POLITECNICO DI TORINO

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Edile

Tesi di Laurea Magistrale

Approccio ingegneristico della sicurezza antincendio applicato all'esplosione: valutazioni analitiche dell'effetto da sovrapressione

Relatore:
Prof. Ing. Roberto VANCETTI

Relatore esterno:
Ing. Antonio FIDELIBUS
Professionista antincendio presso ATECOS s.r.l.

Candidato:
Ronni SEMERARO

20 Marzo 2018

Less is more

[Ludwig Mies van der Rohe]

Abstract

Security is nowadays brought to the particular attention of any kind of work activity, in which industry professionals are asked to evaluate a detailed risk-related analysis for dangerous working conditions (for workers).
Fire prevention focuses on evaluate the development of risky activities by explosion or fire. The following thesis take into account, in particular, the explosion phenomenon, in relation with the current regulatory framework and the application of an engineering approach.
The aim is providing, first of all, theoretical indications about the explosive phenomenon, in order to better understand catastrophic effects generated by explosion physics dynamics.
Moreover, It specifically underlines how often the risk of explosion is ignored. Multiple activities, non-directly related to really occurred explosion events, might be the origin dangerous conditions, and, this way, must be analyzed and de-risked. Working activities that employs inflammables, such as gasolines or gas cylinders for domestic use, industrial powders, such as metallic wastages or food industry powder, such as cacao and powdered milk.
It's critical, then, that the designed action must take into account a specific working contest and its substances, in order to determine any possible related scenarios.
The engineering approach applied to risk explosion evaluation puts, in this point of view, a process that leads to determine and estimate any explosion effects and their seriousness.
In literature, several methods fire prevention engineering designers use, are well-explained and can be employed to foresee the overpressure effect caused by explosion. In the latter chapters, these methods will be evaluated, analyzing simplified experimental analytic methods.
The present thesis is the result of a cooperation with ATECOS s.r.l. firm, in which It was possible to make a comparison to evaluate the reliability of simplified methods and the related validation level.

Sommario

Abstract **5**

Sommario **7**
Elenco delle figure **9**
Elenco delle tabelle **11**
Legenda e abbreviazioni **13**

Introduzione **17**

1. Le esplosioni **19**
1.1 Tipologie di esplosioni 21
1.1.1 Miscele di gas e vapori infiammabili 23
1.1.2 Polveri combustibili 27
1.1.3 Liquidi infiammabili e nebbie 31
1.2 Quadro normativo sulle esplosioni 34
1.3 Principi fondamentali delle esplosioni 42
1.3.1 Onda d'urto 43
1.3.1.1 Sovrapressione e pressione di picco 44
1.3.1.2 Indice di deflagrazione 46
1.3.2 Energia di rilascio 47
1.3.3 Distanza scalata 48
1.4 Tipologie di innesco 49
1.4.1 Temperatura di autoignizione 53

2. L'approccio ingegneristico alla sicurezza antincendio **55**
2.1 La progettazione prescrittiva e la progettazione prestazionale 57
2.2 Prima fase: analisi preliminare 60
2.2.1 La definizione del progetto 61
2.2.2 Gli obiettivi di sicurezza antincendio 62
2.2.3 I livelli prestazionali 62
2.2.4 Gli scenari di incendio 62
2.3 Seconda fase: analisi quantitativa 64
2.3.1 Definizione della soluzione progettuale 64
2.3.2 Modelli di calcolo 65

2.3.2.1 Modello a zone 66
2.3.2.2 Modello a campo 67
2.3.3 Risultati delle elaborazioni e la documentazione di progetto 68
2.4 Sistema di gestione della sicurezza antincendio - SGSA 69

3. Progettare in aree a rischio specifico per atmosfere esplosive 71
3.1 Analisi quantitativa del rischio esplosione 72
3.1.1 Zonizzazione delle aree 77
3.1.2 Scenari del rischio esplosione 83
3.1.2.1 Albero dei guasti 84
3.1.2.2 Albero degli eventi 86
3.2 Analisi qualitativa del rischio esplosione 87
3.3 Metodo RAMSES per la valutazione del rischio esplosione 92

4. Principi di protezione integrata 103
4.1 Misure di prevenzione 104
4.2 Misure di protezione 106
4.2.1 Progettazione resistente all'esplosione 107
4.2.2 Venting 109
4.2.3 Soppressione della deflagrazione 113
4.2.4 Isolamento della deflagrazione 115
4.2.4.1 Sistemi di isolamento attivo 115
4.2.4.2 Sistemi di isolamento passivo 117
4.3 Prescrizioni minime gestionali secondo D.Lgs. 81/2008 119

5. Metodi a confronto per la determinazione dell'effetto da sovrapressione 121
5.1 TNT Method 123
5.2 Multi-Energy Method 125
5.3 Metodo ATECOS - Released Power 129
5.4 Criteri di ponderazione dell'effetto da sovrapressione 130

6. Conclusioni 133

Bibliografia e sitografia 135

Elenco delle figure

Figura 1.1 - Numero di incidenti per fenomeno coinvolto (2007-2010) 19
Figura 1.2 - Schematizzazione della dinamica di una deflagrazione 21
Figura 1.3 - Schematizzazione della dinamica di una detonazione 22
Figura 1.4 - Triangolo di infiammabilità per i liquidi e i gas (a sinistra) e Pentagono di esplosività per le polveri (a destra) 23
Figura 1.5 - Esempio di triangolo di infiammabilità per ossigeno - gas combustibile - azoto 24
Figura 1.6 - Effetto della pressione sulle proprietà di infiammabilità 25
Figura 1.7 - Diagramma di Hausbrandt per Tensione di vapore - Temperatura 32
Figura 1.8 - Fasi di un'esplosione BLEVE: a - perdita di pressione interna; b - rapida ebollizione del liquido e aumento della pressione interna; c - decontenimento per scoppio 33
Figura 1.9 - Esempio di marcatura ATEX (sinistra) e logo specifico di prodotti per l'esplosione (destra) 38
Figura 1.10 - Curva della pressione d'onda nel tempo 43
Figura 1.11 - Effetto dell'onda di pressione nell tempo 43
Figura 1.12 - Schematizzazione della sfera da 20l 44
Figura 1.13 - Curva pressione-concentrazione per una serie ordinata di concentrazioni 45
Figura 1.14 - Curva pressione-tempo di sviluppo di un'esplosione 46
Figura 1.15 - Energia di innesco al variare della concentrazione di combustione 52

Figura 2.1 - Schematizzazione delle strategie antincendio secondo quanto previsto dal metodo dell'ingegneria 61
Figura 2.2 - Esempio di rappresentazione dell'incendio con modello a zone 67
Figura 2.3 - Esempio di rappresentazione dell'incendio con modello a campo 67

Figura 3.1 - Rappresentazione dei gradi di ventilazione: Alto (a sinistra), Medio (centro), Basso (a destra) 78
Figura 3.2 - Esempio di zonizzazione per un impianto di liquido infiammabile emesso da pompa 80
Figura 3.3 - Esempio di zonizzazione per un impianto di svuotamento sacchi 83
Figura 3.4 - Esempio di Albero dei guasti 86
Figura 3.5 - Distanze di danno stimate al variare di Pmax per una nube di volume di 1 m^3 99

Figura 4.1 - Parametro di venting C in funzione della velocità di innesco 110
Figura 4.2 - Valvole flottanti attive 116
Figura 4.3 - Valvola automatiche meccaniche ad azione rapida 116
Figura 4.4 - Valvola di arresto 116
Figura 4.5 - Schema del deviatore di fiamma 118
Figura 4.6 - Funzionamento passivo delle valvole flottanti 118
Figura 4.7 - Valvola rotativa 118

Figura 5.1 - Esplosione secondaria 121
Figura 5.2 - Curva di sovrapressione del TNT 124
Figura 5.3 - Curva di durata della fase positiva scalata nel netodo Multi-Energy 127
Figura 5.4 - Curva di sovrapressione scalata nel metodo Multi-Energy 128

Elenco delle tabelle

Tabella 1.1 - Esempi in letteratura per esplosioni da polveri 20
Tabella 1.2 - Esempi in letteratura per esplosioni da gas e vapori 20
Tabella 1.3 - Esempi in letteratura per esplosioni da reazioni chimiche incontrollate 20
Tabella 1.4 - Esempi per limiti di esplodibilità di gas e liquidi a temperatura e pressione ambiente 25
Tabella 1.5 - Limiti di infiammabilità dell'etilene in aria a pressione atmosferica e a differenti temperature 26
Tabella 1.6 - Limiti di infiammabilità dell'etilene in aria a temperatura ambiente e a differenti pressioni 26
Tabella 1.7 - Proprietà per alcune polveri combustibili 29
Tabella 1.8 - Correlazione tra i valori di K_{st} e la classe di esplodibilità 29
Tabella 1.9 - Valori di K_{st} di alcune polveri combustibili secondo NFPA 68/18 30
Tabella 1.10 - Punto di infiammabilità per alcuni liquidi 32
Tabella 1.11 - Estratto da Allegato 1 del D.Lgs. 105/2015 - Categorie delle sostanze pericolose 36
Tabella 1.12 - Valori di KSt e KG di alcuni gas e polveri combustibili secondo NFPA 68/18 47
Tabella 1.13 - Relazione dei danni a persone e cose generati da picchi di sovrapressione e relative distanze ridotte 49
Tabella 1.14 - Energia minima di accensione per alcuni combustibili 52
Tabella 1.15 - Limite di temperatura superficiale dei prodotti ATEX 53

Tabella 3.1 - Compatibilità tra le zone classificate per le atmosfere esplosive e le Categorie ATEX per la classificazione degli apparecchi, componenti e i sistemi di protezione 76
Tabella 3.2 - Determinazione del tipo di zone in base alla ventilazione e al grado di emissione 79
Tabella 3.3 - Zone pericolose per le polveri senza provvedimenti di bonifica 81
Tabella 3.4 - Zone pericoloso esterne al cono di aspirazioni delle polveri 82
Tabella 3.5 - Zone pericolose interne al cono di aspirazione delle polveri con grado di efficacia medio 82
Tabella 3.6 - Porte logiche AND e OR 85
Tabella 3.7 - Probabilità PSE di formazione dell'atmosfera esplosiva 87
Tabella 3.8 - Probabilità PINN di innesco dell'atmosfera esplosiva 88

Tabella 3.9 - Matrice di probabilità 88
Tabella 3.10 - Classificazione del fattore di pericolo 89
Tabella 3.11 - Parametri CLZONA 89
Tabella 3.12 - Parametri LESP 89
Tabella 3.13 - Parametri Kesp 90
Tabella 3.14 - Parametri FVZ 90
Tabella 3.15 - Parametri IS 90
Tabella 3.16 - Parametri FC 90
Tabella 3.17 - Classificazione del fattore di danno 91
Tabella 3.18 - Descrizione delle soglie di rischio 92
Tabella 3.19 - Parametrizzazione dell'indice di pericolo per i gas, i vapori e le nebbie 94
Tabella 3.20 - Parametrizzazione dell'indice di pericolo per le polveri 95
Tabella 3.21 - Correzioni dell'indice di pericolo per specifiche condizioni delle polveri .. 96
Tabella 3.22 - Correzioni dell'indice di pericolo sulla qualità delle fonti 95
Tabella 3.23 - Variazione del rischio dovuto alla classificazione della zona 97
Tabella 3.24 - Variazione del rischio dovuto alla probabilità per la presenza di sorgenti di accensione 97
Tabella 3.26 - Variazione del rischio dovuto alla prossimità degli operatori al volume potenzialmente esplosivo 100
Tabella 3.27 - Variazione del rischio dovuto al livello di formazione dei lavoratori 101
Tabella 3.28 - Programma degli interventi in relazione ai risultati dell'analisi RAMSES .. 101
Tabella 3.25 - Fattori di correzione della distanza di danno 102

Tabella 4.1 - Riferimenti normativi applicabili alle misure di protezione e prevenzione.. 106
Tabella 4.2 - Classificazione del MESG per i gas del Gruppo I 117

Tabella 5.1 - Categoria delle azioni dovute alle esplosioni secondo Eurocodice 1 122
Tabella 5.2 - Scelta della curva Multi-Energy in ase allo scenario di esplosione 126

Tabella 6.1 - Confronto tra metodo per la determinazione della sovrapressioni 131

Legenda e abbreviazioni

a_1 : Fattore di efficienza dell'esplosione
a_2 : Fattore di interazione fluidodinamica tra l'onda d'urto e la struttura
a_3 : Fattore di interazione tra le caratteristiche chimiche della sovrapressione e dinamiche del targhet
A_{v0} : Minima area di sfogo necessaria
As : Area della superficie interna del serbatoio
ATEX : Atmosfere esplosive
Art. : Articolo
BLEVE : Boiling liquid expanding vapor explosion
BS : British standard
C : Parametro di venting
CDF : Computational Fluid Dynamics
CEI : Comitato elettrotecnico italiano
CLZONA : Classificazione della zona
D : Danno
DDT : Deflagration to detonation transition
D.Lgs. : Decreto legislativo
D.M. : Decreto ministeriale
D.P.R. : Decreto del Presidente della Repubblica
DLF : Fattore di carico dinamico
$(dP/dT)_{max}$: Massimo rapporto incrementale di pressione
E : Energia dell'onda d'urto
E : Fattore di espansione (Formula ATECOS - Released Powered)
E_i : Energia di innesco
EFC : Evaquatori di funo e calore
ETA : Event tree analysis
F_u : Rapporto tra la sollecitazione ultima e la sollecitazione ammissibile
F_y : Rapporto tra la sollecitazione di snervamento e la sollecitazione ammissibile
FC : Fattore di confinamento
FSE : Fire safety engineering
FTA : Fault tree analysis
FVZ : Indice relativo al volume V_z pericoloso per i gas
INAIL : Istituto nazionale per l'assicurazione contro gli infortuni sul lavoro

