gas inertizzanti nel decennio compreso tra il 1992 ed il 2002.

Lo studio evidenzia che più di 80 persone sono decedute per asfissia in 10 anni negli Stati Uniti. Le cause di tali tragici fatti sono varie e non si concentrano nella sola industria chimica ma si estendono all'industria alimentare (impianti di processo e stoccaggio), ai laboratori chimici e negli impianti medici. Una maggioranza degli incidenti è avvenuta durante operazioni di manutenzione e gli incidenti mortali coinvolgono nel 60% dei casi appaltatori esterni.

## 1.5 CASE HISTORY

Nel seguito si riportano alcuni studi di casi significativi utili alla contestualizzazione del fenomeno. Si suddivideranno i casi presentati nelle categorie di:

- esplosioni di gas e vapori infiammabili;
- esplosioni di nebbie e spray (infiammabili e/o combustibili);
- esplosioni di polveri combustibili;
- asfissia dovuta a gas inerti.

Preliminarmente, però, osserviamo che la grande maggioranza degli incidenti accaduti nel passato non sono avvenuti perché non sono noti i metodi per evitarli, bensì perché tali metodologie sono state “scordate” (dal singolo o dall'organizzazione), oppure perché la loro conoscenza non è mai stata trasferita. Il trasferimento delle conoscenze all'interno di un'organizzazione risulta, spesso, molto difficoltosa. La conoscenza dei casi accaduti nel passato può essere, quindi, di ausilio all'analista per discriminare gli scenari di rischio astrattamente possibili dagli scenari di rischio maggiormente credibili, e sui quali concentrare le maggiori attenzioni di prevenzione e protezione. Molte volte, infatti, quello che può accadere è già avvenuto nel passato e tali esperienze devono essere poste a fondamento delle attività di valutazione. Il passato, in questo senso, fornisce l'indicazione diretta ed evidente di quali siano i meccanismi coinvolti nella genesi di incidenti. Il passato è sempre un buon maestro, soprattutto nel settore delle atmosfere esplosive.

I casi presentati sono tratti da inchieste specifiche, letteratura scientifica e dalle risultanze emerse in sede di Commissione parlamentare di inchiesta sugli infortuni sul lavoro riportate nella relazione finale pubblica del 20 marzo 2008<sup>6</sup>.

### 1.5.1 Esplosione di vapori infiammabili: Umbria Olii (Italia), Novembre 2006

Si riportano nel seguito le risultanze emerse in sede di Commissione parlamentare di inchiesta relativamente all'incidente, avvenuto il 25 novembre 2006, presso lo stabilimento di Umbria Olii sito in provincia di Perugia.

<sup>6</sup> Si veda il sito <http://www.senato.it>.

“In data 4 dicembre 2006 è stata effettuata una missione in Umbria, finalizzata ad effettuare accertamenti circa l’infortunio mortale verificatosi in data 25 novembre 2006, a seguito dell’esplosione avvenuta all’interno della raffineria Umbria Olii, localizzata nel comune di Campello sul Clitunno.

L’incidente in questione si è verificato mentre erano in corso dei lavori per la realizzazione di passerelle metalliche da porre alla sommità dei silos, lavori che stava effettuando una squadra di cinque operai della ditta Manili impianti, con sede legale a Narni. Verosimilmente tale incidente è stato causato dalla perforazione con fiamma ossiacetilenica di un silos contenente circa 6.000 quintali di olio vegetale, che ha generato un incendio di vaste dimensioni, in cui sono rimasti coinvolti tutti i componenti della squadra; in particolare quattro sono deceduti ed uno è rimasto ferito.

Dalle audizioni effettuate da una delegazione della Commissione presso la Prefettura di Perugia è emersa una discrasia tra la dichiarazione rilasciata dall’impresa (ai sensi del DPR n. 203 del 1988) in merito al ciclo produttivo – cosiddetto Modello unico di dichiarazione ambientale (MUD) – in cui è stato dichiarato il solo trattamento di olio lampante<sup>7</sup> – che in sé non presenta un alto rischio di infiammabilità – e la presenza nel processo lavorativo di olio di sansa grezzo<sup>8</sup>, non segnalata dall’azienda e non riscontrata dagli organismi di controllo prima dell’incidente, suscettibile di ingenerare una sostanza gassosa chiamata esano – rilevata anche nelle analisi effettuate nell’aria e nell’acqua subito dopo l’incidente – che presenta invece un elevato grado di infiammabilità. Va poi rilevato che i lavori di manutenzione effettuati ad opera della ditta appaltatrice avrebbero resa necessaria l’effettuazione di una preventiva informativa da parte dell’azienda titolare dell’impianto circa la presenza di una situazione a rischio, ed in particolare circa la presenza di sostanze gassose altamente infiammabili (nella specie di esano) nei silos sui quali veniva effettuato l’intervento, che peraltro richiedeva l’uso di fiamma ossiacetilenica, suscettibile quindi di determinare l’innesco dell’esplosione, purtroppo drammaticamente verificatasi. È verosimile che nel caso di specie tale obbligo informativo non sia stato adempiuto integralmente.”

**Figura 1.2 - Incidente avvenuto presso Umbria Olii, dicembre 2006**



<sup>7</sup> L’olio lampante è ottenuto esclusivamente attraverso processi di estrazione meccanica.

<sup>8</sup> L’olio di sansa è estratto attraverso processi chimico-fisici in impianti che necessitano della presenza di un solvente (esano). Tale solvente viene successivamente eliminato dall’olio ottenuto attraverso processi di strippaggio.

Nel dicembre 2011, a circa cinque anni dal catastrofico incidente, il Tribunale di Spoleto (PG) ha condannato in primo grado il datore di lavoro di Umbria Olii a sette anni e sei mesi di reclusione per omicidio colposo plurimo, incendio, omissione dolosa di cautele antinfortunistiche e collocamento pericoloso di cose.

### **1.5.2 Esplosione di vapori infiammabili: Barton Solvents Wichita (USA), Luglio 2007**

Il 17 luglio 2007, alle ore 9,00 del mattino circa, un'esplosione seguita da un incendio ebbe luogo alla Barton Solvents Wichita, in Kansas (USA).

A causa dell'esplosione, undici residenti e un vigile del fuoco ebbero necessità di cure mediche. Tale incidente provocò, inoltre, l'evacuazione di circa 6.000 residenti, abitanti in prossimità del sito, a causa dei rilasci tossici provocati dall'incendio conseguente all'esplosione.

**Figura 1.3 - Incidente avvenuto presso Barton Solvents Wichita, luglio 2007**



Fonte: CSB, 2007

L'inchiesta svolta dal CSB (USA), concluse che la prima esplosione si verificò all'interno di un serbatoio verticale fuori terra contenente etere di petrolio (VM&P naphtha, Cas. N. 8032-32-4). A fini antincendio tale sostanza, oltre a generare vapori infiammabili, possiede una bassa conducibilità elettrica che può accumulare livelli pericolosi di elettricità statica.

Questa prima esplosione si verificò in un serbatoio fuori terra della capacità di circa 60 m<sup>3</sup>. La violenza dell'evento fu tale che il rumore ed il fumo furono udibili e visibili a vari chilometri di distanza. L'esplosione, oltre a proiettare il tank a circa 40 metri di distanza, provocò la rottura di altri due serbatoi che sversarono in ampie pozze il loro contenuto di liquido infiammabile generando un conseguente incendio che causò sovrappressioni e rotture in molti altri serbatoi (una delle estremità superiori dei tank coinvolti nelle successive esplosioni venne scagliata a circa 120 metri di distanza).

Le probabili cause dell'incidente individuate dal CSB furono da attribuire alla impos-

sibilità da parte del recupero dei vapori di prevenire la formazione di ATEX interne al serbatoio. Questo fatto, unito all'elevata resistività del liquido permise l'innesco elettrostatico dei vapori.

### **1.5.3 Esplosione di gas infiammabili: Manutenzione su cisterna (Italia), 2007**

Nel caso di seguito analizzato, presente nella banca dati INFOR.MO, l'infortunato, per eseguire la manutenzione di alcuni indicatori di livello, avrebbe dovuto procedere all'apertura di una flangia in un serbatoio di vetroresina (volume = 30 m<sup>3</sup>), utilizzato per l'accumulo dell'acqua proveniente da due pozzi artesiani.

Per raggiungere la parte alta del serbatoio, nella quale era collocato il boccaporto di accesso, l'uomo utilizzò una cesta autosollevante.

Le viti in acciaio che mantenevano chiusa la flangia del "passo d'uomo" risultarono corrose e l'operatore non riuscì a svitarle. L'utilizzo della smerigliatrice portatile, per la rimozione di tali viti, determinò un'esplosione che proiettò in alto il serbatoio. Questa esplosione investì in pieno la cesta sulla quale stava operando il manutentore.

Sia l'infortunato, sia una grande parte del serbatoio, vennero proiettati sul tetto dell'edificio adiacente.

L'uomo morì a causa delle numerose fratture riportate. Nel serbatoio si accumulò, nel corso del tempo, metano disciolto nell'acqua prelevata dai due pozzi artesiani utilizzati dalla ditta. Lo scintillio prodotto dalla mola abrasiva causò l'innesco della miscela esplosiva interna al serbatoio (metano e aria).

Negli anni precedenti all'incidente, l'impianto venne dotato di un degasatore per metano, successivamente rimosso. Inoltre, la ditta possedeva una procedura per l'esecuzione di lavori "con produzione di scintille" ma questa non fu mai implementata.

### **1.5.4 Esplosione di vapori infiammabili: Feyzin (Francia), Gennaio 1966**

Particolarmente significativo risulta l'incidente accaduto nella raffineria francese di Feyzin causato dal rilascio non controllato di propano da una sfera di stoccaggio (AICHE, 1994). Preliminarmente si osserva che durante il processo di produzione del propano si genera idrossido di sodio il quale, essendo più pesante del gas liquefatto, tende a depositarsi sul fondo della sfera (nell'impianto di Feyzin erano installate alcune sfere della capacità pari a 1200 m<sup>3</sup> ciascuna).

L'incidente ebbe luogo durante la regolare operazione di spurgo dell'idrossido di sodio da una sfera di stoccaggio. Una delle criticità dell'operazione consisteva nella potenziale e rilevante espansione che subiva il gas in uscita. Espansione che, accompagnata da un notevole sottoraffreddamento della miscela, poteva comportare il transitorio congelamento della valvola di drenaggio. A questo scopo nello stabilimento ne erano previste due in serie. La procedura di spurgo prevedeva l'apertura *parziale* della valvola a valle e, successivamente, la regolazione del flusso grazie alla valvola di intercettazione posta a monte della prima. L'eventuale congelamento sarebbe stato sopportato dalla valvola a valle in corrispondenza della quale si generava la principale laminazione del gas. Al termine dello spurgo, l'operatore avrebbe dovuto agire sulla valvola a monte che si manteneva comunque operativa. Nel giro di breve tempo, con il riscaldamento successivo al termine del flusso, ridiventava operativa pure la valvola a valle che veniva chiusa anch'essa.

L'evento, accaduto nel primo mattino del 4 gennaio del 1966, fu determinato da un comportamento scorretto degli operatori addetti alla manovra di spurgo. Contraria-

mente alle istruzioni fu aperta *completamente* prima la valvola posta a valle del condotto di deflusso e poi quella di regolazione del flusso, posta a monte. Tale operazione determinò una limitata uscita di soda caustica mista a propano, questo perché, come appurò successivamente l'inchiesta, era presente un tappo di ghiaccio di idrossido di sodio creatosi proprio in corrispondenza della valvola a monte. Gli operatori, vedendo il debole flusso in uscita, agirono ripetutamente sulla valvola di regolazione a monte fino alla sua completa apertura che determinò il disancoraggio del tappo di ghiaccio e la successiva sua fuoriuscita dalla tubazione di drenaggio. Il rilevantissimo flusso in uscita (entrambe le valvole erano infatti completamente aperte), determinò un'espansione adiabatica ed un conseguente, rilevantissimo, sottoraffreddamento che ghiacciò la valvola a valle e rese inservibile quella a monte impedendo la richiusura del drenaggio. Non ci fu quindi più modo di intercettare il flusso di propano che proseguì ininterrotto e generò una nube dello spessore di circa un metro e che venne innescata in breve tempo causando una prima VCE.

Le squadre di emergenza, intervenute con rapidità, iniziarono a raffreddare con acqua le sfere nelle quali le valvole di sicurezza sembravano (apparentemente) non funzionare, lasciando priva di raffreddamento esterno la sfera, in fase di svuotamento accidentale, protetta dalle valvole di sicurezza in funzione.

In poco tempo il metallo della sfera, investita dalle fiamme e non raffreddata, diminuì la propria resistenza ed esplose in un BLEVE con Fireball e proiezione di frammenti. Quindici minuti dopo una seconda sfera esplose e una terza si svuotò del proprio contenuto a causa di una tubazione rotta. Tre altre sfere si ruppero nel corso dell'evento incidentale senza tuttavia dare luogo a frammentazioni. Furono trovati frammenti della prima sfera fino a 800 metri di distanza.

L'incidente causò complessivamente 18 decessi ed 81 persone rimasero ferite. Rimane uno dei più terribili incidenti industriali avvenuti in Francia ed in Europa nel dopoguerra (Figura 1.4).

**Figura 1.4 - Incidente di Feyzin, gennaio 1966**



### **1.5.5 Esplosione di vapori infiammabili: Paloma Condensate (USA), Luglio 1952**

Il 21 luglio 1952, la regione nella quale era installato dell'impianto di riciclaggio chimico Paloma Inc., sito a Bakersfield, in California venne investita da un terremoto (Mannan, 2005). L'evento, con epicentro localizzato a circa 20 km dall'impianto, ebbe un'intensità pari a 7,7 gradi della scala Richter.

L'ampiezza delle vibrazioni fu di circa 15 cm verticali e 30 cm orizzontali determinando almeno 2 metri di spostamento alla sommità della colonna di assorbimento installata presso il sito.

Nell'impianto erano installate anche cinque sfere per lo stoccaggio di butano non progettate per resistere ad un terremoto di quella violenza. Due sfere crollarono e la loro rottura determinò una nube di vapori infiammabili che si innescò 90 secondi più tardi generando un'esplosione (VCE). Si sviluppò quindi un incendio che causò danni estesi all'impianto ma nessuna vittima.

### **1.5.6 Esplosione di vapori infiammabili: Impianto petrolchimico (Italia), 2004**

L'incidente ebbe luogo nella zona destinata alla produzione e stoccaggio di bitume, presso un impianto petrolchimico sito a Falconara Marittima l'8 settembre 2004. La descrizione dell'incidente è estratta dal report pubblico elaborato dal Ministero dell'Ambiente Francese e presente presso la banca dati di ARIA.

La zona dello stabilimento, adibita allo stoccaggio e produzione, era costituita all'epoca dell'incidente da 12 serbatoi a tetto fisso, 8 bracci di carico, 6 pompe di trasferimento e uno scambiatore di calore per il riscaldamento di eventuali stoccaggi di bitume.

L'incidente ebbe luogo durante la fase di caricamento di un serbatoio atmosferico di bitume, operativo dal 1970, con capacità di 1200 m<sup>3</sup> avente 12 metri di altezza. Il serbatoio era dotato di un sistema di riscaldamento interno a spirale ad olio diatermico che assicurava una temperatura di circa 170 °C. Erano inoltre presenti all'interno anche indicatori di livello, di temperatura e un agitatore meccanico. Al momento dell'incidente erano contenuti nel serbatoio circa 590 m<sup>3</sup> di bitume e circa 150 m<sup>3</sup> di olio diatermico nel circuito di riscaldamento.

L'esplosione, avvenuta al mattino, distaccò il serbatoio ed il tetto dalle fondazioni in cemento armato e proiettò il tutto, lateralmente, di almeno 15 metri.

L'incidente, che coinvolse un altro serbatoio, provocò una rilevante fuoriuscita di bitume (circa 550 tonnellate) e di olio rovente (circa 120 tonnellate) che si diffuse ad altre parti del sito. Si innescò un incendio di pozza, alimentato dall'olio minerale fuoriuscito dai circuiti di riscaldamento, che interessò le attrezzature circostanti, compresi alcuni camion durante in fase di carico.

L'incidente, oltre a rilevantissimi danni economici, provocò la morte di un camionista investito dal bitume bollente. Altri tre camionisti vennero ricoverati in gravi condizioni all'ospedale.

Le due principali ipotesi sulle quali si orientarono le indagini ricondussero l'incidente alle seguenti due cause:

- una sovrappressione interna nel serbatoio causata dall'esplosione di idrocarburi infiammabili indebitamente introdotti nel serbatoio, probabilmente da cisterne non correttamente pulite;
- una sovrappressione interna nel serbatoio causata da una rapida evaporazione di acqua, indebitamente introdotta nel serbatoio, (temperatura 170 °C).

Ulteriori indagini in seguito realizzate portarono a considerare la prima ipotesi come la causa principale dell'intero incidente.

### **1.5.7 Esplosione di vapori infiammabili: Azienda di produzione di carrelli elevatori (Italia), 2003**

La descrizione del seguente incidente mortale è estratta dalla banca dati INFOR.MO

dell'ISPESL. L'evento è avvenuto nel 2003 presso un'azienda di produzione di carrelli elevatori. Il report di incidente è il seguente:

“Di sabato, come di consueto, si stavano svolgendo le operazioni di pulizia in una fabbrica di carrelli elevatori. Solitamente i trucioli ferrosi, scarto delle lavorazioni, venivano scaricati in appositi bidoni con una base aperta, che quel giorno però erano esauriti.

Un operaio, cercando di supplire alla carenza con la sua iniziativa personale, prese un bidone di latta, ex contenitore di solvente, stoccato in un container all'esterno. Per trasformarlo in un contenitore adatto ai suoi scopi, si preoccupò di aprirlo da un lato tagliandolo con il flessibile.

Probabilmente a causa delle scintille e del calore provocato, i residui di solvente nel contenitore innescarono un'esplosione di grossa portata, che proiettarono parti del bidone fino a 300 metri di distanza. Il flessibile, nell'esplosione, venne scaraventato contro la testa dell'infortunato provocandone il decesso”.

Molti sono gli incidenti che si manifestano a seguito di operazioni non consentite o comunque non approvate. Il Titolo XI del D.Lgs. n. 81/2008 prevede a questo proposito la realizzazione di appositi permessi di lavoro.

### 1.5.8 Esplosione di vapori infiammabili: Azienda del settore legno (Italia), 2008

La descrizione del seguente incidente mortale è estratta dalla banca dati INFOR.MO dell'ISPESL. L'evento è avvenuto nel 2008 presso un'azienda del settore legno. Il report di incidente è il seguente:

“L'infortunio avvenne nel piazzale esterno al reparto verniciatura di uno stabilimento del comparto legno. L'infortunata avrebbe dovuto spillare del solvente per travasarlo in un fusto da 30 litri prelevandolo da una cisterna pallettizzabile depositata all'esterno insieme ad altre 4 cisterne simili da circa 1000 litri. Durante l'operazione di travaso del solvente si verificò un'esplosione (Flashfire) e l'infortunata venne investita da alcuni litri di solvente in fiamme che le provocarono gravi ustioni. Subito soccorsa dai colleghi e dal personale del 118, venne trasferita in un centro per grandi ustionati dove purtroppo avvenne il decesso 35 giorni dopo l'evento incidentale. La ditta possedeva una valutazione ATEX che non comprendeva la valutazione dei rischi dovuti ad atmosfere esplosive ed incendio legati alle operazioni descritte. L'infortunata non indossava abiti e calzature antistatiche o conduttive. La zona di travaso non disponeva di pedane conduttive messe a terra per l'operatore e della messa a terra ed equipotenzializzazione dei recipienti. Tali misure sarebbero risultate probabilmente sufficienti a disperdere le cariche elettrostatiche accumulate sia sulla persona sia nel liquido. L'esplosione della miscela aria/vapori di solvente all'interno del fusto di latta, innescata da una scarica elettrostatica, causò l'evento. La scheda di sicurezza del prodotto non recava indicazioni circa l'esplosività dei vapori miscelati con aria, la necessità di evitare accumulo di cariche elettrostatiche e la proprietà del solvente di caricarsi elettrostaticamente per sfregamento.”

Il caso riportato risulta rappresentativo degli incidenti con gravi conseguenze che avvengono in assenza di elevati rilasci di energia durante l'esplosione. Il fattore chiave, in questi eventi, risulta la presenza dell'operatore all'interno degli effetti dell'esplosione, anche se limitati.