IP_E :	Indice di pericolo per irraggiamento e onda di pressione
IP_T :	Indice di pericolo per inlazione a seguito di esplosione
IS :	Indice relativo allo spessore dello strato di polveri
K :	Fattore di dosaggio della miscela
K_G :	Indice di deflagrazione per i gas
K_{St} :	Indice di deflagrazione per le polveri
K_{esp} :	Fattore di esplodibilità dell'atmosfera
LEL :	Lower explosive limit
LESP :	Presenza di lavoratori esposti
LIT :	Minima temperatura di autoaccensione dello strato di polvere
LOC :	Limite di concentrazione dell'ossidante
M :	Massa effettiva del pannello
M_{comb} :	Massa di combustibile
M_T :	Massa di soglia del pannello
$M_{TNT(eq)}$:	Massa equivalente di TNT
MEC :	Minima concentrazione esplosiva
MIE :	Minima energia di ignizione
MIT :	Minima temperatura di autoaccensione della nube di polvere
NE :	Non esplosive
NFPA :	National fire protection association
P_{ci} :	Pressione generata dall'innesco chimico
P_{max} :	Massima pressione di esplosione
P_{MAWP} :	Pressione di deflagrazione di progetto quando l'ambiente è in pressione
P_{es} :	Pressione di esercizio stimata
P_{red} :	Massima pressione sviluppata con presenza di sistemi di protezione integrata
P_{stat} :	Pressione di combustione statica nominale
PINN :	Capacità di una sorgente di innesco
PSE :	Probabilità che possa crearsi atmosfera esplosiva
R :	Rischio stimato
R_a :	Rischio ammissibile
RAMSES :	Risk assessment methodology for workers safety against explosions
RTO :	Regola tecnica orizzontale
RTV :	Regola tecnica verticale
SGSA :	Sistema di gestione della sicurezza antincendio
TNT :	Trinitrotoluene
t :	Tempo di persistenza della ventilazione
UEL :	Upper explosive limit
UNI :	Ente nazionale italiano di unificazione

V :	Volume del vessel
V_z :	Volume di atmosfera esplosiva
X_m :	Deformazione dinamica massima
$X_m\%$:	Concentrazione percentuale media di sostanza infiammabile in ambiente
X_s :	Deformazione statica equivalente
Z :	Distanza ridotta
z:	Distanza dal punto di innesco
η :	Fattore di efficienza
ΔH_{comb} :	Entalpia di combustione del gas infiammabile
ΔH_{TNT} :	Entalpia di decomposizione del TNT

Introduzione

La sicurezza è oggi posta alla particolare attenzione di qualsiasi attività lavorativa, nelle quali i professionisti del settore sono chiamati a valutare una dettagliata analisi di rischio legata allo svolgimento di condizioni pericolose per i lavoratori.
La sicurezza antincendio pone l'obiettivo di valutate le attività sensibili al rischio di sviluppo di incendi o esplosioni. La seguente trattazione prende in considerazione, in particolare, il fenomeno dell'esplosione, in relazione all'attuale quadro normativo in vigore con l'applicazione di un approccio ingegneristico.
Si è posto l'obiettivo di fornire, innanzitutto, le indicazioni di carattere teorico in merito al fenomeno esplosivo, per comprendere al meglio le dinamiche che legano la fisica delle esplosioni agli effetti catastrofici generati.
Si vuole, inoltre, precisare come spesso venga trascurato il rischio esplosione. Molteplici attività, non direttamente ricondotte a eventi esplosivi realmente accaduti, possono essere fonte di condizioni pericolose e come tali devono essere analizzate e poste in sicurezza. Fanno riferimento a questi sia le lavorazioni che prevedono l'utilizzo di sostanze infiammabili, quali per esempio benzine o bombole di gas per uso domestico, sia polveri industriali, come sfridi metallici, o polveri provenienti dall'industria alimentare, quali cacao o polvere di latte.
È importante, quindi, che l'azione progettuale debba prendere in considerazione uno specifico contesto lavorativo e le sostanze in esse coinvolte, fino a determinare i possibili scenari a questo connesso.
L'appoccio ingegneristico applicato alla valutazione del rischio esplosione dispone, in quest'ottica, un processo che conduce alla determinazione degli effetti provocati dal fenomeno esplosivo e a stimare la loro gravità.
In letteratura sono rese note alcune metodologie che il progettista antincendio può adottare per prevedere l'effetto da sovrapressione generato da un'esplosione. Nei capitoli conclusivi verranno valutate queste tecniche, mettendo a confronto i metodi analitici semplificati di natura sperimentale.
Questa tesi è il risultato di una collaborazione con l'azienda ATECOS s.r.l. presso il quale è stata possibile condurre un confronto per valutare l'affidabilità dei metodi semplificati e il grado di validazione ad essi associati.

1. Le esplosioni

La prima esplosione di cui si ha traccia si è verificata in Italia nel 1785 in un mulino per la produzione di farina. Statistiche recenti[1] condotte in Gran Bretagna, Germania e America indicano che incendi per esplosioni accadono frequentemente nelle industrie manifatturiere e, *in generis*, nei processi lavorativi a contatto con polveri, gas o vapori presenti anche tra i più comuni incidenti di natura domestica.
I fenomeni esplosivi portano, generalmente, a effetti gravosi sia in merito alla salute del lavoratore, primo fondamentale aspetto da prendere in considerazione, sia per l'economia dell'attività.
La sicurezza negli ambienti di lavoro, alla base della legislazione italiana e delle norme che governano le attività lavorative, considera la problematica delle esplosioni dedicandogli un intero titolo (il Titolo XI) all'interno del corpo normativo più importante, il Decreto Legislativo n. 81 del 2008.
In questo capitolo, saranno approfondite le varie tipologie di esplosioni e gli inneschi che le causano, con particolare interesse agli effetti che si manifestano; verranno inoltre riportati alcuni parametri di controllo per la valutazione del rischio nelle aree soggette all'utilizzo di atmosfere esplosive.
Si farà riferimento a un ampio quadro legislativo fatto da disposizioni normative di origine nazionale, europeo e internazionale, con l'obiettivo specifico e comune di ridurre al minimo gli effetti involontari di un'esplosione sui soggetti coinvolti in attività a rischio.
Con l'introduzione nel codice di prevenzione antincendio, D.M. 3 agosto 2015, della regola tecnica verticale in merito ad aree a rischio specifico per atmosfere esplosive, viene fornito un utile strumento per il progettista che sia chiamato a valutare gli effetti delle esplosioni sulle strutture e a indicare tutte le misure di prevenzione e protezione necessarie, secondo una progettazione ingegneristica di tipo prestazionale.

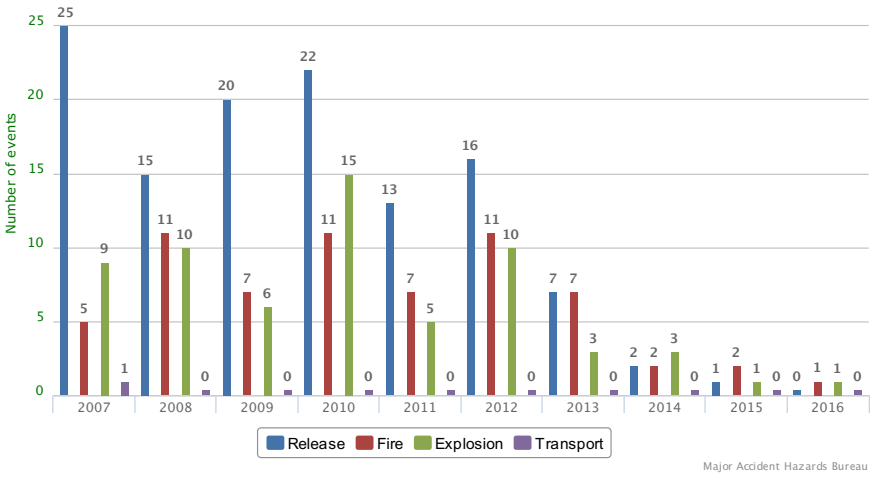


Figura 1.1 - Numero di incidenti per fenomeno coinvolto (2007-2010)

1 Statistiche su fonte Arpa Piemonte. Si veda il grafico in Figura 1.1.

ANNO	LUOGO	ATTIVITÀ COINVOLTA	CONSEGUENZE
1785	Italia (Torino)	Mulino	n.n.
1878	Francia	Fabbrica di coloranti	6 morti
1907	USA	Miniera di carbone	1148 morti
1919	USA	Fabbrica di amido	43 morti
1973	Norvegia	Produzione esplosivi	5 morti
1985	Argentina	Deposito di grano	22 morti
1989	Italia (Guardiagrele)	Mulino	8 morti
1995	USA	Impianto chimico	5 morti
1998	USA	Deposito di grano	7 morti
2001	Italia (Vigliano Biellese)	Stabilimento tessile	3 morti
2007	Italia (Fossano)	Mulino	5 morti
2008	USA	Zuccherificio	4 morti

Tabella 1.1 - Esempi in letteratura per esplosioni da polveri

ANNO	LUOGO	GAS O VAPORE INFIAMMABILE COINVOLTO	CONSEGUENZE
1948	Germania	Dimetiletilene	207 morti, 3818 feriti
1970	USA	Propano	10 feriti
1974	UK	Cicloesano	28 morti, 36 feriti
1980	Paesi Bassi	Propano	0 morti, 0 feriti
1989	Russia	Gas liquidi naturali	645 morti, >1000 feriti

Tabella 1.2 - Esempi in letteratura per esplosioni da gas e vapori

ANNO	LUOGO	CAUSA DELL'INCIDENTE	CONSEGUENZE
1997	Giappone	Un'eccessiva concentrazione di sodio bicarbonato ha ridotto la temperatura di inizio reazione	37 persone contaminate da radiazioni
1998	USA	Ritardo dei reattori di raffreddamento e inadeguato azione del vent	9 feriti
1999	USA	Eccessiva concentrazione di materiale instabile	5 morti, 14 feriti
2000	Giappone	Eccessiva concentrazione di materiali instabili e alta concentrazione di ferro	4 morti, 58 feriti

Tabella 1.3 - Esempi in letteratura per esplosioni da reazioni chimiche incontrollate

1.1 Tipologie di esplosioni

Il termine esplosione è usato in generale per definire una serie di differenti processi chimici o fisici. Nello specifico, in letteratura viene spesso riconosciuta l'esplosione come un "*improvviso rilascio di energia immagazzinata che comporta la rapida generazione di onde di pressione potenzialmente pericolose*"[2]. Di seguito si cercherà di approfondire tale definizione.
È possibile, innanzitutto, classificare le esplosioni secondo due principali distinzioni in relazione ai suoi effetti. Possono verificarsi esplosioni di tipo fisico o esplosioni di tipo chimico.
Le esplosioni fisiche sono comunemente note come scoppi. Questi si verificano a seguito di rapidi incrementi di pressione di un fluido confinato in breve tempo, che comporta la rottura meccanica del contenitore senza il coinvolgimento di reazioni chimiche.
Più comuni sono le esplosioni con reazioni fisico-chimiche. Sono particolarmente diffuse tra le attività industriali che prevedono l'utilizzo di materiali finemente lavorati o depositi di sfridi infiammabili. Queste possono essere, a loro volta, fonte di una ulteriore classificazione che caratterizza il fenomeno secondo la velocità di propagazione del fronte di fiamma. I riferimenti normativi in merito alle esplosioni distinguono queste secondo due definizioni: deflagrazione e detonazione.
Viene definita deflagrazione, anche nota come esplosione di primo grado, una reazione di espansione con propagazione della zona di combustione dal punto di ignizione con una velocità media minore della velocità del suono[3] (da 10 a 1000 m/s); con il termine detonazione, anche detta esplosione di secondo grado, si definisce invece il risultato di una combustione che procede con velocità media maggiore della velocità del suono (da 1000 a 9000 m/s).
I due fenomeni non differiscono solo per la velocità di propagazione, bensì si distinguono anche in merito al sistema di propagazione tra l'onda di pressione rispetto all'onda di combustione. Nel primo caso l'onda di pressione viaggia con velocità diversa rispetto all'onda di combustione e la sovrapressione media registrata sul fronte dell'onda è di alcuni bar, con un incremento di pressione che avviene uniformemente per tutto l'ambiente in cui si genera. Per le detonazioni, invece, le due onde risultano pressochè accoppiate e i valori di sovrapressione a cavallo dell'onda di pressione sono di alcune decine di bar, con un incremento di pressione estremamente non uniforme.

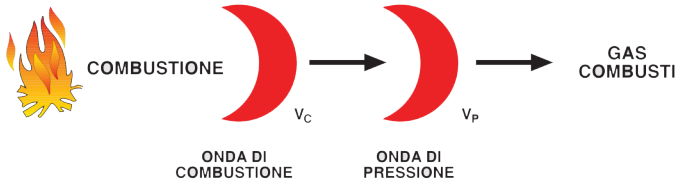


Figura 1.2 - Schematizzazione della dinamica di una deflagrazione

2 Definizione tratta da Fire Protection Handbook , Section 2, Chapter 8, "Explosions".
3 Nell'aria la velocità del suono è di 331 m/s a 0 °C e di 343,8 m/s a 20 °C

Figura 1.3 - Schematizzazione della dinamica di una detonazione

Sempre secondo la classificazione delle esplosioni in merito alla loro velocità di propagazione, è riconosciuta in letteratura l'esplosione per quasi-detonazione, a indicare quando la velocità della fiamma è leggermente minore della velocità del suono e l'aumento di pressione non è uniforme in ambiente.

Con quale probabilità è più frequente che avvenga una detonazione piuttosto che una deflagrazione? Sono state riscontrate nella storia più esplosioni di deflagrazione che fenomeni di detonazione, ma questo non deve essere indice di carattere probabilistico. Bensì il verificarsi di un fenomeno di detonazione piuttosto che uno di deflagrazione avviene in relazione ai seguenti parametri:

- la velocità di reazione;
- la presenza di ostruzione o il grado di rugosità delle pareti se la miscela attraversa una condotta;
- il diametro della condotta;
- pressione e temperatura iniziale;
- livello di turbolenza iniziale.

Agire su questi parametri può pertanto comportare la transizione da una condizione deflagrante a una detonante (DDT - Deflagration to Detonation Transition).

Viene spesso riconosciuta una seconda distinzione delle esplosioni fisico-chimiche. Tale classificazione segue l'origine del combustibile.

Il D.Lsg. 9 aprile 2008, n. 81, all'art 288 nel Titolo XI (*Protezione da atmosfere esplosive*), definisce un'atmosfera esplosiva come "una miscela con l'aria, a condizioni atmosferiche[4], di sostanze infiammabili allo stato di gas, vapori, nebbie o polveri in cui, dopo l'accensione, la combustione si propaga nell'insieme della miscela incombusta".

È quindi possibile ricondurre il fenomeno dell'esplosione a una serie di parametri legati alla natura della miscela in aria.

Nei capitoli successivi verranno approfondite le seguenti sostanze infiammabili che possono verificarsi in particolari ambienti di lavoro:

4 "Per condizioni atmosferiche si intendono condizioni nelle quali la concentrazione di ossigeno nell'atmosfera è approssimativamente del 21 per cento e che inducono variazioni di pressione e temperatura al di sopra e al di sotto dei livelli di riferimento, denominate condizioni atmosferiche normali (pressione pari a 101325 Pa, temperatura pari a 293 K), purchè tali variazioni abbiano un effetto trascurabile sulle proprietà esplosive della sostanza infiammabile o combustibile", Articolo 288 - "Definizioni", comma 1_bis.