### 1.5.9 Esplosione di nebbie e spray: ThyssenKrupp (Italia), Dicembre 2007

Si riportano nel seguito le risultanze emerse in sede di Commissione parlamentare di inchiesta relativamente all'incidente presso lo stabilimento ThyssenKrupp di Torino, avvenuto il 6 dicembre 2007.

“A seguito dei gravissimi incidenti mortali avvenuti presso lo stabilimento ThyssenKrupp di Torino la Commissione ha effettuato, in data 10 e 11 dicembre 2007, un sopralluogo a Torino, finalizzato ad acquisire elementi informativi circa il drammatico evento in questione.

Dalle audizioni effettuate presso la Prefettura di Torino è emerso che prima dell'incidente non era stata prestata la sufficiente attenzione ai problemi di manutenzione e che l'attività di controllo aveva subito un allentamento, anche perché lo stabilimento della ThyssenKrupp di Torino era destinato alla dismissione, per il trasferimento dell'attività produttiva a Terni.

Tra l'altro, va evidenziato che presso questa azienda c'era già stato un incendio cinque anni fa, per il quale era stato attivato un procedimento penale conclusosi in primo grado con due patteggiamenti e la condanna con rito abbreviato degli altri imputati e attualmente è in corso il procedimento in secondo grado.

Dalle indagini svolte dalla Commissione è emerso che le cause tecniche dell'incendio appaiono ascrivibili alle perdite d'olio a cui costantemente era soggetto l'impianto in questione e che avevano dato luogo, in precedenza, a continui incendi di portata limitata. Il giorno dell'infortunio mortale è probabile che uno di questi focolai abbia investito uno dei manicotti idraulici posti alla base dell'impianto, determinando una lesione dello stesso e una conseguente perdita d'olio, che si è diffuso in forma nebulizzata nell'ambiente di lavoro (attesa la forte pressione a cui l'olio stesso circolava nel macchinario) dando luogo alla tragica esplosione che ha investito gli operai presenti nell'area.

La pericolosità connessa alle perdite d'olio era stata sottovalutata sia dal datore di lavoro, sia dai tecnici dell'Asl, che erano in varie occasioni intervenuti nell'azienda per attività ispettive.

Dalle verifiche investigative effettuate dai Vigili del fuoco di Torino è risultato che venivano utilizzate dall'azienda 10 tonnellate al mese di olio idraulico per rabboccare le perdite d'olio negli impianti idraulici. Le continue perdite di olio nell'impianto erano di due tipi: trafilamenti dai tubi lungo la linea, quindi nelle parti alte, dalle tubazioni, manicotti che perdevano e che erano ovviamente localizzati, e grosse perdite dai pistoni idraulici di sollevamento, normalmente quelli che sollevano le selle per portare il cilindro ad una certa altezza; addirittura, è emerso che in certe situazioni si bloccavano le selle e occorreva un consistente rabbocco d'olio per poterle riattivare. Inoltre, l'olio che si perdeva veniva raccolto in tre zone: in pozzetti, collegati con un tubo ad un serbatoio, detto serbatoio 7, con canalizzazioni da tutta l'azienda; in vasche di metallo, una sorta di “padelle”, alte 10 o 15 centimetri in alcune zone che raccoglievano l'olio, e infine lungo la linea dove veniva poi recuperato con segatura e pulizia manuale.

L'azienda poi era perfettamente a conoscenza delle perdite d'olio, provvedendo ad acquistare mensilmente grandi quantità di olio destinate al rabbocco, ma non ha provveduto a svolgere le attività manutentive necessarie per eliminare il suddetto inconveniente.

I piccoli focolai di incendi (determinati dalle perdite d'olio) erano continui, come si evince anche dall'audizione della ditta esterna incaricata della manutenzione degli estintori, che provvedeva continuamente al riposizionamento ed alla ricarica di estintori usati per spegnere focolai che insorgevano continuamente.

Non era poi presente nell'azienda un sistema automatico di rilevazione (tramite sensori) e spegnimento degli incendi, circostanza che, unita alla mancanza di estintori a lunga gittata (erano infatti disponibili solo estintori a breve gittata), aveva accresciuto notevolmente il rischio per gli operatori, che in caso di focolaio di incendio (frequenti nella ditta) erano costretti ad avvicinarsi allo stesso per effettuare le operazioni di spegnimento.

Va precisato che nel corso dell'incidente mortale di cui trattasi, le fiamme avevano investito taluni operai, presenti nelle vicinanze dell'area nella quale si era determinato un piccolo focolaio per compiere gli interventi manuali volti ad arginarlo; sarebbe bastato un sistema di rilevazione e spegnimento automatico degli incendi per scongiurare la presenza di operatori in tale area al momento dell'esplosione.

Da quanto è risultato dalle audizioni effettuate dalla Commissione, nel corso dei sopralluoghi effettuati presso l'azienda prima dell'incidente (azienda rientrante nella categoria delle industrie ad alto rischio della città di Torino, della quale fanno parte due sole imprese, ossia la ThyssenKrupp stessa e la Rockwood Italia SpA – Divisione SILO), i tecnici dell'Asl avevano esaminato alcuni rischi, quali il rischio elettrico, il rischio da tagli di alcune parti del corpo, il rischio di ferite, di cadute in cavità, senza tuttavia soffermarsi in alcun modo sugli aspetti connessi alle perdite d'olio (cfr. resoconto stenografico della seduta del 22 gennaio 2008, intervento della dottoressa Chianale).

Il mancato riscontro da parte della ASL dei pericoli connessi alle perdite d'olio è stato evidenziato anche dal dottor Moratti nel corso dell'audizione del 15 gennaio 2008, nella quale lo stesso ha affermato testualmente: "ho appreso anch'io tramite la stampa che spesso si sviluppavano questi fuochi negli impianti – e non credo solo sulla Linea 5 – ma non ne ero assolutamente a conoscenza. Sapevo che l'incendio del 2002 ha riguardato un impianto, ma di piccoli focolai dovuti a sfregamenti della lamiera o ad altri motivi non avevo neanche trovato traccia perché se avessi notato qualcosa di annerito mi sarebbe venuto il dubbio. Nel corso dei sopralluoghi, non abbiamo trovato olio in giro per gli impianti, né c'erano fuoriuscite sui pavimenti.

Abbiamo trovato olio, raccolto però nelle vaschette, nel piano interrato, dove ci sono le pompe che tengono in pressione questo olio e dove ci sono dei filtri per l'olio che viene riciclato sui laminatoi, e delle piccole perdite nel senso che il pavimento risultava unto, ma non presentava pozzanghere." (cfr. resoconto stenografico della seduta del 15 gennaio 2008).

Sempre il dottor Moratti ha inoltre affermato: "Dove avvolgono un coil purtroppo non ho immaginato ci potesse essere un rischio di incendio, in quanto la Linea 5 non è un laminatoio, ma vi è un trattamento superficiale, prima termico e poi chimico". (cfr. resoconto stenografico della seduta del 15 gennaio 2008).

Sono inoltre emerse criticità relativamente alle squadre di emergenza presenti in azienda: la norma prevede che ci siano delle squadre d'emergenza, i cui responsabili fino al giugno 2007 erano, nel caso di specie, i capisquadra manutenzione. Questi capisquadra sono stati dimessi o trasferiti a causa dell'intenzione dell'azienda di chiudere lo stabilimento di Torino e sono stati sostituiti, in varie date, dai capiturno della produzione (uno di questi tra l'altro era il signor Rocco Marzo, deceduto durante l'evento). Questa sostituzione ha determinato un grosso problema, perché coloro che hanno sostituito i precedenti responsabili delle squadre di emergenza non avevano alcuna formazione specifica sulle modalità di intervento in caso di incendio.

Infine, va rilevato che il piano di emergenza dell'azienda presentava lacune, che si sono drammaticamente evidenziate anche al momento del tragico evento di cui trattasi."

Per la comprensione di quanto accadde, risulta di particolare interesse la relazione tecnica elaborata dal Prof. Massimo Zucchetti, docente di “Sicurezza e Analisi di Rischio” al Politecnico di Torino, della quale si riporta uno stralcio<sup>9</sup>.

“[...] Alle ore 20.06 del 5/12/2007 la Linea 5 fu arrestata affinché gli operatori potessero effettuare la rimozione della carta fino all’entrata nel forno, perché il rotolo processato in precedenza aveva la carta adesiva e questa era stata trascinata e accumulata in grande quantità. La marcia fu ripresa alle ore 21.48.

Alle ore 23.07 la Linea 5 fu nuovamente arrestata, perché la fotocellula che ha il compito di rilevare la presenza nastro era malfunzionante e per questo non consentiva la marcia della linea.

L’inconveniente richiese un intervento di manutenzione, effettuato da Salerno Giuseppe. Un’ora e mezza dopo, alle 0.35, la Linea 5 fu riavviata, e fu inviato a processo il rotolo caricato sull’Aspo N° 1. Dai dati di marcia risulta che la velocità di processo era pari a 18 m/min. Le evidenze indicano che al momento del riavvio lungo la linea vi era ancora un notevole quantitativo di carta.

Al momento del riavvio della linea, il nastro presentava un fuori asse di 90 mm. Si precisa che nella zona interessata dal fuori asse non vi erano sistemi di rilevamento della posizione nastro.

Come risulta evidente dall’esame della linea e dalle testimonianze, l’incendio si è sviluppato sulla verticale della raddrizzatrice Aspo 2, situata sotto il secondo pinzatore Aspo 1. La causa d’insorgenza dell’incendio può essere dovuta ad una o ambedue le seguenti cause:

- sfregamento del nastro contro la struttura metallica della cesoia Aspo 1;
- sfregamento del nastro contro la carta accumulata sulla struttura metallica che sostiene la medesima cesoia.

Le scintille provocate dallo sfregamento del nastro contro la struttura o l’incendio della carta provocato dallo sfregamento, hanno causato con la loro caduta l’incendio della carta sottostante accumulata nella raddrizzatrice Aspo 2. La presenza della carta è testimoniata, dai residui carboniosi tra i rulli della medesima.

Come testimoniato da B., gli operatori si accorsero della presenza del focolaio e intervennero per spegnerlo. In particolare B. per primo si recò in prossimità della raddrizzatrice Aspo 2, lato pulpito di comando, con un estintore, che lui ha definito “pressoché scarico”, senza riuscire a spegnere le fiamme. Nel frattempo queste si propagarono verso il basso, coinvolgendo la carta e la pozza, generata dagli sgocciolamenti di kerosene dai nastri e dall’olio idraulico proveniente dalle perdite dei circuiti, presenti nella vasca creata dalla struttura portante della raddrizzatrice.

A questo punto B., resosi conto che non poteva spegnere le fiamme con l’estintore si recò presso l’idrante più vicino e collegò una manichetta, che era già svolta, mentre i colleghi si avvicinarono alle fiamme con altri estintori a CO e con la lancia della manichetta stessa.

Le fiamme bruciarono i rivestimenti di gomma dei flessibili sottostanti la raddrizzatrice dilatando altresì i raccordi terminali pressati, causando il collasso di un primo flessibile sotto pressione. Ciò provocò un violentissimo getto d’olio idraulico, che, in buona parte nebulizzava generando uno spray di vapori (la frazione leggera dell’olio) e di goccioline minutissime, per l’effetto della repentina depressurizzazione.

<sup>9</sup> Si veda [http://staff.polito.it/massimo.zucchetti/Relazione Thyssen\\_Zucchetti.pdf](http://staff.polito.it/massimo.zucchetti/Relazione_Thyssen_Zucchetti.pdf)

Lo spray d’olio ha immediatamente trovato un innesco nel focolaio d’incendio già in atto, sviluppando una “vampata” (Flash Fire), che ha interessato un’ampia area attorno alla raddrizzatrice Asp 2, estesa almeno fino alla parete lato operatori, ed ha investito in pieno quasi tutti i presenti.

Solo B. (in posizione protetta dal muletto) è stato risparmiato. L’innesco della nube ha causato il rumore testimoniato da B. (“un rumore sordo quasi come si trattasse più correttamente di un boato tipo quello che si sente all’accensione di uno scaldacqua a gas ma molto più forte”). A seguito della cospicua fuoriuscita d’olio le fiamme hanno aumentato a dismisura la loro intensità, in modo pressoché istantaneo.

Il collasso di altri flessibili presenti sotto la raddrizzatrice ha alimentato ulteriormente l’incendio, e causato “altre esplosioni più piccole rispetto alla prima e più acute, dei veri e propri scoppi” così come descritte sempre dal B. e da diversi testimoni che riferiscono di aver sentito altri “scoppi” ad incendio già sviluppato.

La quantità d’olio fuoriuscita dai vari flessibili collassati è stata certamente cospicua, poiché la fuoriuscita di olio in pressione è proceduta, con abbassamento del livello all’interno del serbatoio, fino al raggiungimento del livello di minimo, evento che ha provocato l’arresto della linea e della centrale idraulica con conseguente cessazione della fuoriuscita di olio. La differenza del volume d’olio contenuto nel serbatoio tra i due livelli costituisce una stima di minimo del quantitativo d’olio fuoriuscito; essa è pari a 430 litri.

L’incendio era poi spento con apposito schiumogeno dai sopraggiunti VV. FF. [...]

Per quel che riguarda la Linea 5 di Torino, questa non era dotata di specifici apprestamenti antincendio, come anche la analoga linea di Terni, ovvero non sono presenti rilevatori di incendio e non esiste un sistema di spegnimento incendi. Eventuali incendi su queste linee vengono gestiti manualmente dai dipendenti con l’uso di estintori, idranti, e nei casi critici con l’intervento della squadra antincendio di presidio.

È di rilievo a questo punto valutare il grado di formazione degli operatori sia su attività antincendio che, più in generale, sul piano d’emergenza o, comunque, su circostanze da considerarsi d’emergenza. Su entrambi questi aspetti, dalle testimonianze agli Atti, emerge un quadro sconsolante.

In caso di principio di incendio le indicazioni fornite dal responsabile della sicurezza erano quelle di intervenire con i mezzi a disposizione ed in caso in cui non si riusciva a venire a capo dovevamo chiamare la squadra di emergenza attraverso il telefono interno in dotazione ad ogni pulpito, e non direttamente i Vigili del fuoco; a questa chiamata provvedeva la squadra di emergenza tramite il posto di guardia o come eventualmente indicato nella procedura interna. In ogni caso, mai andava premuto il pulsante di sicurezza per non arrestare la produzione e danneggiare l’impianto: gli operai erano a conoscenza di dove erano localizzati i pulsanti di emergenza ma sapevano, in quanto era stato detto loro dai capi, che quei pulsanti andavano premuti solo in caso di grosse necessità o per manutenzione e comunque solo dopo aver provato ad intervenire sulla linea in funzione.

L’esame della Linea 5 ha evidenziato come la stessa fosse soggetta a rischio d’incendio elevato, dovuto principalmente a:

- alto carico d’incendio, provocato dalle perdite d’olio dei circuiti idraulici e agli sgocciolamenti di kerosene nel basamento della struttura portante della raddrizzatrice Asp 2 e nella fossa degli aspi svolgitori;
- presenza di carta imbevuta di kerosene accumulata su tutta la linea fino ai forni;
- bobine della stessa carta stoccate a terra o su carrello in zona imbocco, in attesa di essere evacuate;
- pannelli valvole e circuiti con alte quantità di olio idraulico in pressione;
- gas combustibile (metano) utilizzato per alimentare il forno di ricottura;

Tra le principali cause d'innescò di un incendio lungo la linea, considerate le precedenti osservazioni, vi sono:

- lo sfregamento del nastro contro la struttura laterale in carpenteria metallica, con generazione di calore e/o scintille, evento questo da considerarsi come estremamente frequente;
- lo sfregamento del nastro contro la carta accumulata lungo la linea;
- il surriscaldamento di cuscinetti dovuto ad un possibile grippaggio degli stessi;
- il surriscaldamento del nastro che sfrega su di un rullo bloccato (per es. a seguito del grippaggio di un cuscinetto, come successe a Krefeld nel 2006);
- i guasti elettrici con scintillamenti o punti di surriscaldamento provocati da motori elettrici, componenti vari e i relativi collegamenti di potenza;
- perdita di fissaggio di capicorda collegati alle morsettiere con aumento della resistenza di contatto, produzione di scintille e conseguente sovratemperatura.

Risulta quindi evidente come le predette cause d'innescò, in presenza di carichi d'incendio, sicuramente non rilevanti secondo la definizione classica, ma localizzati in alcune aree di processo (per es. quelli apportati dalla carta intrisa di kerosene movimentata assieme alle bobine oppure causati dalle pozze di kerosene nella zona di svolgimento aspi o di olio del circuito idraulico in prossimità dei dispositivi comandati con questo sistema, ma anche per la presenza di grandi quantitativi di olio idraulico in circuiti ad alta pressione) pertanto particolarmente consistenti, facciano sì che il rischio d'incendio sia localmente elevato.

Ciò risulta anche dalle considerazioni della società assicuratrice Axa, e dalle conclusioni emerse dai gruppi di lavoro istituiti dalla Thyssen dopo l'incendio di Krefeld 2006.

La stessa mancanza di sistemi automatici di centratura aspo e bobina, e l'inefficienza dei sistemi di misura diametro bobina, che hanno lo scopo di diminuire la possibilità di sfregamento del nastro contro la carpenteria, è causa dell'aumento della probabilità d'innescò di un incendio, quindi è un fattore che contribuisce all'aumento del rischio, giustificando pienamente la valutazione di rischio alto appena espressa.

A valle delle considerazioni sopra esposte, il sottoscritto può affermare che qualora la Linea 5 fosse stata dotata di un impianto antincendio automatico progettato per effettuare sia il rilevamento che lo spegnimento, il focolaio d'incendio sarebbe stato individuato dal sistema certamente prima dell'esplosione del tubo flessibile e spento automaticamente o, come minimo, si sarebbe contenuta la sua propagazione. In questo caso inoltre non sarebbe stato necessario l'intervento diretto degli operatori, che pertanto non avrebbero perso la vita. [...]"

Il 14 novembre 2011 sono state depositate le motivazioni della sentenza di primo grado con la quale la Corte d'Assise di Torino ha condannato alcuni manager della ThyssenKrupp, e riconosciuto altresì la responsabilità amministrativa da reato della società ai sensi del D.Lgs. n. 231/2001. Il collegio giudicante, facendo propria l'impostazione accusatoria, ha condannato l'amministratore delegato di ThyssenKrupp a 16 anni e 6 mesi di reclusione, per i delitti di omicidio volontario plurimo, incendio doloso, e omissione dolosa di cautele contro gli infortuni sul lavoro aggravata dall'evento, avvinti dall'unicità del disegno criminoso. Gli altri cinque imputati, amministratori e dirigenti dell'impresa, sono stati condannati anch'essi per omissione dolosa di cautele contro gli infortuni sul lavoro aggravata dall'evento, nonché per omicidio colposo plurimo e incendio colposo, questi ultimi entrambi aggravati dalla previsione dell'evento. Quanto alle sanzioni, a quattro di loro (RSPP compreso) è stata inflitta la pena di tre-

dici anni e sei mesi di reclusione, al quinto quella di dieci anni e dieci mesi. La Corte d'Assise ha inoltre condannato la società ThyssenKrupp per omicidio colposo ai sensi dell'art. 25-septies del D.Lgs. n. 231/2001, infliggendole una sanzione pecuniaria pari ad un milione di euro, nonché disponendo, oltre alle sanzioni interdittive ed alla confisca del profitto del reato per una somma di 800 mila euro, la pubblicazione della sentenza sui quotidiani di diffusione nazionale La Stampa, il Corriere della Sera e La Repubblica.

### **1.5.10 Esplosione di nebbie e spray: Ingersoll-Rand & Co (USA), 1959**

L'esplosione descritta nel presente paragrafo avvenne nel 1959 nell'impianto test per compressori presso Ingersoll-Rand & Co a Phillipsburg, NJ, USA. Quanto segue è un riepilogo dell'incidente, riportato da Eckhoff nel 2005.

Il test venne condotto conformemente a quanto previsto dalle procedure standard del settore e comportò l'utilizzo di un circuito chiuso per il contenimento e la ricircolazione del gas utilizzato durante la prova. Dopo circa 6 ore di funzionamento, quasi al termine del test, si verificò un'esplosione.

Il lato di ingresso del circuito si ruppe con grande violenza, uccidendo 6 lavoratori, ferendone gravemente altri 6 e causando infortuni ad almeno altre 24 persone. L'esplosione venne descritta come un forte Flash Fire accompagnato da un'onda d'urto con conseguente sviluppo di piccoli incendi e fumo.