- miscele di gas e vapori infiammabili;
- polveri combustibili;
- liquidi infiammabili e nebbie

Il fenomeno dell'esplosione, però, non avviene solo a seguito della presenza di una o più miscele sopra riportate. Affinchè possa verificarsi un'esplosione è necessario che la miscela infiammabile sia confinata; se la reazione non avviene in uno spazio chiuso, questa non darà luogo a un'esplosione, ma a una combustione veloce che non genera significative onde di pressione ma solo una radiazioni termica istantanea, *flash fire*. Affinchè si possa verificare un'esplosione è inoltre necessaria la coesistenza di ulteriori specifiche condizioni. Si parla di "triangolo di infiammabilità" (e conseguentemente di esplosività) per i combustibili liquidi e gassosi, e di "pentagono dell'esplosione" per raffigurare le cinque condizioni necessarie per rientrare nel dominio di esplosività per le polveri.

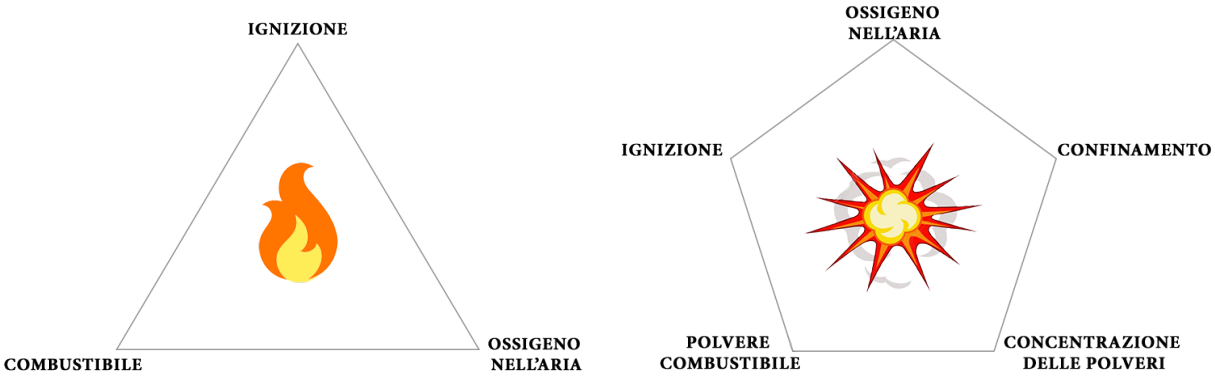


Figura 1.4 - Triangolo di infiammabilità per i liquidi e i gas (a sinistra) e Pentagono di esplosività per le polveri (a destra)

Nei capitoli successivi verranno approfondite i domini di esplosività per gas, vapori e polveri a partire dalle condizioni dei grafici appena presentati.

1.1.1 Miscele di gas e vapori infiammabili

L'ignizione di una miscela gas-aria normalmente determina una deflagrazione. Quando un gas racchiuso in un ambiente confinato, uniformemente distribuito in presenza del comburente, tipicamente rappresentato dall'aria, viene innescato, si genera una reazione chimica esotermica con sviluppo di pressione e aumento di temperatura interna.

Lo sviluppo di un'esplosione da gas o vapori infiammabili è soggetta a specifiche composizioni della miscela. Come precedentemente accennato, per i gas e i vapori deve verificarsi la coesistenza di una sorgente di innesco sottoposta a concentrazioni di un combustibile, di un ossidante e di un inerte, tali per cui la miscela da questa composta rientri nel dominio di infiammabilità, o campo di esplosività. Questo principio viene proposto graficamente secondo il "Triangolo di

infiammabilità", che riporta sui lati dello stesso le variazioni di concentrazione, in percentuale di volume, dei tre componenti. L'ossidante è tipicamente l'aria, o altre specie di ossidanti presenti, mentre il gas inerte è il componente non associato all'aria in atmosfera.

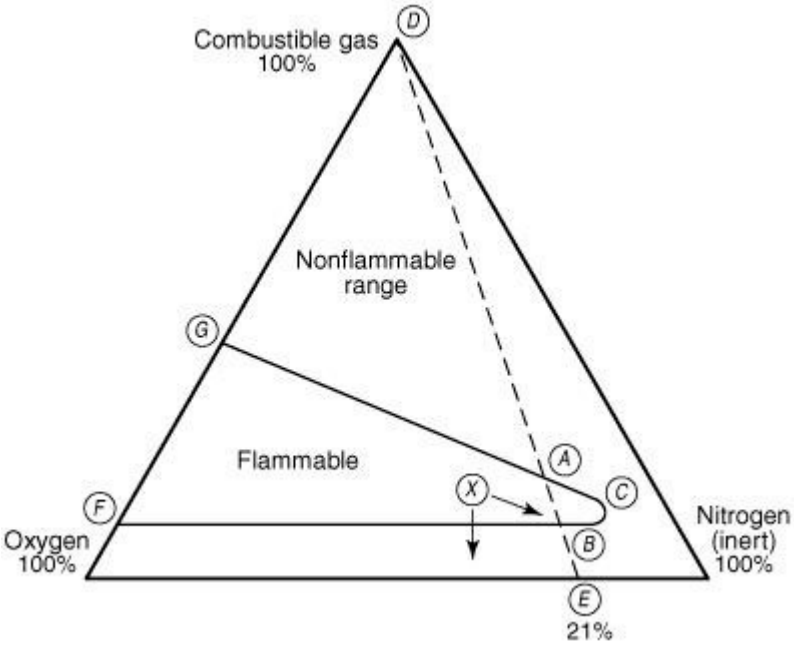


Figura 1.5 - Esempio di triangolo di infiammabilità per ossigeno - gas combustibile - azoto

Con questa rappresentazione è possibile determinare la concentrazione di un componente note le quantità in volume delle altre due come differenza del totale:

$$\%O_2 = 100\% - \%Gas - \%Inerte$$

Si riporta in Figura 1.5 un diagramma, a titolo esemplificativo, in merito alla miscela ossigeno-gas-azoto sul quale è possibile tracciare l'area rappresentante le possibili combinazioni infiammabili di questa miscela ossigeno-combustibile-componente inerte.
Il campo di esplosività, caratteristico per le miscele infiammabili, viene rappresentato sul digramma triangolare come la regione delimitata dai punti che rappresentano il valore massimo e il valore minimo di concentrazione di combustibile, entro la quale, per mezzo di un innesco, si sviluppa l'esplosione, posta costante la concentrazione di ossigeno e di inerte.
Consideriamo, con riferimento all'esempio proposto in Figura 1.5, una miscela di aria pura (21% di O_2 e 79% di N_2) e infiniti valori di gas combustibile rappresentato dalla linea DABE. I valori in corrispondenza dei punti A e B indicano, rispettivamente, il limite superiore di infiammabilità e il limite inferiore di infiammabilità.
Il limite superiore di infiammabilità, noto con l'acronimo UEL - *Upper Explosive Limit*, rappresenta la massima concentrazione di infiammabile nella miscela aria-combustibile, che può

reagire in termini esplosivi. Allo stesso modo il limite inferiore di esplodibilità, dall'acronimo LEL - *Lower Explosive Limit*, invece, ne rappresenta l'estremo inferiore.
Il campo di esplosività può essere molto ampio in certe miscele, ma altrettanto ristretto in altre, rendendo più sicura la manipolazione di tali combustibili. Si porta di seguito i limiti per alcune miscele di gas o liquidi[5] infiammabili a titolo esemplificativo[6].

MISCELA	Aria		O_2		Cl_2		N_2O		NO	
	LEL [%]	UEL [%]	LEL [%]	UEL [%]	LEL [%]	UEL [%]	LEL [%]	UEL [%]	LEL [%]	UEL [%]
Metano	5	15	5,1	61	5,6	70	4,3	22,9	8,6	21,7
Etano	3	12,4	3	66	6,1	58	-	-	-	-
Etilene	2,7	36	2,9	80	-	-	1,9	40	-	-
Idrogeno	4	75	4	94	4	89	3	84	6,6	66
Benzena	1,3	7,9	-	-	-	-	-	-	-	-

Tabella 1.4 - Esempi per limiti di esplodibilità di gas e liquidi a temperatura e pressione ambiente

Il punto C rappresenta il limite di concentrazione dell'ossidante, LOC, sotto il quale l'ignizione non può avvenire per mancanza di carburante. Una delle tecniche di prevenzione per le miscele combustibili prevede di agire sul limite di concentrazione dell'ossidante. Tale tecnica è definita inertizzazione e consiste nell'aggiunta di sostanze inerti (solitamente vengono usati azoto e biossido di carbonio) nella miscela infiammabile, riducendo il tenore di ossigeno in atmosfera fino a portare la composizione fuori dal campo di esplodibilità. L'inertizzazione quindi prevede due fasi sequenziali: prima il ricambio dell'atmosfera nel recipiente aspirando aria e sostituendola con il gas inerte, poi monitorare il tenore di ossigeno interno al di sotto del LOC compensando eventuali perdite di inerte.
Durante il processo produttivo, che vede coinvolte le miscele di gas o di vapori, è necessario fare particolare attenzione alle fasi di avvio e

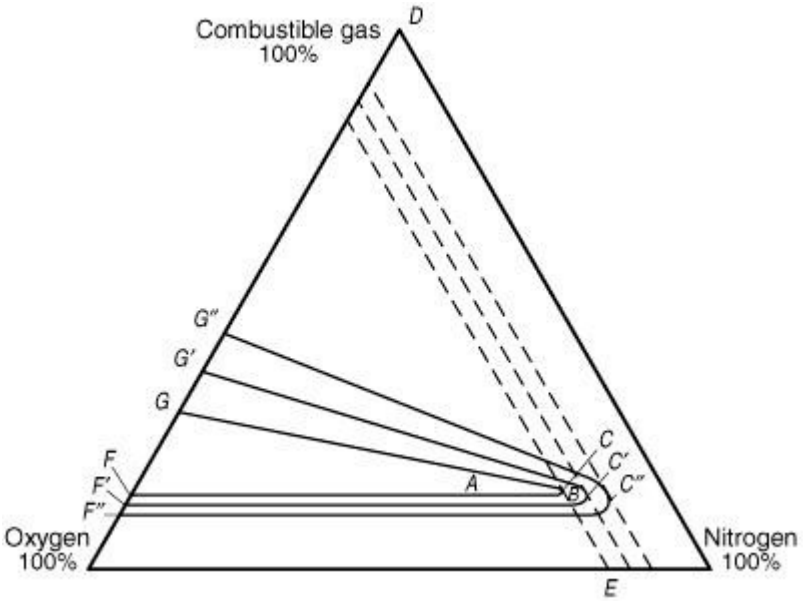


Figura 1.6 - Effetto della pressione sulle proprietà di infiammabilità

5 In tale capitolo i riferimenti a liquidi infiammabili è da intendersi in relazione al volume di vapore di combustibile generato dall'innesco.
6 Dati su fonte Stazione sperimentale per i combustibili.

di spegnimento della produzione in cui la concentrazione della miscela transita nella zona infiammabile.
L'azione di prevenzione nei confronti dei gas e dei vapori infiammabili può essere ottenuta, quindi, spostando la concentrazione di combustibile al di fuori del campo di esplodibilità, oppure andando a ridurre la concentrazione degli ossidanti con la tecnica di inertizzazione.
Le proprietà di infiammabilità del materiale genericamente dipendono dalla temperatura e dalla pressione. Un aumento di pressione, con osservazioni simili anche per l'effetto della temperatura, riporta un incremento del limite superiore di infiammabilità, un lieve decremento del limite inferiore e una riduzione del limite della concentrazione dell'ossidante (Figura 1.6).
Nella Tabella 1.5 vengono riportati, a titolo esemplificativo, i limiti di infiammabilità dell'etilene in aria a pressione atmosferica e secondo condizioni differenti di temperatura.

TEMPERATURA [°C]	LEL [%]	UEL [%]
25	2,7	36
100	2,5	43
250	2,2	58

Tabella 1.5 - Limiti di infiammabilità dell'etilene in aria a pressione atmosferica e a differenti temperature

Nella Tabella 1.6, invece, si riportano i diversi limiti di infiammabilità dell'etilene in aria a temperatura ambiente e al variare dei livelli di pressione.

PRESSIONE [atm]	LEL [%]	UEL [%]
1	2,7	36
5	2,6	48
10	2,5	58

Tabella 1.6 - Limiti di infiammabilità dell'etilene in aria a temperatura ambiente e a differenti pressioni

Qualora il combustibile sia costituito da una miscela di più solventi, e non solo da un unico composto, si può ricorrere alla formula di Le Chatelier che, partendo dai limiti dei singoli composti, determina quelli della miscela.

$$LEL = \frac{100}{(c1/LEL1) + (c2/LEL2) + ... + (cn/LELn)}$$

Dove:

- LEL è il limite inferiore di infiammabilità della miscela in aria;
- c1, c2, ... cn sono le percentuali con cui ciascun combustibile è presente in miscela, senza aria nè gas inerti;
- LEL1, LEL2, ... LELn sono i corrispettivi limiti inferiori di infiammabilità.

1.1.2 Polveri combustibili

Una statistica condotta da *Health and Safety Executive* ha evidenziato che in Gran Bretagna, tra il 1979 e il 1988, si sono verificati 303 incidenti rilevanti con lo sviluppo di focolari. Di questi, 163 sono ricondotti a incendi e 140 a esplosioni per polveri combustibili, di cui la maggior parte furono causati da inneschi per frizione meccanica, surriscaldamento spontaneo, esposizione a fiamme libere.

Gli iter per la produzione di molteplici prodotti industriali prevedono processi che comportano la manipolazione o la formazione di polveri per lo più combustibili. La definizione di polvere combustibile è riconducibile a materiali solidi finemente suddivisi e dispersi in aria, ed è applicabile pertanto sia a sostanze normate come pericolose (polvere di alluminio o altri metalli, preparati farmaceutici, etc) sia a sostanze non pericolose (farine, latte in polvere, zucchero, polvere di legno, etc).

La maggior parte delle polveri organiche (circa il 70%) sono combustibili e, a seconda delle circostanze in cui si verifica il processo di combustione, si possono sviluppare incendi o esplosioni. Affinchè si verifichi un'esplosione è necessario, però, che in uno spazio confinato una certa quantità di polvere combustibile finemente suddivisa sia dispersa nell'atmosfera, in concentrazione sufficiente, in presenza di una sorgente di ignizione (innesco) efficace. La fiamma generata dall'innesco si propaga attraverso la nube di polvere mediante i gas prodotti della combustione, rilasciando energia sotto forma di calore. Questo provoca una reazione a catena tra i particolati di polvere e un'espansione dei prodotti gassosi della combustione, portando ad un aumento della pressione interna nel volume chiuso, e quindi all'esplosione.

Risulta, secondo quanto appena detto, che un parametro significativo per le esplosioni da polveri combustibili consiste nella granulometria del particolato stesso, e quindi dalla superficie su cui avviene il trasferimento di calore e su cui reagiscono i prodotti della combustione generati dall'innesco.

Analogamente al "triangolo di infiammabilità", che definisce le condizioni di innesco per le miscele di gas o liquidi combustibili, per le nubi di polvere ci si riferisce al "pentagono dell'esplosione". È necessario, quindi, prendere in considerazione le seguenti cinque condizioni affinchè possa verificarsi l'esplosione da polveri:

- le polveri devono essere combustibili e sufficientemente fini;
- le polveri devono essere dispersi in un comburente (o ossidante), tipicamente rappresentato dall'aria;
- la nube di polvere deve entrare a contatto con una sorgente di ignizione di sufficiente energia;
- il combustibile e il comburente devono rientrare negli opportuni valori di concentrazione esplosiva;
- la miscela deve essere confinata.

La condizione sul combustibile è strettamente legata, oltre alla dimensione della particella, an-

che dall'umidità relativa nelle miscele di polveri infiammabili, che riduce la loro sensibilità all'ignizione; *in primis* perchè limita la formazione di nubi di polvere sospese in aria, in secondo luogo perchè l'umidità assorbe in parte il calore di combustione.
Il diametro delle particelle di polvere influenza anche tutti gli altri parametri con cui caratterizzare le esplosioni da polveri:

- la minima concentrazione esplosiva (MEC);
- la minima temperatura di auto accensione della nube (MIT) e dello strato (LIT);
- la minima energia di ignizione (MIE);
- il rapporto incrementale massimo di pressione $(dP/dT)_{max}$;
- la massima pressione di esplosione (P_{max}).

Al diminuire della granulometria[7] media di una polvere diminuisce l'energia minima di innesco e si abbassa la concentrazione corrispondente al limite inferiore di esplodibilità; si assiste inoltre ad un aumento della pressione massima di esplosione e della velocità di incremento della pressione e del pericolo di esplosione.
Come per i gas e i vapori, anche le polveri sono caratterizzati dai limiti di infiammabilità a rappresentare il range di concentrazione entro il quale può verificarsi l'esplosione. Il limite inferiore di esplodibilità per le polveri viene spesso chiamato MEC (Concentrazione Minima di Esplodibilità) e definisce la minima quantità di sostanza in un metro cubo di aria che porterebbe al verificarsi di un'esplosione. Questo rappresenta una maggiore valenza pratica rispetto al suo limite superiore, in quanto è più difficile ottenere nubi di polvere omogenee per valori di concentrazione sempre più alti. Per la maggior parte delle polveri il MEC rientra tra 20 e 60 g/m^3, ma anche per le polveri, come per i gas, un cambiamento di temperatura e di pressione può portare alla variazione della minima concentrazione di esplodibilità.
L'infiammabilità, o esplodibilità, di un dato materiale polveroso è fortemente variabile a seconda delle condizioni di granulometria, contenuto di umidità e composizione chimica. Pertanto è sempre necessario effettuare prove sperimentali, con condizioni al contorno specifiche, per ottenere informazioni sull'affidabilità della polvere. I valori tabulati presenti in letteratura, e riportati in Tabella 1.7, consentono di attribuire un ordine di grandezza per indicare le potenzialità delle polveri.
In merito ai valori di temperatura che portano le polveri all'innesco, oltre alla minima temperatura di accensione della nube (MIT), è necessario fare attenzione anche a quella in riferimento a uno strato di polvere. La *Layer Ignition Temperature* (LIT) rappresenta la temperatura alla quale avviene la combustione di un deposito di polvere su una piastra riscaldata, ed è genericamente funzione dello spessore dello strato di polvere depositato. Le tipologie di innesco verranno trattate successivamente all'interno di questo capitolo.

7 Evidenze sperimentali suggeriscono che particelle di dimensioni superiori a 500 μm non contribuiscono sostanzialmente alla propagazione della fiamma per gli effetti dell'inerzia termica. Il rischio diventa elevato con particelle di dimensioni pari o inferiori a 75 μm, che inoltre rimangono in sospensione per un tempo superiore.

Di seguito si riportano alcuni parametri per la caratterizzazione delle esplosioni di polveri note[8].

POLVERE	GRANDEZZA MEDIA DELLE PARTICELLE [μm]	MINIMA CONCENTRAZIONE ESPLOSIVA, MEC [g/m^3]	PRESSIONE MASSIMA [bar]
PRODOTTI AGRICOLI			
Farina di grano	28	60	9.4
Zucchero	30	200	8.5
Latte	83	60	5.8
POLVERI DI CARBONIO			
Carbone bituminoso	24	60	9.2
Carbone	15	125	7.6
Fuliggine	<10	-	7.9
POLVERI CHIMICHE			
Lattosio	23	60	7.7
Zolfo	20	30	6.8
Calcio acetato	85-92	250-500	6.5-5.2
POLVERI METALLICHE			
Alluminio	29	30	12.4
Magnesio	28	30	17.5
Zinco	10	250	6.7
POLVERI DI MATERIALE PLASTICO			
Resina epossidica	26	30	7.9
Polipropilene	25	30	8.4
Polimetilacrilato	21	30	9.4

Tabella 1.7 - Proprietà per alcune polveri combustibili

La violenza esplosiva per l'esplosione di polveri viene determinata secondo il metodo di Bartknecht, il quale lega la classe di esplosività all'indice di deflagrazione per le polveri, K_{st}, dividendole così in quattro classi di pericolo, come di seguito riportate in Tabella 1.8.

CLASSE DI ESPLODIBILITÀ	K_{st} [bar · m/s] (con un innesco da 10kJ)	K_{st} [bar · m/s] (con un innesco da 10J)	TIPO DI ESPLOSIONE
St0	0	0	Nessuna
St1	0-200	0-100	Debole
St2	200-300	100-200	Forte
St3	300	200	Molto forte

Tabella 1.8 - Correlazione tra i valori di K_{st} e la classe di esplodibilità

8 Dati rilevati da NFPA 68/02

L'indice di deflagrazione per le polveri, K_{st}, rappresenta la velocità massima di incremento della pressione nell'unità di tempo per una esplosione confinata e viene determinato dalla seguente relazione:

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

Nella tabella che segue vengono riportati il valore dell'indice per alcune polveri infiammabili determinati con prove sperimentali standardizzate.

POLVERE	**K_{st} [bar · m/s]**	**POLVERE**	**K_{st} [bar · m/s]**
PRODOTTI AGRICOLI		POLVERI DI CARBONIO	
Amido di mais	202	Carbone bituminoso	129
Zucchero	138	Carbone	47
Latte in polvere	28	Lignite	151
POLVERI CHIMICHE		POLVERI METALLICHE	
Lattosio	81	Alluminio	415
Zolfo	151	Magnesio	508
Calcio acetato	9 (o 21)	Zinco	125 (o 176)
POLVERI DI MATERIALE PLASTICO			
Resina epossidica	129		
Polipropilene	101		
Polimetilacrilato	269		

Tabella 1.9 - Valori di K_{st} di alcune polveri combustibili secondo NFPA 68/18

L'aggiunta di un gas infiammabile a una miscela aria-polvere è chiamata miscela ibrida.
La presenza del gas in una nube di polvere riduce il limite inferiore di infiammabilità e l'energia d'ignizione necessaria per dare inizio alla deflagrazione. Di contro, questa operazione incrementa il valore effettivo dell'indice K_{st}, il quale comporta un aumento della violenza esplosiva.
Allo stesso modo, tecniche di prevenzione per le esplosioni prevedono l'introduzione di un gas di tipo inerte nel volume della miscela combustibile, portando a una riduzione del rapporto incrementale della pressione e della massima pressione generabile. Quando si prende in considerazione questa tecnica di inertizzazione, devono essere tenuti in conto anche i problemi aggiuntivi in merito alla possibilità di segregazione del materiale inerte.
Questa e altre tecniche di prevenzione verranno trattate successivamente nel capitolo in riferimento ai Principi di protezione integrata.
Analizziamo, infine, un particolare caso di esplosione da polveri avvenuto in Italia.
Il 16 giugno 2000, nello stabilimento Nicomax per la pulizia e la smerigliatura di metalli a Gravellone Toce (VB), una deflagrazione venne innescata dalle scintille prodotte per effetto dello

sfregamento meccanico di un nastro abrasivo che, rompendosi, mosse un accumulo di polveri di alluminio, provocando una prima esplosione. La vampata di fiamme della prima esplosione generò la proiezione di frammenti incandescenti, i quali vennero aspirati dal sistema di ventilazione del locale e causarono l'accensione dei residui di polvere presenti nel ciclone, dando origine a un'esplosione secondaria. Questo evento fu caratterizzato da una terza esplosione. Il fronte di fiamma che ha avuto origine nel ciclone si propagò nel filtro a manica a cui questo era collegato, fino a innescare le polveri finissime presenti negli interstizi e quindi la terza esplosione, provocando la rottura del filtro e la proiezione dei frammenti fino a distanze oltre i 50m.

1.1.3 Liquidi infiammabili e nebbie

Ulteriori considerazioni sui fenomeni esplosivi sono legati a sostanze infiammabili in forma liquida.

Analogamente alle miscele di gas e vapori infiammabili, nel caso di combustibili liquidi i limiti di operatività, per l'uso di tali sostanze, possono essere indicati sia in termini di percentuale volumica sia di temperatura.

Quando la temperatura di un liquido aumenta fino a raggiungere condizioni critiche, legate alla natura del liquido stesso, viene rilasciata una quantità sufficiente di gas o vapore combustibile in grado di esplodere se in miscela con l'aria e posto a contatto con una sorgente di innesco. Il valore di temperatura minima che porterebbe a tali condizioni di pericolosità viene denominato "punto di infiammabilità", o *flash point*.

Il punto di infiammabilità è un parametro necessario per la valutazione del rischio incendio ed esplosione nei liquidi infiammabili. Consente di stabilire le condizioni di stoccaggio e di utilizzo della sostanza al fine di salvaguardare le condizioni di sicurezza sul lavoro. Per i liquidi con un punto di infiammabilità basso sono necessarie azioni di prevenzione e gestionali a supporto della sicurezza; per punti di infiammabilità superiori a 50-60°C le misure di sicurezza sono da considerarsi meno significative.

A partire dai limiti di esplodibilità per un dato liquido è possibile determinare il valore di *flash point* attraverso la tensione di vapore[9] del liquido stesso.

Si valuti il range di infiammabilità dell'acetone[10] avente LEL pari 2,6% e UEL pari a 31%. Considerando il solo limite inferiore, si ricava il valore della tensione di vapore, in riferimento alla pressione atmosferica espressa in 101,330 kPa, nel modo seguente:

$$p = (2{,}6 \cdot 101{,}330) / 100 = 2{,}63 \text{ kPa}$$

9 La tensione di vapore, o pressione di vapore, è la pressione che esercitano le particelle di vapore sulla fase condensata (solida o liquida) per un valore di temperatura all'interno di un sistema chiuso. Nel SI la pressione di vapore si misura in Pa.

10 Piccinini, N., Cardillo, P., *Gas, vapori e polveri a rischio di esplosione e incendio*, Politecnico di Torino, Stazione sperimentale per i combustibili.

Attraverso il diagramma di Hausbrandt, che riporta la tensione di vapore al variare della temperatura, è ora possibile determinare la temperatura oltre la quale il vapore sviluppato dal liquido forma con l'aria una miscela potenzialmente pericolosa, ovvero il punto di infiammabilità. Nel caso dell'acetone il *flash point* si colloca a -17 °C.
Riassumendo, se l'acetone liquido entra a contatto con l'aria a una temperatura inferiore a -17 °C, i vapori da questo prodotto non sono potenzialmente infiammabili, ovvero siamo al di sotto del limite inferiore di esplosibilità e la quantità di combustibile è insufficiente.
Si riportano di seguito alcune sostanze e i rispettivi punti di infiammabilità espressi in gradi Celsius.

LIQUIDO	LEL [%]	Punto di infiammabilità [°C]
Esano	1,2	-21
Benzene	1,3	-11
Alcol eticolo	3,3	+12
Etere etilico	1,9	-45
Acroleina	2,8	-26
Acetone	2,6	-17
Acetato etile	2,2	-4