Il pavimento dell'ambiente di test venne distrutto. Le pareti in mattoni subirono danneggiamenti, mentre il soffitto presente del laboratorio si sollevò di almeno 30 cm. Molte finestre si ruppero ed alcuni frammenti vennero proiettati anche a 150 m di distanza.

Il circuito di testa, l'olio di tenuta e buona parte delle attrezzature vennero irrimediabilmente danneggiate. Il compressore centrifugo coinvolto nell'incidente era l'unità di alta pressione di un sistema impiegato per comprimere gas naturale. Il compressore era provvisto di tenute flottanti ad olio utilizzate per contenere il gas all'interno del circuito di prova nella zona di penetrazione dell'albero attraverso la carcassa del compressore stesso. L'olio risultava pressurizzato a circa 3,5 bar aggiuntivi rispetto alla pressione di prova del gas. Il progetto prevedeva un ridotto trafilamento d'olio dalle tenute anche per esigenze di lubrificazione.

La commissione di investigazione concluse che, indipendentemente dalle modalità di progettazione di questo tipo di guarnizione, piccole fughe di olio nel flusso di gas risultassero inevitabili. Questi trafilamenti, tuttavia, venivano canalizzati, in forma atomizzata, nell'aria ad alta velocità presente all'interno del contenimento, con modalità tali da non poter essere drenate. In un circuito chiuso come quello di prova, quindi, la concentrazione di questo spray oleoso aumentò fino a raggiungere il limite inferiore di esplosività in una parte dell'impianto in prova. Il calore generato dall'esplosione determinò un incremento della pressione interna al compressore, pari ad almeno otto volte il parametro di test. Tale valore, incompatibile con la resistenza del contenimento del circuito, originò gli effetti devastanti descritti.

### **1.5.11 Esplosione di polveri combustibili: SEMABLA (Francia), 1997**

Il 20 agosto 1997 si verificò un'esplosione in un impianto di stoccaggio di cereali. L'incidente uccise 11 persone delle quali 6 erano impiegati presso gli uffici dell'impianto.

La descrizione di seguito riportata è tratta dal documento ufficiale d'inchiesta realizzato dall'INERIS<sup>10</sup> francese.

**Figura 1.5 - Effetto dell'esplosione avvenuta nel silo di stoccaggio cereali a Blaye**



Fonte: INERIS, 1997

Il silo apparteneva alla Société d'Exploitation maritime Blayaise (SEMABLA) sita a Blaye, in Francia. Il complesso era costituito da 44 celle di forma cilindrica aventi 6,2 m di diametro e 36,5 m di altezza. La capacità di stoccaggio dell'impianto era pari a circa 37.000 tonnellate di grano. Al momento dell'esplosione risultava stoccata una miscela di grano, mais ed orzo.

Alle estremità dell'insieme del corpo delle celle erano collocate due torri (= torre nord e torre sud) le quali alloggiavano i sistemi di elevazione a tazze, i dispositivi di pesatura, i depolveratori e gli apparecchi elettrici.

Al di sopra delle celle era collocato il tunnel di caricamento contenente al proprio interno i necessari nastri trasportatori.

Ai piedi della torre nord erano inoltre presenti gli uffici e la zona di ricezione dei materiali.

Le celle, le torri ed il tunnel erano realizzati in calcestruzzo armato e non erano dotati di alcun dispositivo per lo sfogo delle esplosioni.

L'impianto di depolverazione consisteva in un sistema centralizzato di raccolta della polvere sottile estratta da:

- trasportatori a catena;
- elevatori a tazze;
- carcasse dei motori degli elevatori;
- nastri trasportatori;
- redler dal ricevimento buche.

La velocità e la violenza dell'evento non permise ad alcun lavoratore di reagire e di mettersi in salvo; tutti i corpi vennero infatti trovati nel luogo di lavoro.

<sup>10</sup> Si veda il sito [www.ineris.fr/index.php?module=doc&action=getFile&id=107](http://www.ineris.fr/index.php?module=doc&action=getFile&id=107).

L'esplosione proiettò grossi frammenti di calcestruzzo a molta distanza dall'impianto. Pezzi con massa fino a 10 kg vennero rinvenuti, infatti, a distanze di oltre 140 metri dal luogo dell'incidente.

L'indagine condotta in seguito all'incidente considerò almeno due possibili scenari all'origine della formazione di ATEX all'interno dei contenimenti:

- formazione di gas infiammabili (CO) dovuti a fenomeni di autocombustione, fermentazione o incendio incipiente;
- formazione di miscele ATEX polveri/aria.

La prima ipotesi venne successivamente scartata a seguito dell'approfondimento delle indagini. Le sorgenti di accensione che vennero considerate quali fattori di innesco furono invece le seguenti:

- scintillio o surriscaldamento (inclusa la presenza di hot spot);
- elettricità statica;
- scintille elettriche;
- autocombustione del deposito.

Anche in questo caso l'approfondimento dell'inchiesta identificò, quale fonte di accensione dell'ATEX, il malfunzionamento e/o guasto di un ventilatore del sistema di raccolta centralizzata delle polveri unita alla presenza di un'elevata temperatura locale che determinò un surriscaldamento delle polveri e, in conseguenza di ciò, un abbassamento della loro energia di innesco (vedi Capitolo 2).

Dalla torre di movimentazione l'esplosione si propagò lungo il tunnel di caricamento attraverso successive esplosioni secondarie alimentate dalla presenza di strati polverosi presenti nei nastri trasportatori. Le fiamme penetrarono infine nelle celle in fase di caricamento generando inneschi con fiamma a getto (Flame Jet Ignition) che fecero collassare i contenimenti i quali, come abbiamo già anticipato, non risultavano protetti da sistemi di sfogo delle esplosioni.

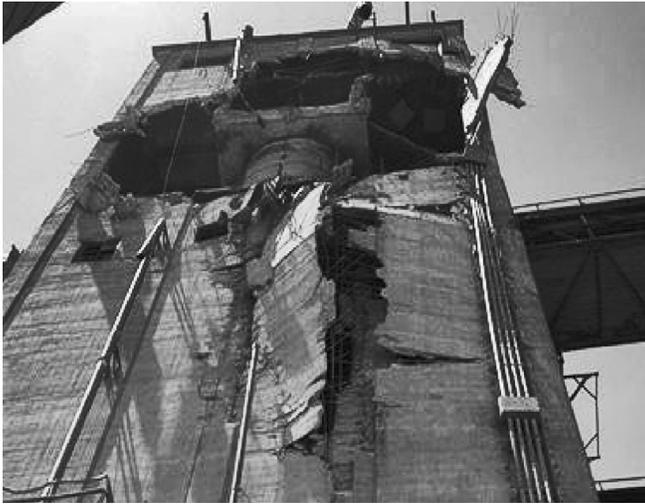
### **1.5.12 Esplosione di polveri combustibili: DeBruce Grain Co. (USA), 1998**

L'impianto DeBruce Grain Co. possedeva all'epoca dell'incidente, avvenuto nel 1998, una capacità tale da contenere il grano necessario per produrre pane sufficiente a soddisfare le necessità dell'intera popolazione americana per circa un mese e mezzo. Era costituito da n. 246 silos cilindrici sistemati in file affiancate. L'incidente causò il decesso di 7 persone ed il ferimento di altre 10 (NFPA, 1999).

L'esplosione primaria si originò nel tunnel est della fila a sud, cui fecero seguito una serie di esplosioni secondarie attraverso il tunnel trasversale diramandosi nei tunnel della fila sud.

L'esplosione raggiunse poi l'edificio principale dove erano posizionati gli elevatori a tazze, propagandosi ulteriormente da lì ai restanti silos (Figura 1.6). Nella zona nord grossi frammenti delle strutture in calcestruzzo armato dei silos furono proiettate a diverse centinaia di metri.

La sorgente di innesco più probabile fu di tipo non elettrico causata da un surriscaldamento localizzato a carico di un cuscinetto mal lubrificato che generò la formazione di braci locali le quali innescarono l'ATEX presente in prossimità.

**Figura 1.6 - Lesioni all'impianto DeBruce Grain Co.**

Fonte: NFPA, 1999

### **1.5.13 Esplosione di polveri combustibili: Fabbricazione accessori per abbigliamento (Italia), 2003**

La descrizione del seguente incidente mortale è estratta dalla banca dati INFOR. MO dell'ISPESL. L'evento ebbe luogo nel 2003 in un'azienda per la fabbricazione di accessori per l'abbigliamento nella quale si effettuavano operazioni di tornitura e fresatura di bottoni in materiale plastico e naturale. Il report di incidente è il seguente:

“L'infornuto alla dipendente venne provocato dall'esplosione ed incendio dell'impianto di aspirazione delle polveri provenienti da lavorazioni meccaniche (tornitura, fresatura, taglio, foratura ecc.) di materiale plastico (acetato di cellulosa, metilmetacrilato, resina poliestere, legno) per la produzione di bottoni. L'infornuto era addetta a lavorazioni di taglio di dischi in poliestere mediante taglierina presidiata da aspirazione localizzata posta superiormente alla macchina. Contemporaneamente, all'interno della ditta, erano in atto lavori di saldatura ad elettrodo per il montaggio di un carro ponte. Tali lavori vennero condotti esattamente al di sopra delle tubazioni in lamiera metallica dell'impianto di aspirazione. L'esplosione della miscela polvere-aria contenuta nelle tubazioni risultò essere stata innescata dal contatto tra l'elettrodo e la tubazione in fase di saldatura. Del materiale incandescente attraversò la lamiera e provocò l'innescò dell'ATEX presente all'interno della tubazione. La diffusione della miscela polvere-aria presente in tutto l'impianto di aspirazione e depolverazione provocò l'esplosione a catena e l'incendio che si diffuse anche al reparto nel quale lavorava l'infornuto ed altri 6 operai/e coinvolti in misura minore.”

Anche in questo caso si rileva una stretta relazione tra operazioni di manutenzione e infornuti mortali causati da esplosioni nel luogo di lavoro.

### 1.5.14 Esplosione di polveri combustibili: Operazioni di caricamento delle polveri nell'industria farmaceutica

Un aspetto particolarmente delicato connesso all'utilizzo di polveri combustibili è relativo alle operazioni di caricamento di reattori e serbatoi con liquidi infiammabili o polveri combustibili. Quelle che seguono sono due descrizioni di incidenti tratte dalla letteratura tecnica (Esposito *et al.*, 2001, ANPA, 2000).