Tabella 1.10 - Punto di infiammabilità per alcuni liquidi

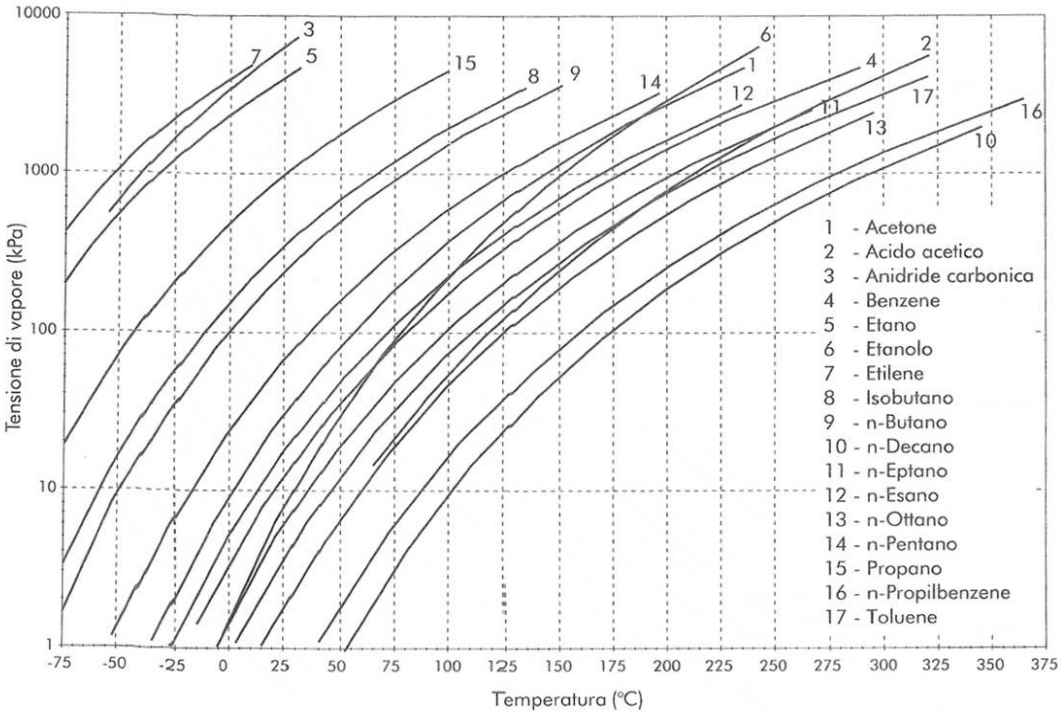


Figura 1.7 - Diagramma di Hausbrandt per Tensione di vapore - Temperatura

Il liquido può presentarsi anche disperso in aria sotto forma di gocce, con diametro variabile tra 0,5 e 10 μm. Tale condizione può verificarsi a seguito di processi di nebulizzazione o per condensazione di vapori, formando in aria concentrazioni di nebbie, tipicamente non uniformemente distribuite nel volume.
Quando il diametro delle gocce è molto piccolo, il limite inferiore di infiammabilità della nebbia coincide con quello del vapore, poichè le gocce vaporizzano completamente prima di essere interessate alla combustione.
Infine, sempre in merito alle esplosioni che coinvolgono sostanze in fase liquida, è doveroso trattare le esplosioni di vapori che si espandono a causa di una rapida ebollizione del liquido, anche note come BLEVE dall'acronimo inglese *Boiling Liquid Expanding Vapor Explosion*.
Il BLEVE è un'esplosione di tipo fisico generata dalla propagazione di un'onda d'urto, a seguito di un rapido abbassamento della pressione interna al volume del recipiente, in cui si trova un liquido in pressione con una temperatura superiore a quella di ebollizione.
A seguito di una rottura nella struttura del recipiente, legata a fenomeni corrosivi con conseguente perdita di resistenza meccanica, si verifica la fuoriuscita della fase gassosa dal volume interno (Figura 1.7a). Tale fuga di gas comporta la riduzione di pressione nel recipiente e una conseguente repentina ebollizione del liquido contenuto al suo interno (Figura 1.7b), liberando un'elevata quantità di gas vaporizzato che genera la sovrapressione dell'onda d'urto (Figura 1.7c).
Se, inoltre, il liquido è di natura infiammabile, allo scoppio segue la combustione chimica e la generazione del fronte di fiamma, *fireball*, che può riportare gravi danni all'esterno e possibili esplosioni secondarie.
Le cause che comportano lo sviluppo di un BLEVE vengono tipicamente ricondotte a un surriscaldamento del recipiente, con conseguente aumento della pressione interna, o al malfunzionamento del sistema di regolazione della pressione; entrambe le cause sono sempre legate a un deterioramento dell'involucro che determina l'iniziale decremento delle proprietà di resistenza meccanica dello stesso.

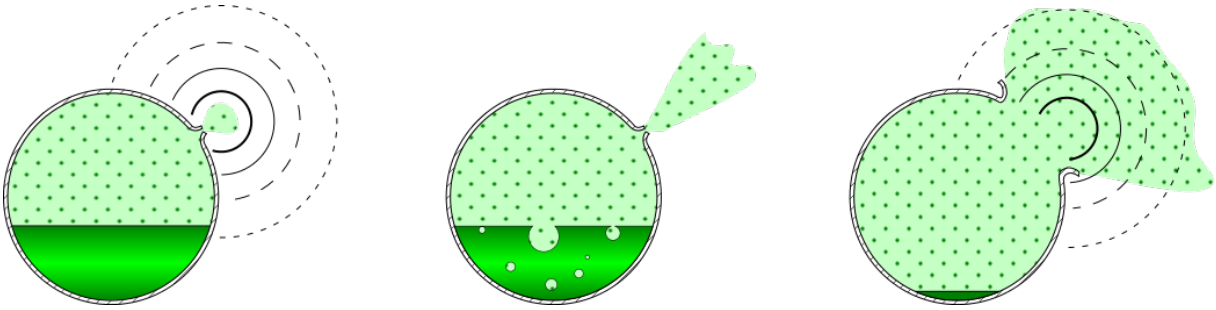


Figura 1.8 - Fasi di un'esplosione BLEVE: a - perdita di pressione interna; b - rapida ebollizione del liquido e aumento della pressione interna; c - decontenimento per scoppio

1.2 Quadro normativo sulle esplosioni

La legislazione alla base della valutazione del fenomeno esplosivo è ampia, articolata e si compone di riferimenti sia di origine nazionale, che europea e statunitense.
Le normative in materia di sicurezza, quali quelle per l'antincendio, sono il risultato della necessità di avere a disposizione una regolamentazione accurata e controllata in ambienti per attività pericolose. Come spesso avviene nella gestione delle normative tecniche, il quadro legislativo in materia esplosioni trae origine dall'incidente di Seveso, quale evento catastrofico che ha posto l'attenzione sulla necessità di avere decreti e regole tecniche a salvaguardia della sicurezza, tanto per gli esseri viventi, uomini o animali, quanto per l'ambiente, per il controllo delle attività legate all'utilizzo di sostanze pericolose.
L'incidente di Seveso promosse a livello europeo l'emanazione della Direttiva 82/501/CEE, nota anche come direttiva Seveso e recepita in Italia con il Decreto del Presidente della Repubblica del 17 maggio 1988 n. 175 nella sua prima versione, imponendo agli stati dell'Unione Europea l'identificazione dei rischi per le attività industriali. Negli anni la direttiva Seveso ebbe diversi aggiornamenti, fino all'attuale pubblicazione come Direttiva 2012/18/UE (nota anche come "Seveso III") e recepita in Italia dal 26 giugno 2015 con il Decreto Legislativo n. 105.
La Direttiva Seveso, e quindi anche D.Lgs. 105/2015, fornisce l'elenco delle sostanze pericolose interessate e delle quantità minime di utilizzo in uno stabilimento, al fine di definire i provvedimenti di sicurezza più idonei e classificare l'area sottoposta al controllo in due categorie, secondo quanto riportato dall'articolo 3 del sopracitato riferimento normativo. Sono definite:

- "Stabilimento di soglia inferiore" uno stabilimento nel quale le sostanze pericolose sono presenti in quantità compresa tra i valori di soglia indicati nell'allegato 1;
- "Stabilimento di soglia superiore" uno stabilimento nel quale le sostanze pericolose sono presenti in quantità pari o superiore alle quantità indicata dal valore di soglia superiore dell'allegato 1.

Con la Sezione "P" dell'allegato 1, il decreto riporta le sostanze definite come "Pericoli fisici", ovvero sostanze in grado di causare effetti di natura fisica. Rientrano in questa categoria gli esplosivi solidi, i gas, gli aerosol e i liquidi infiammabili, come riportati nell'estratto dell'allegato in Tabella 1.11.
Sulla base dell'incidente avvenuto a Seveso e di ulteriori eventi catastrofici, il quadro normativo sul fenomeno esplosivo è stato notevolmente sviluppato negli ultimi anni, ponendo particolare attenzione ai meccanismi di innesco, agli effetti generati dall'esplosione e alle responsabilità a carico al datore di lavoro.
Sono ora a disposizione, quindi, molteplici riferimenti legislativi a supporto del professionista antincendio specializzato nello studio delle esplosioni, che viene chiamato alla valutazione del rischio legato a specifiche lavorazioni e a sostenere una progettazione che pone in primo piano la sicurezza.

SEZIONE "P" - PERICOLI FISICI		
Categoria delle sostanze pericolose conformemente al regolamento (CE) n. 1272/2008	**Quantità limite (tonnellate) delle sostanze pericolose, di cui all'articolo 3, per l'applicazione di:**	
	Requisiti di soglia inferiore	**Requisiti di soglia superiore**
P1a ESPLOSIVI (cfr nota 8) - Esplosivi instabili, oppure - Esplosivi, divisione 1.1, 1.2, 1.3, 1.5, 1.6, oppre - Sostanze o miscele aventi proprietà esplosive in conformità al metodo A.14 del regolamento (CE) n. 440/2008 (cfr. nota 9) e che non fanno parti delle classi di pericolo dei perossidi organici e delle sostanze o miscele autoreattive	10	50
P1b ESPLOSIVI (cfr. nota 8) Esplosivi, divisione 1.4 (cfr. nota 10)	50	200
P2 GAS INFIAMMABILI Gas infiammabili, categoria 1 o 2	10	50
P3a AEROSOL INFIAMMABILI (crf. 11.1) Aerosol "infiammabili" della categoria 1 o 2, contenenti gas infiammabili di categoria 1 o 2 o liquidi infiammabili di categoria 1	150 (peso netto)	500 (peso netto)
P3b AEROSOL INFIAMMABILI (crf. nota 11.1) Aerosol "infiammabili" della categoria 1 o 2, non contenenti gas infiammabili di categoria 1 o 2 nè liquidi infiammabili di categoria 1 (crf. nota 11.2)	5000 (peso netto)	50000 (peso netto)
P4 GAS COMBURENTI Gas comburenti, categoria 1	50	200
P5a LIQUIDI INFIAMMABILI - Liquidi infiammabili, categoria 1, oppure - Liquidi infiammabili, categoria 2 o 3 mantenuti a una temperatura superiore al loro punto di ebollizione, oppure - Altri liquidi con punti di infiammabilità ≤ 60°C, mantenuti a una temperatura superiore al loro punto di ebollizione (crf. nota12)	10	50
P5b LIQUIDI INFIAMMABILI - Liquidi infiammabili di categoria 2 o 3 qualora particolari condizioni di utilizzazione, come la forte pressione o l'elevata temperatura, possano comportare il pericolo di incidenti rilevanti, oppure - Altri liquidi con punti di infiammabilità ≤ 60°C qualora particolari condizioni di utilizzazione, come la forte pressione o l'elevata temperatura, possano comportare il pericolo di incidenti rilevanti (cfr. nota 12)	50	200
P5c LIQUIDI INFIAMMABILI Liquidi infiammabili, categoria 2 o 3, non compresi in P5a e P5b	5000	50000
P6a SOSTANZE E MISCELE AUTOREATTIVE E PEROSSIDI ORGANICI Sostanze e miscele autoreattive, tipo A o B, oppure Perossidi organici, tipo A o B	10	50

P6b SOSTANZE E MISCELE AUTOREATTIVE E PEROSSIDI ORGANICI Sostanze e miscele autoreattive, tipo C, D E o F, oppure Perossidi organici, tipo C, D, E o F	50	200
P7 LIQUIDI E SOLIDI PIROFORICI Liquidi piroforici, cetegoria 1 Solidi piroforici, categoria 1	50	200
P8 LIQUIDI E SOLIDI COMBURENTI Liquidi comburenti, categoria 1, 2 o 3, oppure Solidi comburenti, categoria 1, 2 o 3	50	200

Tabella 1.11 - Estratto da Allegato 1 del D.Lgs. 105/2015 - Categorie delle sostanze pericolose

Sono a disposizione del progettista direttive europee, normative nazionali e regole tecniche, che seppur non hanno carattere cogente, sono un utile strumento per la progettazione a regola d'arte.
Le più note in ambito di rischio esplosione e atmosfere potenzialmente esplosive sono le Direttive ATEX e le norme armonizzate a queste associate.
Nella valutazione del rischio esplosione la Direttiva 1999/92/CE, anche nota come ATEX 137 o Direttiva sociale, prescrive i requisiti minimi per il miglioramento della tutela, della sicurezza e della salute dei lavoratori esposti al rischio di atmosfere esplosive.
Questo riferimento normativo non trova applicazione nelle aree destinate a cure mediche, in applicazioni dove è previsto l'uso di apparecchiature a gas, nella produzione, stoccaggio, uso e manipolazione di sostanze chimicamente instabili, o in ambienti destinati all'estrazione di minerali.
Tale normativa prevede, come indicato dall'Articolo 3 tra gli obblighi del datore di lavoro, l'adozione di misure tecniche e/o organizzative adeguate al tipo di azienda secondo il seguente ordine di priorità:

- Prevenire la formazione di atmosfere esplosive, se la natura dell'attività lo consente;
- Evitare l'ignizione di atmosfere esplosive;
- Attenuare i danni di un'esplosione in modo da garantire la salute e la sicurezza dei lavoratori.

A tal proposito, il datore di lavoro, nell'assoluzione dei suoi obblighi, è tenuto a effettuare un'analisi del rischio esplosione che prende in considerazione, secondo quanto preposto dall'Articolo 4 della suddetta normativa, i seguenti elementi:

- probabilità e durata della presenza di atmosfere esplosive;
- probabilità della presenza, dell'attivazione e dell'efficacia di fonti di ignizione, comprese scariche elettrostatiche;
- caratteristiche dell'impianto, sostanze utilizzate, processo e loro possibili interazioni;
- entità degli effetti prevedibili.

L'analisi deve inoltre valutare la complessità dell'impianto e i luoghi di connessione dal punto di

innesco, per prevedere la formazione di esplosioni secondarie.
Viene indicata inoltre una prima distinzione tra le aree in cui possono formarsi atmosfere esplosive. L'Allegato 1 della Direttiva ATEX 99/92/CE suddivide il rischio esplosione in tre aree, in relazione alla frequenza e alla presenza di atmosfere esplosive:

- Zona 0, 1, 2 per gas, vapori e nebbie;
- Zona 20, 21, 22 per nubi di polvere.

Sulla base di questa ripartizione, gli Allegati II e III della stessa normativa forniscono, rispettivamente, i livelli di provvedimenti da applicare nell'area individuata dall'analisi condotta dal datore di lavoro e la rispettiva segnaletica per indicarne il pericolo.
Nel Capitolo 3 di questa trattazione verrà approfondita la zonizzazione delle aree a rischio esplosione e i provvedimenti minimi associati a esse.
La Direttiva ATEX 2014/34/UE è invece una normativa di prodotto. Viene recepita dal D.Lgs. n. 85 del 19/5/2016 e sostituisce la precedente Direttiva 94/9/CE recepita dal DRP 126/98.
Tale riferimento normativo prescrive l'installazione di apparecchi, elettrici e non, e di sistemi di protezione aventi categoria compatibile con la classificazione delle aree, ma non trova applicazione per le apparecchiature mediche o destinate a impieghi domestici e non commerciali, ad attrezzature di protezione individuale, ai mezzi di trasporto su via terrestre, aerea o navale, e, ancora, ad apparecchi e sistemi di protezione se il pericolo di esplosione è dovuto esclusivamente alla presenza di materiale chimico instabile.
Questa direttiva indica i principi comuni di sicurezza disposti sugli apparecchi e i sistemi di protezione alle esplosioni, per il quale deve essere evitato, innanzitutto, che i prodotti producano o liberano essi stessi atmosfere esplosive. Qualora sia inevitabile tale condizione, l'apparecchio deve impedire che possa generarsi l'innesco all'interno di esso e, qualora, malgrado tutto, si produca un'esplosione, allora questa deve essere contenuta e/o soffocata all'interno del sistema. In conformità con queste condizioni generali, l'Allegato I di questa direttiva propone la classificazione in categorie per ogni gruppo di apparecchi, a determinare il livello di protezione associato.
Per il gruppo di apparecchi I, si classificano in categoria M1 i mezzi di protezione speciali che garantiscono un livello di sicurezza molto elevato. Questi apparecchi sono idonei ai lavori nelle miniere e rimangono operativi anche in caso di guasti eccezionali, con la presenza di mezzi di protezione secondari indipendenti. Nel gruppo di apparecchi I si riporta anche la categoria M2, a indicare i mezzi che forniscono un livello di protezione elevato nel garantire la protezione richiesta durante un normale funzionamento. Questi apparecchi sono caratterizzati, inoltre, da essere soggetti a un'improvvisa interruzione di energia qualora sottoposti alla presenza di atmosfere esplosive.
Il gruppo di apparecchi II classifica i prodotti secondo mezzi di categoria 1, categoria 2 e categoria 3, in relazione alla frequenza di formazione di un'atmosfera esplosiva. I primi, alla pari della categoria M1 del gruppo I, vengono usati per garantire un livello di protezione molto elevato in ambienti in cui si rileva sempre, spesso o per lunghi periodi, un'atmosfera esplosiva. I secondi

garantiscono un livello di protezione elevato in ambienti in cui la formazione di concentrazioni pericolose di gas, vapori, nebbie o polveri in miscela risulta con probabilità non trascurabile. Gli ultimi possono essere applicati per garantire un livello di protezione normale in ambienti in cui risulta scarsa la probabilità, e solo per brevi periodi, della formazione di atmosfere potenzialmente esplosive.
Gli apparecchi di categoria M1, M2 e 1, 2, 3 devono soddisfare i requisiti supplementari di cui all'allegato 2 dello stesso riferimento normativo.
L'allegato 2 alla Direttiva ATEX 2014/34/UE indica, quali requisiti generali per l'utilizzo di un prodotto in condizioni di rischio per le atmosfere esplosive, le specifiche in merito alla marcatura e alla verifica di conformità dell'apparecchio e le istruzioni d'uso ad esso correlate.
Sugli apparecchi e sui sistemi di protezione applicati in ambienti a rischio esplosione devono figurare in modo leggibile e indelebile i riferimenti indicati in Figura 1.9. Deve raffigurare la denominazione commerciale e l'indirizzo del fabbricante, deve inoltre essere posta la marchiatura CE[11], l'anno di costruzione, il marchio specifico di protezione dalle esplosioni (Figura 1.9 destra), seguito dal simbolo del gruppo di apparecchi e della categoria con una lettera che fa riferimento all'origine dell'atmosfera esplosiva (per i gruppi di apparecchi II: "G" per atmosfere esplosive di origine gassosa, vapori o nebbie, "D" se dovuti dalla presenza di polveri).

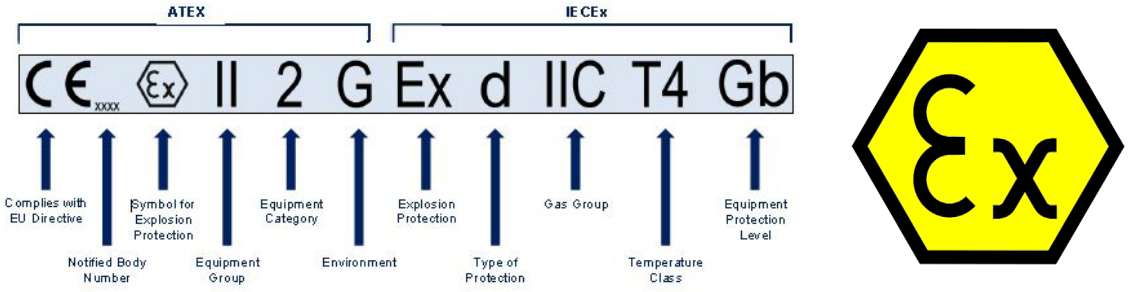


Figura 1.9 - Esempio di marcatura ATEX (sinistra) e logo specifico di prodotti per l'esplosione (destra)

Le Direttive ATEX sono affiancate da un insieme di riferimenti attuativi detti norme armonizzate. Queste completano le direttive nei contenuti, esplicitando le norme necessarie all'applicabilità delle stesse. Fanno parte di questo quadro normativo la EN 14373:2005 (*Sistemi di soppressione delle esplosioni*) e la EN 14491:2012 (*Sistemi di protezione mediante sfogo dell'esplosione di polveri*), o anche i riferimenti per la determinazione delle proprietà legate all'esplosione quali la EN 1127-1:2011 (*Atmosfere esplosive - Prevenzione dell'esplosione e protezione contro l'esplosione - parte 1: Concetti fondamentali e metodologia*) e la EN 14034-4:2004+A1:2011 (*Determinazione delle caratteristiche di esplosioni di nubi di polvere - parte 4: Determinazione della concentrazione limite di ossigeno LOC di nubi di polvere*).
L'elenco delle norme ai sensi delle Direttive ATEX vengono aggiornate periodicamente e pubbli-

11 Ai sensi del Regolamento (CE) n. 765/2008 del Parlamento Europeo e del Consiglio in materia di accreditamento e vigilanza del mercato per la commercializzazione dei prodotti.

cate sulla gazzetta ufficiale dell'Unione europea, a cura della Commissione nell'ambito dell'applicazione della direttiva 2014/34/UE del Parlamento europeo e del Consiglio per l'armonizzazione delle legislazioni per gli Stati membri.
Alcune di queste trovano riscontro anche nelle corrispettive legislazioni estere, quali l'ente normativo britannico che emana le British Standards (BS) e l'organo di normazione statunitense per la sicurezza antincendio che dispone le NFPA, dal suo acronimo *National Fire Protection Association*.
Tutte le aziende che gestiscono o immagazzinano sostanze potenzialmente infiammabili possono essere esposte al pericolo di un'esplosione. A tal proposito, le responsabilità di tipo civile e penale sulla salute e la sicurezza dei lavoratori è a carico del Datore di Lavoro, e i doveri che questo è tenuto a rispettare sono regolamentati in Italia dal Decreto Legislativo n. 81 del 9 aprile 2008, *Testo unico sulla salute e sicurezza sul lavoro*. Il Titolo XI del D.Lgs. n. 81/08 - *Protezione da atmosfere esplosive* recepisce la direttiva ATEX 1999/92/CE.
Il Titolo XI dispone, tra gli obblighi del datore di lavoro, la stesura e l'aggiornamento di un documento chiamato "Documento sulla protezione contro le esplosioni". Questo riferimento deve essere compilato prima dell'inizio dei lavori ed essere aggiornato qualora vengano apportate modifiche. Deve inoltre precisare, come indicato dall'Art. 294 al suddetto titolo, quanto segue:

- che i rischi di esplosione sono stati individuati e valutati;
- che saranno prese misure adeguate per raggiungere gli obiettivi;
- quali sono i luoghi che sono stati classificati nelle zone[12];
- quali sono i luoghi in cui si applicano le prescrizioni minime[13];
- che i luoghi e le attrezzature di lavoro, compresi i dispositivi di allarme, sono concepiti, impiegati e mantenuti in efficienza tenendo nel debito conto la sicurezza;
- che sono stati adottati gli accorgimenti per l'impiego sicuro di attrezzature di lavoro;

Nell'ambito degli obblighi preposti al datore di lavoro, l'Art. 294-bis dispone le attività di informazione e formazione dei lavoratori esposti al rischio di esplosione, in relazione al risultato della valutazione dei rischi. In particolare i lavoratori dovranno essere a conoscenza delle misure adottate, della segnaletica e degli allarmi ottico/acustici utilizzati. Devono essere formati, inoltre, sui rischi connessi alla presenza dei sistemi di protezione e di prevenzione stessi, con particolare riferimento al pericolo di asfissia, e ai rischi connessi alla manipolazione e al travaso di liquidi infiammabili e alle polveri combustibili.
La prevenzione incendi, anche in materia di esplosioni, deve quindi essere disciplinata sia da regole tecniche che da misure organizzative-gestionali.
Come si effettua un'analisi del rischio esplosione in presenza di atmosfere esplosive? Come il professionista antincendio prendere in considerazione l'azione dell'esplosione, e i possibili effetti ad esso associati, in fase di progettazione?
Una procedura innovativa per la valutazione del rischio esplosione viene a far parte della proget-

12 Secondo quanto indicato all'Allegato XLIX del D.Lgs. n.81 9 Aprile 2008.
13 Secondo quanto indicato all'Allegato L del D.Lgs. n.81 9 Aprile 2008.

tazione alla sicurezza antincendio soltanto con l'introduzione del Decreto Ministeriale 3 agosto 2015, noto come Nuovo codice di prevenzione incendi.
Il D.M. 3 agosto 2015 prende forma a partire dal D.M. 9 maggio 2007. Si presenta come una Regola Tecnica Orizzontale, RTO, fatta da riferimenti progettuali generali per la sicurezza antincendio, e pubblica un metodo di analisi di tipo prestazionale per la valutazione del rischio incendio. Tale metodo viene definito Approccio ingegneristico e permette al professionista antincendio di valutare il livello di rischio basandosi sulle prestazioni alla base della particolare destinazione d'uso.
L'Approccio ingegneristico prevede l'individuazione di scenari probabilistici che possono verificarsi secondo le caratteristiche dell'ambiente di lavoro e di indicare la strategia antincendio più idonea a mantenere il rischio al di sotto di un valore di soglia accettabile. Tale metodo, per la sua valenza prestazionale, introduce l'utilizzo di codici di calcolo numerici quali strumenti per valutare le condizioni di sviluppo del fenomeno.
La scelta di questo metodo è tuttora ancora di tipo volontario, in quanto è legato a diversi fattori critici che condizionano l'analisi e che sono strettamente legati all'esperienza del progettista: la definizione dello scenario, i parametri di input nel software di calcolo, il mantenimento nel tempo delle condizioni gestionali. Pertanto il ministero dispone, alla pari del metodo prestazionale, la possibilità di adottare un metodo più tradizionale di tipo prescrittivo ai sensi del D.M. 10 marzo 1998.
Quest'ultimo, che riporta il titolo *Criteri generali di sicurezza antincendio e per la gestione dell'emergenza nei luoghi di lavoro*, impone in modo organico e schematico, già dalla fine dello scorso secolo, un'attenzione particolare agli aspetti della sicurezza antincendio, disponendo una valutazione di tipo qualitativo al fine di verificare se la fase progettuale sia compatibile con i parametri imposti, permettendo di misurare l'accettabilità della progettazione stessa.
In merito al fenomeno al centro di questa trattazione, l'esplosione, è doveroso precisare, però, che le indicazioni sulla valutazione del rischio sono state introdotte soltanto a seguito dell'emanazione del D.M. 3 agosto 2015. Nello specifico, la sezione V.2 riporta la regola tecnica verticale, RTV, per le aree a rischio per atmosfere esplosive.
Il Capitolo 2 - *L'approccio ingegneristico alla sicurezza antincendio* - di questo documento entrerà nel merito delle fasi previste dall'approccio ingegneristico indicate dal D.M. 9 maggio 2007, riportate anche nel D.M. 3 agosto 2015. La sezione V.2 verrà invece trattata nel Capitolo 3 - *Progettare in aree a rischio specifico per atmosfere esplosive*.
In conclusione, fanno parte del quadro legislativo per il fenomeno esplosivo anche alcune normative di carattere strutturale, che indicano come calcolare le azioni dovute da un'esplosione, in termini di pressione, per la valutazione degli effetti sulle strutture.
Fa capo a questa specifica tematica l'Eurocodice 1 parte 2-7, *Azioni sulle strutture - Azioni eccezionali dovute a impatti ed esplosioni*, riportata anche nel D.M. 14 gennaio 2008, *Norme tecniche sulle costruzioni,* più comunemente nota come NTC2008.

L'Eurocodice definisce l'esplosione come una "situazione eccezionale" durante la vita utile di una struttura, ma pur sempre tale da dover prevedere il loro effetto e le misure preventive e protettive fin dalle fasi di progettazione.
È doveroso, in questo capitolo, evidenziare inoltre che sono in continua evoluzione le ricerche in merito all'analisi per gli effetti di un'esplosione. In letteratura si riscontrano molteplici metodologie di calcolo analitico per lo studio del fenomeno: da metodi grafici che prendono in considerazione l'energia di rilascio dell'esplosione, a tecniche che mettono a confronto i risultati con un campione di riferimento o, ancora, misure che prevedono la definizione della sovrapressione di picco a partire dai principi fondamentali delle esplosioni.

1.3 Principi fondamentali delle esplosioni

Alla base del verificarsi di un'esplosione vi è la necessaria coesistenza di più componenti. Come visto precedentemente, nel caso di una miscela di gas infiammabile, affinchè avvenga un'esplosione, è necessario che una miscela termicamente instabile con opportune concentrazioni di combustibile e ossidante possa venire a contatto con un innesco efficace[14] e reagire chimicamente per dare luogo ai prodotti della combustione.
Il processo di reazione alla base di un'esplosione può essere schematizzato in due fasi. Quando l'innesco viene a contatto con il composto esplosivo in prossimità di esso, la reazione di combustione determina energia sotto forma di calore e gas di combustione, generando una palla di fuoco. Quest'ultimo ha un volume e una temperatura maggiori rispetto alle condizioni iniziali della miscela, pertanto comprime gli strati adiacenti di materiale incombusto verso l'esterno e il calore rilasciato innesca la reazione sulla miscela circostante. Il processo si ripete fino a conclusione del composto disponibile[15].
La reazione chimica di un'esplosione, quindi, può essere ricondotta a due fasi distinguibili: nella prima fase i prodotti infiammabili si combinano in una reazione esotermica della durata di alcune frazioni di secondi, fino al completo esaurimento del composto reagente e la massima estensione della palla di fuoco generata. Nella seconda fase l'energia rilasciata dalla reazione si disperde nell'ambiente in parte sotto forma di calore e per la restante parte in un'onda di sovrapressione (onda barica), propagandosi nell'ambiente e sollecitando le strutture con cui viene a contatto.
Di seguito verranno trattate le principali caratteristiche dell'onda di sovrapressione che permetterà di caratterizzare gli effetti e i danni causati da un'esplosione. Verrà quindi posta l'attenzione sul diagramma pressione-tempo, che permetterà di identificare la massima pressione generabile, e sul valore di energia dissipata, in relazione a un convenzionale esplosivo di riferimento, per valutare gli effetti dell'esplosione in funzione della distanza dall'innesco.