Il primo contributo è tratto da un report di indagine relativo ai rischi dovuti all'elettricità statica, presentato al IV congresso CONTARP<sup>11</sup>.

“L'aggiunta manuale di polveri da fusti di cartone-fibra rivestiti in polietilene è molto comune nelle industrie farmaceutiche e rappresenta un classico esempio di rischio dovuto all'accumulo di cariche elettrostatiche. Si riporta la descrizione di un incidente occorso durante il caricamento di un reattore. Due operatori caricavano un reattore da 4500 litri, rivestito in vetro, con 1000 kg di un intermedio farmaceutico in polvere. Il reattore era stato lavato con acetone in precedenza e lasciato asciugare per 24 ore. La polvere era contenuta in fusti di cartone-fibra rivestiti in polietilene. Durante il caricamento del sesto fusto accadde un'esplosione che provocò gravi ustioni ad entrambi gli operatori.

L'indagine sull'incidente comportò la valutazione delle proprietà della polvere, del solvente e dell'apparecchiatura e la constatazione che i due operatori che insieme versavano il contenuto del fusto prestando attenzione a non far cadere nel reattore il rivestimento di polietilene, come da procedura, utilizzavano calzature non antistatiche. Per completare l'indagine fu eseguita la misura della capacità del fusto e una simulazione di scarico di quella polvere al fine di determinare la tensione massima di carica dello stesso fusto.”

La seconda case history presentata è tratta dalla pubblicazione dell'ANPA relativa alla sicurezza nei reattori industriali<sup>12</sup>.

“Un'esplosione di polveri si verificò in una Ditta produttrice di principi farmaceutici durante il carico di un intermedio di un reattore inertizzato con azoto. L'intermedio è una polvere che presenta una granulometria estremamente fine ed era introdotto mediante svuotamento diretto di sacchetti di plastica garantita antistatica attraverso il boccaporto del reattore. Al termine dello svuotamento del secondo sacco, mentre l'operatore lo stava scuotendo, si verificò l'esplosione, che produsse, oltre al ferimento degli operatori, il successivo incendio della manica di aspirazione.

I fattori che contribuirono a determinare l'incidente furono connessi da un lato alle caratteristiche del materiale che era presente in uno stato fisico tale da poter dare luogo a esplosione se disperso in aria e innescato e, dall'altro, alla possibilità che il reattore non fosse stato preventivamente inertizzato o bonificato al termine della lavorazione precedente. In ogni caso, le cause furono addebitate alla presenza di una fonte d'innescò di tipo elettrostatico attribuibile al passaggio della polvere all'interno della manica di aspirazione, allo sfregamento della polvere contro i sacchetti oppure a una non perfetta messa a terra dell'impianto.”

<sup>11</sup> Si veda [www.inail.it/cms/publicazionieriviste/tuttititoli/rischio/Assisi2005/Capitolo44.pdf](http://www.inail.it/cms/publicazionieriviste/tuttititoli/rischio/Assisi2005/Capitolo44.pdf).

<sup>12</sup> Si veda [http://www.vigilfuoco.it/speciali/sicurezza/prevenzione\\_incendi/rischi\\_industriali/approfondimenti/pdf/reattori.pdf](http://www.vigilfuoco.it/speciali/sicurezza/prevenzione_incendi/rischi_industriali/approfondimenti/pdf/reattori.pdf).

### **1.5.15 Esplosione di polveri combustibili: Molino Cordero di Fossano (Italia), 2007**

Presso il Molino Cordero di Fossano (CN), il 16/07/2007 si verificarono una serie di esplosioni che causarono il decesso di cinque persone e la totale distruzione dell'impianto (Figura 1.7). Di seguito si riporta il riepilogo degli eventi che portarono a questo tragico evento, così come indicato dai periti tecnici che seguirono il processo (Marmo *et al.*, 2010).

L'esplosione ebbe luogo a seguito della necessità di scaricare una piccola quantità di prodotto precedentemente caricata in eccesso in un'autocisterna. A questo fine venne collegato lo scarico della cisterna ad un condotto metallico di ripompaggio pneumatico per mezzo di una manichetta flessibile, della lunghezza pari a 6 m, in dotazione al mezzo. La tubazione di trasporto pneumatico avrebbe dovuto convogliare il prodotto in fariniera. Tale operazione, visto il limitato quantitativo di prodotto in gioco, venne condotta con alta diluizione della farina in aria.

L'attivazione della sequenza incidentale è dunque da ricercarsi nei seguenti due fattori concomitanti:

- diluizione della polvere in ingresso che crea un'ATEX all'interno della tubazione;
- collegamento non equipotenzializzato con la manichetta isolante.

Tali fattori determinano il primo innesco elettrostatico dell'ATEX all'interno della tubazione. L'esplosione si generò rapidamente e raggiunse la fariniera, trasformando la deflagrazione interna al trasporto pneumatico in un innesco ad alta energia per il contenimento della farina. Ebbe luogo, a questo punto, la prima vera esplosione primaria in capo alla fariniera. Esplosione che rilasciò energie molto elevate, anche a causa dell'innesco ad alta energia e dell'assenza di misure adeguate di protezione contro l'esplosione del contenimento.

Come conseguenza dell'esplosione primaria, si verificano tutta una serie di esplosioni secondarie che si propagano sia lungo il vano montacarichi il quale, attraversando tutti i piani del molino, trasferì le esplosioni a tutti i piani del molino, sia verso l'alto provocando la distruzione del tetto e di parte delle strutture murarie con particolare riferimento alla parte superiore dell'edificio.

Le esplosioni propagatesi nel vano montacarichi determinano anche il cedimento delle cerniere delle strutture di sostegno dei plansichter che precipitano al suolo provocando il crollo totale dei macchinari presenti nella zona dell'azienda definita "B".

Le esplosioni secondarie si propagano, inoltre ai locali magazzino sacchi. A questi scenari di incidente si aggiunga che il rilievo dei periti evidenziò la presenza, sulla tubazione di carico, di flange deformate che certamente contribuirono anch'esse a propagare l'esplosione originata nel tubo di carico.

A seguito delle esplosioni primaria e secondarie si sviluppò un incendio generalizzato che proseguì per alcuni giorni.

Nel marzo del 2010 il Tribunale di Cuneo condannò, in primo grado, l'amministratore delegato a otto anni di reclusione per omicidio colposo plurimo, crollo colposo e omissione dolosa di cautele antinfortunistiche mentre il presidente, nonché fondatore dello stabilimento, venne condannato a 4 anni di reclusione per omicidio colposo.

**Figura 1.7 - Il Molino Cordero di Fossano dopo l’esplosione**



**1.5.16 Asfissia dovuta a gas inerti: Valero Energy Corporation (USA), 2005**

Il fatto avviene il 5 novembre 2005 presso la Valero Energy Corporation sita nel Delaware (USA). Quanto segue è un riepilogo del report dell’indagine effettuata dal CSB nel 2006<sup>13</sup>.

**Figura 1.8 - Incidente avvenuto presso Valero Energy Corporation, novembre 2005**



Fonte: CSB, 2006

Pochi giorni prima dell’incidente, il committente di uno stabilimento chimico installò un sistema temporaneo di approvvigionamento di azoto su un reattore di idrocracking oggetto di manutenzione che denomineremo in seguito reattore R1.

<sup>13</sup> Si veda [http://www.csb.gov/completed\\_investigations/docs/Valero\\_Final.pdf](http://www.csb.gov/completed_investigations/docs/Valero_Final.pdf).

Gli operatori del committente aprirono la valvola di fornitura dell'azoto una o due volte al fine di inertizzare l'R1 durante la procedura di caricamento del catalizzatore. L'azoto fuoriuscì lentamente dal reattore attraverso il passo d'uomo superiore, unico punto di caricamento del reattore. Il gas doveva proteggere dalla reazione con l'ossigeno il catalizzatore fino alla sera dell'incidente, quando venne intercettato per l'emergenza in atto. Tuttavia, contrariamente a quanto previsto dal regolamento interno del committente, non venne apposta alcuna segnalazione di pericolo che avvertisse del flussaggio di azoto in atto.

Due giorni prima dell'incidente, i lavoratori dipendenti dell'appaltatore, fornitori del catalizzatore, terminato il caricamento del reattore R1, posizionarono una tavola in legno e un telo di plastica a protezione del passo d'uomo aperto. Apposero, inoltre, un segnale di pericolo in prossimità del passo d'uomo e delimitano con un nastro rosso la zona.

Al fine di reinstallare la tubazione alla sommità dell'R1, il committente rilasciò un permesso di lavoro notturno ai dipendenti dell'appaltatore. Nel modulo di permesso di lavoro si segnalò, in corrispondenza della riga indicante il "Pericolo di presenza di azoto" l'indicazione "Non applicabile", nonostante il flussaggio di azoto fosse stato posto in essere.

Due lavoratori dell'appaltatore, rimossa la copertura in legno e plastica, pulirono la flangia del passo d'uomo (operazione necessaria all'installazione della tubazione richiesta).

Durante la pulizia del passo d'uomo, un operatore dell'appaltatore si avvide della presenza di un rotolo di nastro adesivo all'interno del reattore, circa 1,5 metri al di sotto del passo d'uomo. Gli operatori, consapevoli che i criteri di pulizia del reattore proibiscono la presenza di un rotolo di nastro all'interno del contenimento, discussero con il loro caposquadra le diverse opzioni di recupero. Un operatore entrò all'interno del reattore per il recupero dell'oggetto.

Non è tuttavia noto se volontariamente o meno. Alcuni testimoni dell'incidente, poco prima, videro, infatti, i lavoratori accovacciati intenti al recuperare l'oggetto dall'esterno con un filo dotato di un gancio all'estremità. Tale fatto orienta per la non volontarietà dell'ingresso.

In ogni caso, l'ingresso del primo lavoratore fu seguito dal secondo operatore, probabilmente allarmato della perdita di conoscenza del primo.

Il rapido allarme e l'avvio delle operazioni di recupero avvenute in meno di 10 minuti non furono purtroppo sufficienti a salvare la vita agli operai.

## 1.6 CONCLUSIONI

Alla luce delle statistiche e dei casi presentati, emerge una fondamentale differenza tra:

- il rischio di esplosione nel luogo di lavoro;
- il rischio di infortunio dovuto ad esplosioni nel luogo di lavoro, legato alla mansione svolta.