1.3.1 Onda d'urto

L'onda d'urto, o *blast waves*, è la propagazione delle variazioni di pressioni nell'atmosfera a seguito dell'energia rilasciata da un'esplosione. Questa rappresenta circa il 50% dell'energia esplosiva originaria ed è generata dalla compressione degli strati d'aria adiacenti da parte dei gas ad altissima pressione e temperatura.
L'onda di sovrapressione viene tipicamente rappresentato sul grafico pressione-tempo da un iniziale salto di pressione, seguito da una rarefazione graduale per la distribuzione della pressione sulla superficie sferica dell'onda di propagazione, fino a raggiungere anche valori negativi, come si denota dalla Figura1.10. Questa dipenderà quindi dalla distanza dal centro di esplosione e

14 Per identificare gli innesci efficaci si rimanda al capitolo *Tipologie di innesco*.
15 Fidelibus, A., *Appunti di fisica delle esplosioni*, ebook, 2016

dalla quantità di esplosivo coinvolto a generare il massimo valore della pressione di picco.

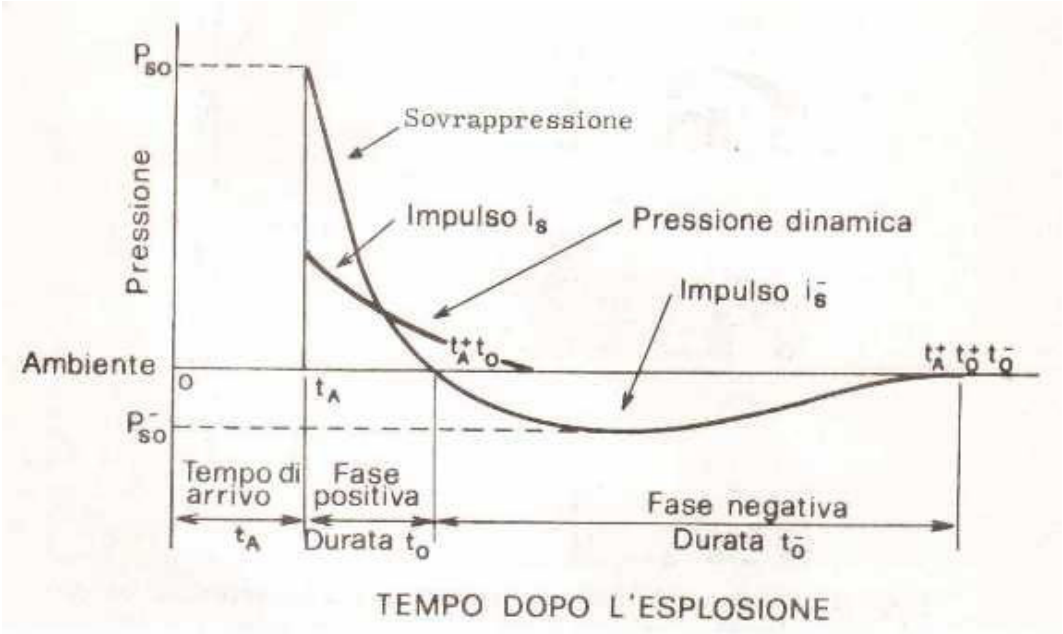


Figura 1.10 - Curva della pressione d'onda nel tempo

L'ampiezza dell'onda d'urto è definita P_{s0} e rappresenta il massimo valore di pressione raggiunto, mentre l'area tra la curva e la pressione ambientale, P_0, è denominata impulso o impulso specifico, i_s. Si distinguono due aree di impulso: dove la curva di pressione segna valori maggiori della pressione ambiente viene definito impulso positivo, i_s^+, l'area definita da valori di pressione inferiori viene definito impulso negativo i_s^-.

Sono distinguibili quindi tre momenti temporali:

- il tempo di arrivo t_A dell'onda d'urto sul punto considerato, che incrementa la pressione atmosferica fino a un valore di picco P_{so} raggiunto istantaneamente;
- la fase positiva di durata t_O che riporta in breve tempo la sovrapressione al raggiungimento della pressione di riferimento;
- dopo questo punto la pressione scende sotto il valore di riferimento con un massimo negativo in P_{so}^-, fino a riportarsi alle condizioni ambientali dopo un tempo t_O^-.

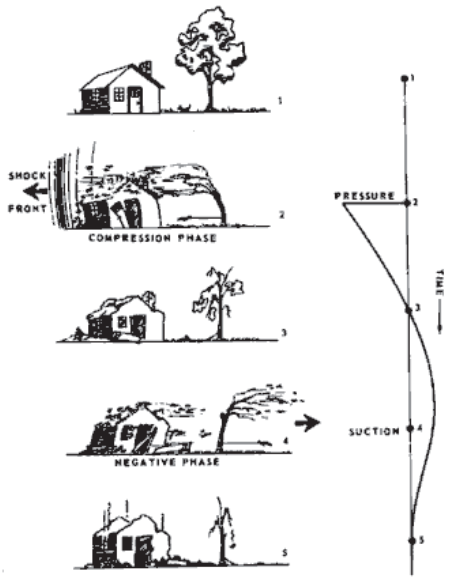


Figura 1.11 - Effetto dell'onda di pressione nel tempo

1.3.1.1 Sovrapressione e pressione di picco

Una reazione esplosiva genera principalmente, come prodotto della combustione, elevati valori di calore e di pressione. Quest'ultima però presenta sostanziali differenze a seconda della miscela infiammabile coinvolta e in merito al volume in cui l'esplosione può espandersi.
Durante una deflagrazione, tipicamente indotta dall'innesco di un miscela gas-aria, l'incremento di pressione avviene uniformemente su tutto l'ambiente con l'evoluzione dell'esplosione. Durante una detonazione, invece, l'incremento di pressione è estremamente non uniforme e avviene istantaneamente con la propagazione dell'onda d'urto.
Per determinare il valore di pressione di picco, per una data miscela, si possono adottare formule empiriche che legano tra loro le grandezze più significative di un'esplosione. Oltre ai metodi empirici, tipicamente utilizzati per la loro semplicità ed economicità, ci si può avvalere anche delle prove sperimentali condotte secondo specifiche norme tecniche oppure secondo l'utilizzo di codici numerici di CFD (*Computational Fluid Dynamics*).
Sperimentalmente, il valore di sovrapressione viene valutato attraverso una prova standardizzata in un volume di 1m^3 o, più comunemente, con una sfera di 20l. La norma UNI EN 15967:2011, *Determinazione della pressione massima di esplosione e della velocità massima di aumento della pressione di gas e vapori*, definisce i criteri per la determinazione della pressione massima per gas e vapori, mentre la norma BS EN 14034-1:2004, *Determinazione delle caratteristiche di esplosione di nubi di polvere - parte 1: Determinazione della pressione massima di esplosione pmax di nubi di polvere*, riporta gli standard per determinare la pressione massima per le polveri.
La prova sperimentale con una sfera da 20l prevede l'utilizzo di un vessel resistente all'esplosione a cui è collegato un manicotto di raffreddamento per dissipare il calore prodotto dall'esplosione, La sfera viene innanzitutto portata a una pressione iniziale di 1013mbar e il volume interno viene mantenuto a una temperatura di 20°C. Successivamente viene dispersa una polvere pressurizzata attraverso l'apertura di due valvole pressurizzate attivate elettricamente. La sorgente di ignizione è posta al centro della sfera costituito da due accenditori che genera sorgenti di energia da 5kJ l'una e che vengono attivate dopo 60ms dall'apertura della valvola di getto.

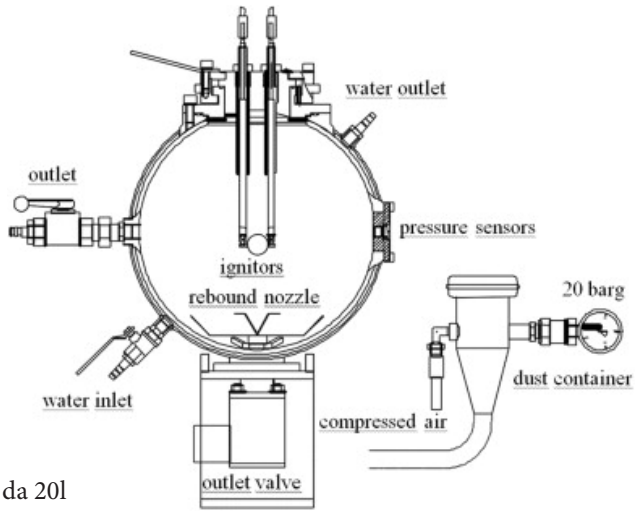


Figura 1.12 -
Schematizzazione della sfera da 20l

Il test segue le indicazioni dettate dalla normativa, procedendo con una serie ordinata di ignizioni per step di concentrazioni. Si inizia da una concentrazione pari a 250 g/m^3 e si seguono incrementi graduali di 250 g/m^3 o decrementi di circa il 50% rispetto alla precedente concentrazione, come si riporta di seguito:

... ; 60; 125; **250**; 500; 750; 1000; 1250; 1500; ... g/m^3

Per ogni step di prova si determina il valor di pressione generata dell'esplosione, P_{ex}, e si riportano su un grafico le coppie concentrazione-pressione (Figura 1.13), fino a individuare un massimo valore di pressione; questo valore definisce il P_{max} per la serie eseguita.

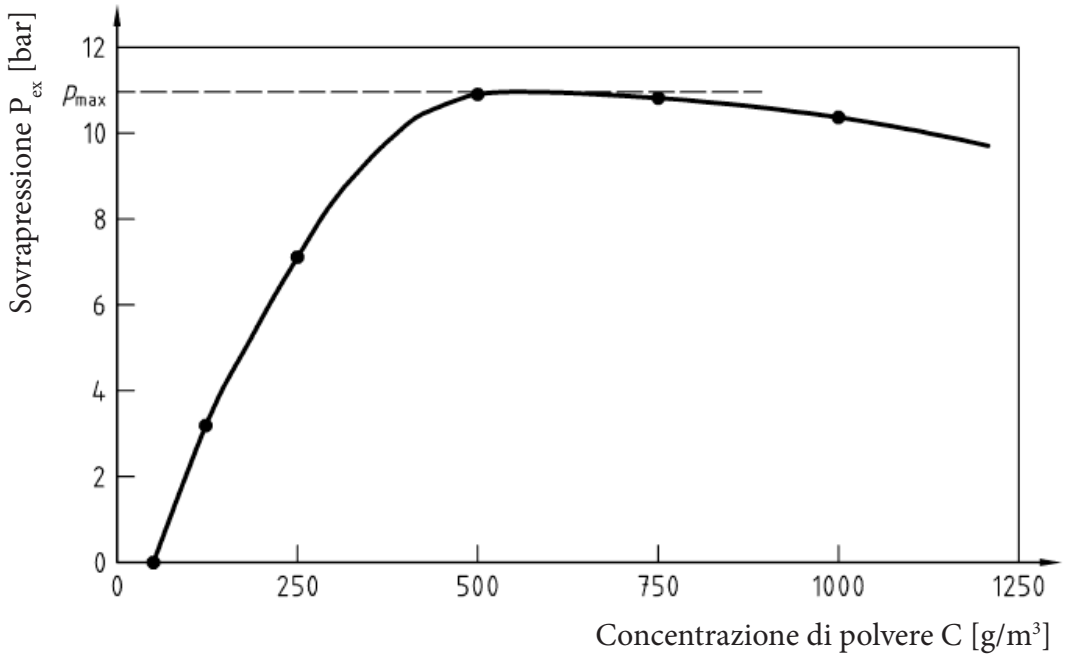


Figura 1.13 - Curva pressione-concentrazione per una serie ordinata di concentrazioni

Successivamente viene ripetuta la prova per altre due serie. Queste serviranno per mediare il valore di pressione e correggerlo dagli errori.
Per gli errori accidentali si esegue la media aritmetica come segue:

$$P_{max,\,20l} = (P_{max\,[serie1]} + P_{max\,[serie2]} + P_{max\,[serie3]}) / 3$$

Per gli errori legati all'effetto del raffreddamento si procede con la seguente equazione:

$$P_{max} = 0{,}775\ P_{max,\,20l}^{\ 1{,}15}$$

Prendendo in considerazione l'effetto di pressione causato dall'innesco chimico, per rendere la

pressione indipendente dal volume del vessel di prova, si considera la seguente correzione:

$$P_{max} = [\ 5{,}5\ (P_{max,\ 20l} - P_{ci})] / (5{,}5\ - P_{ci})$$

dove:

$$P_{ci} = (1{,}6\ E_i) / 1000$$

indicando con:

- P_{ci} la pressione generata dall'innesco chimico [bar];
- E_i l'energia di innesco [J].

1.3.1.2 Indice di deflagrazione

Le curve risultanti dalle prove sperimentali permettono inoltre di definire una costante caratteristica nella valutazione dell'esplosione: la massima velocità di incremento della pressione nel tempo, come raffigurato nella Figura 1.14.

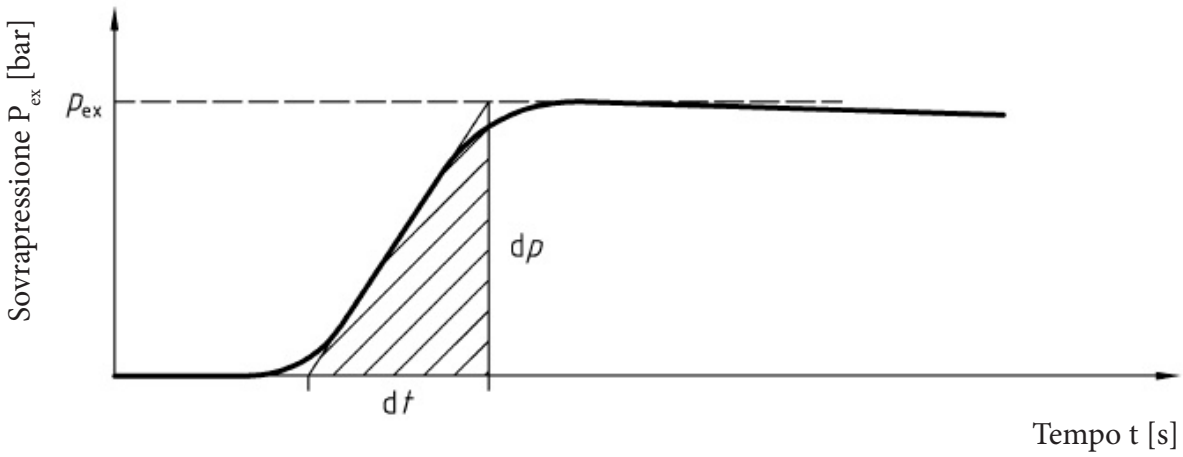


Figura 1.14 - Curva Pressione-Tempo di sviluppo di un'esplosione

Questo valore indica la violenza dell'esplosione, e viene tipicamente correlato con il volume del contenitore in cui si sviluppa per esprimere l'indice di deflagrazione rappresentato attraverso la cosiddetta Legge cubica:

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

dove:

- K è l'indice di deflagrazione [bar m/s];
- dP/dt è la massima velocità di incremento della pressione [bar/s];

- V è il volume del contenitore entro il quale avviene l'esplosione [m^3].