Non sempre, infatti, un rischio di infortunio significativo è accompagnato da un rilevante rischio di esplosione (inteso come combinazione tra la probabilità di accadimen-

to e l'energia complessivamente rilasciata nel corso dell'incidente). Molte lavorazioni, soprattutto nella piccola e media impresa, sono realizzate a contatto o nelle immediate vicinanze dell'ATEX (operazioni di travaso/caricamento di liquidi e polveri, verniciatura, sgrassaggio, ecc.). In queste condizioni si genera un rilevante effetto d'amplificazione dell'infortunio causato dalla collocazione dell'operatore all'interno degli effetti dell'esplosione (sovrappressione, proiezione di frammenti, fronte di fiamma), pur in assenza di rilasci rilevanti di energia.

Inoltre, come si rileva dai casi presentati, le esplosioni di polveri combustibili possono liberare energie paragonabili a quelle generate dalle esplosioni industriali che coinvolgono liquidi e gas infiammabili (presenti in particolare nel settore a rischio a incidente rilevante), pur essendo sostanze tipicamente considerate sicure (cereali, legno, zucchero, ecc.).

Come già precedentemente accennato, esiste inoltre una fondamentale differenza tra le esplosioni derivanti dalle polveri combustibili rispetto a quelle che possono avere origine da gas e vapori:

- *le polveri combustibili* generalmente trovano innesco all'interno del contenimento di processo e, generando un'esplosione primaria, si propagano all'esterno ed all'interno dell'impianto attraverso successive esplosioni secondarie.
- *i gas ed i vapori infiammabili*, prevalentemente, sono innescati in seguito ad un rilascio dal contenimento dell'impianto. Meno frequentemente l'esplosione si origina dall'interno del contenimento.

Un ulteriore aspetto da sottolineare è relativo alla notevole frequenza degli incidenti nel corso di operazioni di manutenzione industriale, probabilmente a causa della maggior presenza ed efficacia delle sorgenti di accensione in gioco (lavorazioni a fuoco, generazione di scintille, ecc.).

Dall'analisi delle statistiche di incidente accaduti nel passato si evidenzia, infine, che le sorgenti di accensione efficaci non si limitino ai soli componenti elettrici, ma possano derivare da molte altre cause (meccaniche, elettrostatiche, ecc.).



## CAPITOLO 2

### L'ESPLOSIONE, LE SOSTANZE E I PARAMETRI

**SOMMARIO:** 2.1 I parametri di esplosione – 2.2 Le miscele ibride – 2.3 Le miscele infiammabili in atmosfere arricchite d'ossigeno – 2.4 Esempi applicativi ed approfondimenti – 2.5 Parametri caratteristici di alcune sostanze

**ABSTRACT:** *Nel capitolo si introducono i principali parametri di esplosione delle miscele ATEX dovute a gas, vapori, nebbie e polveri combustibili e vengono esposti alcuni esempi applicativi e approfondimenti.*

«Se si strofina l'ambra con un panno avvengono piccoli fenomeni curiosi: si sente un crepitio, al buio si vedono scintille, pagliuzze e bruscoli di carta che vengano accostati danzano come impazziti. L'ambra in greco si chiama *electron*; fino al 1600 questi effetti non erano stati osservati su altre sostanze, e perciò sono stati chiamati effetti elettrici.»

*Primo Levi*<sup>1</sup>

Molte possono essere le conseguenze di un'esplosione che avvenga in un luogo di lavoro ed è consuetudine differenziare gli scenari di incidente a seconda che essi siano originati da rilasci di gas<sup>2</sup>, vapori, nebbie<sup>3</sup>, spray<sup>4</sup> oppure da polveri combustibili<sup>5</sup>, che presentano caratteristiche di esplosione molto differenti, nonostante la presenza di proprietà simili in termini di parametri di accensione e combustione (Eckhoff, 2005). Tutte le sostanze originate da un rilascio accidentale presentano, infatti:

- campi di esplodibilità sufficientemente definiti (LEL, UEL);
- velocità di combustione laminare;
- relazione tra turbolenza e velocità di combustione laminare;
- fenomeno di transizione tra deflagrazione e detonazione;
- rapporto di incremento di pressione in caso di esplosione isocora<sup>6</sup>;

<sup>1</sup> Levi P., *L'altrui mestiere (La forza dell'Ambra)*, Einaudi, Torino, 2006.

<sup>2</sup> Gas o vapore infiammabile: gas o vapore che, se miscelato con l'aria in determinate proporzioni, origina un'ATEX per la presenza di gas (art. 3.44, UNI CEI EN 13237).

<sup>3</sup> Nebbia infiammabile: goccioline di liquido infiammabile disperse in aria in modo da formare un'ATEX (art. 3.47, UNI CEI EN 13237).

<sup>4</sup> Le diffusioni di goccioline con diametri  $d > 100 \mu\text{m}$  sono definibili spray, mentre quelle con diametro inferiore si classificano come nebbie (Hattwig *et al.*, 2004). In genere gli spray si originano da emissioni ad alta pressione mentre le nebbie da condensazioni di vapori.

<sup>5</sup> Polvere: piccole particelle solide presenti nell'atmosfera, che si depositano sotto il loro stesso peso, ma che possono rimanere nell'aria per un certo periodo di tempo. Generalmente la dimensione massima delle particelle non è maggiore di 0,5 mm (art. 3.19, UNI CEI EN 13237).

<sup>6</sup> In generale si può affermare che il rapporto tra le pressioni  $P/P_0$  in una combustione isocora risulta pari a circa 8. Analogamente il caso di combustione isobara, nella quale è il rapporto tra i volumi  $V/V_0$  ad essere circa uguale a 8.

- rapporto di incremento di volume in caso di esplosione isobara;
- minima energia di accensione (MIE);
- temperatura di accensione per date condizione di test.

Queste similarità hanno portato molti autori ed enti normativi a concludere che le esplosioni di gas/vapori risultino assimilabili a quelle derivanti da ATEX generate da polveri combustibili. Così non è.

A fronte delle analogie indicate sono presenti differenze sostanziali.

Una prima distinzione è legata all'intima miscelazione che avviene tra gas e vapori con l'aria comburente, in particolare in zone confinate e a ridotta ventilazione. La concentrazione dei gas e vapori con l'aria permane costante nel tempo in assenza di ventilazione<sup>7</sup>; tale fenomeno non è analogo per le polveri e le gocce di liquidi (spray e nebbie) che manifestano invece un moto controllato da forze di inerzia e gravitazionali che non hanno alcuna influenza nella miscelazione di gas e vapori. La sensibilità a tali forze risulta inoltre strettamente dipendente dal diametro di polveri e gocce e della velocità locale dell'aria.

Un'ulteriore diversità tra i comportamenti è legata alla presenza di una certa turbolenza locale dell'aria; questo parametro, mentre nei gas e vapori non modifica le concentrazioni di regime eventualmente già raggiunte, con le polveri aumenta la durata della sospensione (e quindi la durata connessa all'esplosività delle stesse). Nel caso di spray nebulizzati dà invece luogo ad un fenomeno di coalescenza della nebulizzazione che richiede, necessariamente, ulteriori approfondimenti da parte dell'analista.

Inoltre, mentre è possibile trasportare gas e liquidi infiammabili in assenza di comburente, il convogliamento delle polveri combustibili necessita sempre di un gas vettore che generalmente è aria (molto costoso, infatti, risulterebbe l'utilizzo di gas inerti quali azoto e CO<sub>2</sub>).

Infine, lo stoccaggio: per i gas e vapori è possibile effettuare tale operazione tenendo sotto controllo i parametri sensibili come la *concentrazione media* della sostanza in aria, operazione che con le polveri oltre ad essere difficoltosa, risulta inaffidabile. Infatti, mentre la rilevazione localizzata della concentrazione dei gas presenti in uno stoccaggio può essere sufficientemente rappresentativa della concentrazione che si registra in tutto il volume chiuso, per le polveri questa considerazione non possiede la medesima valenza.

Ad ogni modo, a prescindere dalle differenze indicate, nell'ambito dell'analisi delle esplosioni industriali è consuetudine, comunque, procedere ad una caratterizzazione delle sostanze pericolose attraverso parametri quantitativi che permettano di classificare ogni aspetto legato alla stabilità o reattività della sostanza analizzata. Nel seguito si propone una sintesi dei principali parametri utilizzati per quantificare il rischio di esplosione nelle sostanze/miscele allo stato di liquido, vapore, nebbia, spray o polvere combustibile.

<sup>7</sup> Tale affermazione è sicuramente verificata per le miscele gas/aria. Le miscele vapore/aria possiederanno gradienti di concentrazione legati soprattutto alle diversità di densità tra comburente e combustibile.

## 2.1 I PARAMETRI DI ESPLOSIONE

### 2.1.1 I limiti di esplosione

I limiti di esplosione rappresentano i confini del campo di esplosione nel quale la concentrazione della sostanza infiammabile nell'aria può dar luogo ad un'esplosione (deflagrazione o detonazione). Esiste pertanto un limite inferiore di esplosione (LEL, Lower Explosion Limit) e un limite superiore di esplosione (UEL, Upper Explosion Limit).

I limiti di esplosione sono misurati in miscela con l'aria. Tali limiti, nel caso di gas, vapori e nebbie, si modificano al variare delle condizioni al contorno nelle quali sono misurati. In particolare:

- l'aumento della concentrazione di ossigeno amplia notevolmente l'UEL, e quindi il campo di esplosione, mentre ha scarsa influenza sul LEL (Figura 2.1);
- un aumento di temperatura tende ad aumentare il campo di esplosione con un incremento dell'UEL;
- un aumento deciso del campo di esplosione si registra invece con l'aumento della pressione che determina un forte spostamento dell'UEL.

Alcune equazioni empiriche permettono di correlare i limiti di esplosione alla temperatura (Zabetakis *et al.*, 1959; Crowl *et al.*, 2002):

$$\text{LEL} = \text{LEL}_{25} - \frac{0,75}{\Delta H_c} (T - 25) \quad 2.1$$

$$\text{UEL} = \text{UEL}_{25} + \frac{0,75}{\Delta H_c} (T - 25) \quad 2.2$$

dove:

$\Delta H_c$  è il calore netto di combustione (kcal/mole)

$T$  è la temperatura (°C)

Il pedice 25 indica il riferimento alla temperatura dell'ambiente

Anche la pressione influenza il campo di esplosione, con la modifica dell'UEL, secondo la seguente relazione (Zabetakis, 1965; Crowl *et al.*, 2002):

$$\text{UEL}_p = \text{UEL} + 20,6 \cdot (\text{Log } P + 1) \quad 2.3$$

dove:

$P$  è la pressione (MPa assoluti)

I limiti di esplosione (LEL, UEL) si esprimono generalmente in % o in g/m<sup>3</sup>. Nel caso di miscele ATEX composte da più sostanze infiammabili, il LEL (e UEL) complessivo si determina con l'ausilio della legge di Le Chatelier (eq. 2.4)

$$\text{LEL}_{\text{miscela}} = \frac{1}{\sum_{i=1}^n \frac{y_i}{\text{LEL}_i}} \quad 2.4$$

Dove  $y_i$  è la frazione molare o volumetrica della  $i$ -esima sostanza.

Nel caso delle polveri combustibili il solo limite di esplosione comunemente rilevato è il LEL, essendo l'UEL poco utilizzato nella corrente pratica applicativa (risulta difficile realizzare il monitoraggio della concentrazione delle polveri, soprattutto all'interno dei contenimenti). In genere, l'UEL supera il LEL di almeno due ordini di grandezza essendo compreso tra 2 e 3 kg/m<sup>3</sup>.

Anche il LEL nelle polveri varia al variare delle condizioni ambientali e di condizione granulometrica. I principali motivi di modifica sono i seguenti:

- un aumento della percentuale di ossigeno tende a far diminuire il LEL delle polveri combustibili;
- il LEL diminuisce al diminuire del diametro medio delle polveri combustibili.

Il LEL nelle polveri combustibili è generalmente espresso in g/m<sup>3</sup> e risulta frequentemente compreso tra 15 e 30 g/m<sup>3</sup>.

Nel caso di spray e nebbie i parametri LEL e UEL non risultano adeguati alla comprensione e classificazione del fenomeno legato alla formazione di ATEX. In ogni caso gli spray ( $d > 100 \mu\text{m}$ ) e le nebbie ( $d < 100 \mu\text{m}$ ) con concentrazioni in massa superiori a 40 g/m<sup>3</sup> sono esplosive (Hattwig *et al.*, 2004)<sup>8</sup>.

La presenza di nebbie e spray influenza, dunque, i limiti di infiammabilità già indicati per i gas e vapori. Per sospensioni con diametri medi di goccia inferiori a 0,01 mm, il LEL risulta sostanzialmente analogo a quello della stessa sostanza in forma di vapore. Questo fenomeno risulta altresì presente anche alle basse temperature, in assenza dei vapori della sostanza infiammabile. Nebbie di questa tipologia di dimensione si formano molto spesso durante le fasi di condensazione dei vapori.

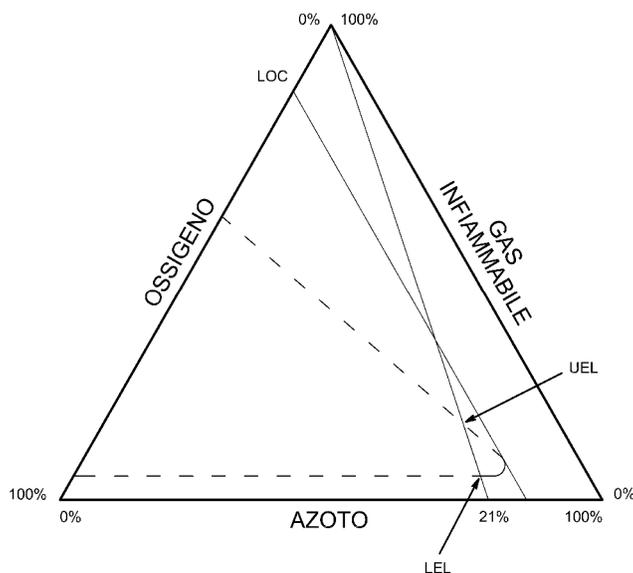
Per spray generati meccanicamente, aventi diametro medio di goccia compreso tra 0,01 mm e 0,2 mm, il LEL diminuisce con l'aumentare del diametro della goccia. Dati sperimentali evidenziano come, in corrispondenza dei diametri medi di goccia più elevati, il LEL dello spray risulta pari a meno di un decimo del LEL del vapore corrispondente. Infine, quando gli spray raggiungono diametri medi di goccia compresi tra 0,6 mm e 1,5 mm, la propagazione della fiamma risulta inibita.

La normativa di riferimento per l'esecuzione dei test è la seguente: UNI EN 1839 (LEL e UEL per gas e vapori), UNI EN 14034-3 (LEL per polveri combustibili).

Il LEL (per gas/vapori) risulta generalmente utilizzato per il dimensionamento dei sistemi di controllo di esplosione mentre l'UEL (per gas/vapori) risulta utile nel caso si voglia evitare il campo di esplosione utilizzando la strategia di saturazione dei vapori in serbatoi di stoccaggio di infiammabili. Il LEL delle polveri può essere utile a determinare la presenza o meno dell'ATEX in flussi pneumatici di trasporto.

<sup>8</sup> La linea guida CEI 31-35 suggerisce, a questo proposito che: "L'infiammabilità della nebbia dipende sia dalla concentrazione in aria (gocce e vapori), sia dalla volatilità, sia dalle dimensioni delle gocce all'interno della nube. La dimensione delle gocce dipende, sia dalla pressione alla quale il liquido viene rilasciato, sia dalle proprietà del liquido (in primo luogo dalla massa volumica, dalla tensione superficiale e dalla viscosità), sia dalle dimensioni, sia dalla forma dell'apertura da cui avviene l'emissione. Normalmente, elevate pressioni e piccole aperture contribuiscono alla formazione di un getto di liquido con un grado di atomizzazione tale da determinare un pericolo d'esplosione. D'altra parte, piccolissime aperture di emissione determinano piccolissime portate di emissione così da ridurre detto pericolo. È stato dimostrato che la porzione della nube di nebbia più facile da accendere è quella contenente aerosol (diametri inferiori a 50 micron). Comunque, l'aerosol generalmente è solo una piccola frazione dell'emissione totale. Questa frazione può essere aumentata se il liquido emesso sotto forma di getto colpisce una superficie nelle immediate vicinanze."

**Figura 2.1 - Diagramma di infiammabilità in condizioni di temperatura e pressione ambiente**



Fonte: Crowl *et al.*, 2002

### 2.1.2 Concentrazione limite di ossigeno (LOC)

La concentrazione limite di ossigeno (Limiting Oxygen Concentration, LOC) è la massima concentrazione di ossigeno (determinata in condizioni di prova specificate) in una miscela di sostanza infiammabile, aria e un gas inerte in corrispondenza della quale non si verifica un'esplosione.

Al di sotto del LOC la miscela non è in grado di generare una reazione che si auto-sostenga e si propaghi all'insieme della miscela incombusta. Come infatti si rileva in Figura 2.1, al di sotto della concentrazione limite di ossigeno, il campo di esplosione si chiude completamente.

Il LOC dipenderà sia dal tipo di sostanza testata sia dal gas utilizzato per la generazione dell'atmosfera inerte.

Le norme tecniche di riferimento per l'esecuzione dei test sono la ASTM E2079 per i gas e vapori e la EN 14034-4 per le polveri combustibili.

La determinazione di questo parametro è posta a fondamento delle operazioni di prevenzione dell'ATEX definite *inertizzazione*. Tale tecnica, come vedremo in seguito, si suddivide in inertizzazione per flussaggio e inertizzazione per purgaggio (in pressione o sottovuoto).

Nel caso degli idrocarburi è possibile una determinazione approssimata del LOC attraverso una procedura di calcolo semplificata che richiede la conoscenza del LEL e della stechiometria di reazione (Crowl *et al.*, 2002).

### 2.1.3 Temperatura di accensione

La temperatura di accensione rappresenta, convenzionalmente, la minima temperatura

di una superficie riscaldata in corrispondenza della quale, in condizioni specificate, avviene l'accensione di un'ATEX.

I gas e vapori presentano un'unica temperatura di accensione ( $T_i$ , Autoignition Temperature oppure  $T_{acc}$  secondo la notazione presente in CEI 31-35) mentre le polveri combustibili possiedono due tipi di temperature di accensione: la temperatura di accensione della nube di polvere ( $T_{cl}$ , Cloud Temperature) e la temperatura di accensione dello strato di polvere ( $T_{layer}$  oppure  $T_{5mm}$  nel caso di presenza di uno strato standard di polvere dello spessore pari a 5 mm).

Si sottolinea che tale parametro *non rappresenta* un aspetto univocamente definibile e sperimentalmente rilevabile. Esso infatti risulta marcatamente dipendente dalle modalità di esecuzione del test. In generale, la temperatura di accensione tende a diminuire al crescere della superficie calda esposta all'ATEX e all'aumentare della velocità con la quale l'ATEX lambisce la superficie calda. Inoltre esistono sostanze che manifestano differenti temperature di accensione in funzione del materiale con cui entrano in contatto<sup>9</sup>.

La normativa a cui fare riferimento per l'esecuzione dei test è la UNI EN 14522 (per gas/vapori) e CEI EN 50281-2-1 (per le polveri combustibili).

Per gli apparecchi elettrici, soggetti ad ATEX gas, è prevista una notazione standard che indica la massima temperatura raggiungibile dagli stessi (Tabella 2.1).

**Tabella 2.1 - Limite di temperatura superficiale e classe di temperatura dell'apparecchio elettrico**

CLASSE DI TEMPERATURA	LIMITE DI TEMPERATURA (°C)
T1	450
T2	300
T3	200
T4	135
T5	100
T6	85

La temperatura di accensione è normalmente testata grazie al riscaldamento di superfici pulite.

La temperatura di accensione rappresenta un parametro indispensabile per l'individuazione delle massime temperature superficiali degli apparecchi (elettrici e non elettrici) collocati e destinati a funzionare in atmosfera potenzialmente esplosiva.

### 2.1.4 Minima energia di accensione

La minima energia di accensione (MIE, Minimum Ignition Energy) è l'energia che, in condizioni di prova specificate, risulta in grado di innescare l'ATEX sottoposta a test. Essa rappresenta sia per i gas e vapori (Figura 2.2) sia per le polveri combustibili, un indice di sensibilità all'innescò, utile al dimensionamento degli apparecchi a sicurezza intrinseca e alla valutazione del rischio di innescò elettrostatico.

<sup>9</sup> L'idrazina, per esempio, possiede una temperatura di accensione variabile in funzione della sostanza con la quale è a contatto.