L'indice di deflagrazione è un valore rappresentativo tanto per i gas, i vapori e le nubi, quanto per le polveri per i loro diversi ordini di grandezza; si distinguono infatti i valori di K_G, per la prima categoria, e K_{St} per la seconda.
Una sostanziale differenza risulta nell'esecuzione della prova per la loro determinazione. Mentre per determinare l'indice di deflagrazione per i gas questi si testano in condizioni di quiete, per creare una nube di polvere è obbligatoriamente necessario produrre una turbolenza che vada a contrastare la sedimentazione del particolato polveroso.
Di seguito si riportano alcuni valori per gli indici di deflagrazione di polveri e gas.

SOSTANZA (GAS)	INDICE DI ESPLOSIONE KG [bar m/s]	DANNO	INDICE DI ESPLOSIONE KSt [bar m/s]
Acetilene	1415	Bronzo	31
Ammoniaca	10	Acetato di polivinile	86
Etanolo	78	Polistirolo	12
Etilbenzene	96	Cellulosa	66
Idrogeno	550	Farina di frumento	87
Metanolo	75	Grano	112
Propano	100	Acido tereftalico	260

Tabella 1.12 - Valori di K_{St} e K_G di alcuni gas e polveri combustibili secondo NFPA 68/18

1.3.2 Energia di rilascio

Il fenomeno esplosivo può essere schematizzato[16] secondo due fasi: nella prima hanno luogo le reazioni chimiche esotermiche delle sostanze reagenti combustibili, che hanno luogo fino alla completa espansione della palla di fuoco generata; nella seconda fase, terminate le reazioni chimiche della prima, si sviluppa un'onda di energia in termini di pressione e di calore.
Più precisamente, a seguito dell'innesco di una sorgente all'interno di una miscela esplosiva, la sostanza più vicina al punto di accensione inizierà a reagire chimicamente producendo calore e generando gas caldi che tendono ad espandersi, in quanto hanno temperatura e volume maggiore rispetto alle condizioni iniziali, contribuendo a essere innesco per gli strati di gas incombusti più esterni. Questo iter si velocizza all'aumentare degli strati di volume coinvolti, concludendosi a esaurimento della miscela coinvolta.
Si individuano, quindi, due velocità. La velocità del fronte di fiamma, s_f, che indica la velocità con la quale la superficie della palla di fuoco si propaga nella miscela gassosa, e la velocità laminare di combustione, s_c, che rappresenta la velocità di propagazione del meccanismo di reazione tra il fronte di fiamma e la miscela incombusta adiacente.
Queste due velocità sono legate dalla seguente relazione:

16 Fidelibus A., *Appunti di fisica delle esplosioni*, ebook, 2016

$$s_t = E \cdot s_c$$

Dove E indica il fattore di espansione. L'energia viene principalmente dissipata sotto forma di calore trasmesso per irraggiamento o convezione verso l'ambiente e le superfici circostanti; la restante parte, ancora molto elevata, viene a generare un'onda barica, ovvero un'onda di sovrapressione che riduce il suo effetto all'aumentare della distanza dall'epicentro dell'innesco. Questa quota di energia in termini di sovrapressione è quindi rappresentata dalla differenza tra l'energia sviluppata dall'esplosione e la quota di calore assorbito dalle geometrie circostanti e dall'incremento di temperatura dell'aria.
La misura di sovrapressione di un'esplosione, quindi, è indice dell'energia sviluppata, e viceversa e possibile legare l'energia rilasciata da un'esplosione all'effetto da sovrapressione.
Infine si osserva che se l'energia generata viene in parte consumata in calore, un'esplosione che transita in piccoli condotti, le cui superficie delle sezioni non vengono raffreddate, questa acquisisce una velocità maggiore con il rischio di DDT.
Sulla base di queste considerazioni viene condotto il Metodo ATECOS - Released power, per dimostrare una valutazione semplificativa a determinare i valori di sovrapressione secondo le caratteristiche chimico-fisiche di una miscela.

1.3.3 Distanza scalata

La perturbazione dell'onda d'urto generata dall'esplosione si propaga nel volume circostante riducendo il valore della pressione di picco con l'aumentare della distanza dal punto di innesco. Alcuni modelli ideali correlano la distanza di calcolo al quale si vuole determinare il valore di pressione con l'energia rilasciata dall'esplosione o con la massa di un modello di riferimento, tipicamente rappresentato dalla massa di TNT (Trinitrotoluene). La misura di lunghezza così descritta viene chiamata distanza ridotta ed è espressa come:

$$Z = z / (E^{1/3})$$

oppure come:

$$Z = z / (M_{TNT}{}^{1/3})$$

dove:

- Z è la distanza ridotta espressa in [m/J $^{1/3}$] o [m/kg $^{1/3}$];
- z è la distanza dal punto di innesco [m];
- E è l'energia dell'onda d'urto [J];
- M_{TNT} è la massa equivalente di TNT.

Il valore di distanza ridotta è tipicamente utilizzato per indicare la distanza alla quale si verifica-

no specifici danni, a cose e a persone, a seguito del contatto con valori elevati di sovrapressione. La NFPA 921, Guide for Fire and Explosion Investigations, come riportato nell'estratto della Tabella 1.14, fornisce il valore di sovrapressione legato al danno generato, indicato per persone e proprietà.

DISTANZA RIDOTTA Z [$m/t^{1/3}$]	SOVRAPRESSIONE [kPa]	DANNO
Danni a persona		
8 · 10	20,7	Sovrapressione che manda a terra una persona
5,5 · 10	43,5	50% di probabilità di rottura dei timpani
2,5 · 10	141,5	50% di probabilità di fatalità per onda d'urto diretta
2,3 · 10	186,3	1% di probabilità di mortalità
Danni a proprietà		
$1,8 \cdot 10^2$	1	Frantumazione dei vetri delle finestre
$2 \cdot 10^2$	4,8	Danni minori alle strutture di abitazione
$1,7 \cdot 10^2$	6,9	Demolizione parziale di abitazioni rese inabitabili
$1 \cdot 10^2$	13,8	Parziale collasso di muri e tetti di case
8 · 10	17,3	Distruzione del 50% delle murature di mattoni di case
6,5 · 10	33,1	Cedimento di strutture in calcestruzzo armato
4 · 10	69	Probabile completa distruzione della costruzione
1,5 · 10	607,2	Formazione di crateri

Tabella 1.13 - Relazione dei danni a persone e cose generati da picchi di sovrapressione e relative distanze ridotte

La tabella applica il Metodo TNT che verrà discusso nel prf. 5.1 di questa trattazione. Con questo è possibile determinare il valore della distanza scalata a partire dalla sovrappressione e quindi determinare la distanza di sicurezza, con origine dall'epicentro, oltre il quale porsi in condzioni di sicurezza. Per contro, come succede nelle valutazioni di perizie a seguito di fenomeni esplosivi, è anche possibile risalire al valore della carica, nota la distanza di riferimento ed il valore della sovrappressione in quel punto che ha causato uno specifico danno.

1.4 Tipologie di innesco

La definizione di esplosione prevede che questa avvenga se sono presenti specifiche condizioni al contorno. Una di queste fa riferimento all'innesco, il quale deve rilasciare energia sufficiente a dare inizio alle reazioni chimiche a catena sulla miscela combustibile-aria di partenza.
Tra le misure consigliate per attuare la prevenzione del rischio esplosione, qualora non fosse possibile evitare la formazioni di concentrazioni pericolose, si richiede di poter agire sull'innesco, evitando la presenza delle fonti di calore o riducendone la probabilità.

La normativa UNI EN 1127-1:2011 (Atmosfere esplosive - Prevenzione dell'esplosione e protezione contro l'esplosione - Concetti fondamentali e metodologia) fornisce l'elenco delle sorgenti di innesco. Nell'analisi del rischio esplosione, anche secondo un approccio prestazionale condotto secondo l'ingegneria della sicurezza antincendio, devono essere vagliate almeno queste tredici fonti di innesco:

- Superfici calde;
- Fiamme e gas caldi (incluse le particelle calde);
- Scintille di origine meccanica;
- Materiale elettrico;
- Correnti elettriche vaganti, protezione contro la corrosione catodica;
- Elettricità statica;
- Fulmine;
- Onde elettromagnetiche a radiofrequenza da 10^4 Hz a $3 \cdot 10^{12}$ Hz;
- Onde elettromagnetiche a radiofrequenza da $3 \cdot 10^{11}$ Hz a $3 \cdot 10^{15}$ Hz;
- Radiazioni ionizzanti;
- Ultrasuoni;
- Compressione adiabatica e onde d'urto;
- Reazioni esotermiche (inclusa l'autoaccensione delle polveri).

Superfici calde. Queste costituiscono una possibile fonte di innesco quando un'atmosfera esplosiva viene a contatto con una superficie che si trova a una temperatura elevata. Tra le più comuni superfici calde si riconoscono i radiatori, gli essiccatori, i tubi radianti e in genere i macchinari che nel loro normale funzionamento sono una elevata fonte di calore. Possono costituire una superficie calda anche le parti di un macchinario che per un malfunzionamento, o per mancanza di lubrificazione, durante il frizionamento meccanico tendono a surriscaldarsi. Possono essere considerate superfici calde anche gli strati di polvere che vengono riscaldati oltre la minima temperatura di accensione dello strato (LIT) o un solido combustibile che viene riscaldato se a contatto con questa. Per questa sorgente di innesco, quindi, sono determinanti il gradiente di concentrazione di atmosfera esplosiva sulla superficie di contatto, il materiale della superficie stessa e la geometria del corpo riscaldato. Infatti per corpi di forma concava o convessa, tipo sfere o tubi, la temperatura minima necessaria per l'accensione aumenta al diminuire del diametro.
Fiamme e gas caldi. Anche piccole fuochi possono essere notevoli ed efficaci fonti di innesco. Rientrano in questa categoria le scintille che si producono durante la saldatura o il taglio, che per la loro ampia superficie sono particolarmente attive.
Scintille di origine meccanica. Nelle lavorazioni che prevedono sollecitazioni meccaniche di attrito, abrasioni e urti vengono a formarsi scintille in grado di essere sufficientemente energetiche e tali da accendere miscele infiammabili. Ciò può avvenire anche se vengono a introdursi piccoli residui di pietra o metalli tra i meccanismi delle apparecchiature. Nelle polveri depositate, inoltre, le scintille possono causare fuoco senza fiamma.

Materiale elettrico. Questo può generare scintille quando si aprono o si chiudono circuiti elettrici, per connessioni allentate o per correnti vaganti. Queste ultime, in particolare, sono legate a fenomeni di cortocircuito o per dispersioni a terra a seguito di guasti agli impianti, o per induzione magnetica, o a seguito di fulmini.
Elettricità statica. Si verifica questa condizione di innesco lì dove sono presenti accumuli superficiali di cariche elettriche su di un corpo composto da materiale isolante, generato tipicamente dallo strofinio con un materiale diverso. Le cariche elettrostatiche generate possono provocare una scintilla.
Fulmine. Questi sono fenomeni naturali di notevole energia, che se colpiscono un'atmosfera esplosiva provocano sempre un'accensione. Il rischio di fulminazione deve essere sempre condotto, ai sensi dell'art. 80 del D.Lgs. 81/2008 e s.m.i. in virtù del fatto che una fulminazione diretta può causare danni meccanici, incendi ed esplosioni a causa delle altissime temperature trasportate dalla volta celeste, mentre una fulminazione indiretta che cade a terra può causare l'avaria dei sistemi elettrici per sovratensioni.
Onde elettromagnetiche. Tutti i sistemi che generano o utilizzano energia elettrica a radiofrequenza emettono onde elettromagnetiche. Se all'interno del campo magnetico così generato sono collocati possibili conduttori, queste si comportano come antenne riceventi, convergendo l'energia e causando l'accensione di atmosfere esplosive. I raggi solari e le radiazioni laser sono onde elettromagnetiche di elevata intensità, che possono essere causa di innesco se i raggi convergono mediante oggetti che fungono da lenti, in un caso, o a seguito del riscaldamento diretto di un corpo solido, nell'altro.
Radiazioni ionizzanti. Queste vengono considerate cause di innesco se il sistema di cui è costituito (come per esempio tubi a raggi x o di sostanze radioattive) tende ad assorbire energia o se la sorgente radioattiva stessa si riscalda per effetto dell'assorbimento di energia interna.
Ultrasuoni. Nei sistemi ad ultrasuoni vengono tipicamente utilizzati un trasduttore che emette onde e uno che le riceve, posti a distanza tra loro. L'onda trasmessa tende a ridurre la sua intensità durante la transizione, rilasciando energia al mezzo interposto (fluido o solido) e inducendo l'accensione dell'atmosfera esplosiva.
Compressione adiabatica e onde d'urto. A questi fenomeni viene associato un incremento di temperatura dovuto al flusso di energia tra ambienti a pressioni diverse. Si possono generare a seguito di fuoriuscite improvvisa di gas compresso o per riflessione di onde che tendono a sommarsi nel loro percorso.
Reazioni esotermiche. Molte reazioni chimiche sono esotermiche. Queste vengono considerate come possibili fonti di innesco quando la velocità di reazione del calore supera la velocità di dissipazione, generando così accumuli di energia che accendono, a loro volta, la reazione esplosiva.
L'efficacia di una sorgente di innesco rimane comunque legata alle caratteristiche della sostanza combustibile. Differenti inneschi costituiscono differenti modi di accendere la miscela combu-

stibile con tempi di reazione differenti. L'energia fornita dall'innesco deve essere sufficiente a portare una porzione di miscela alla sua temperatura di autoaccensione; si osserva in Figura 1.15 che questa tende ad aumentare in prossimità delle concentrazioni corrispondenti ai limiti di infiammabilità, con un valore minimo definito MIE (Energia Minima di Innesco.).

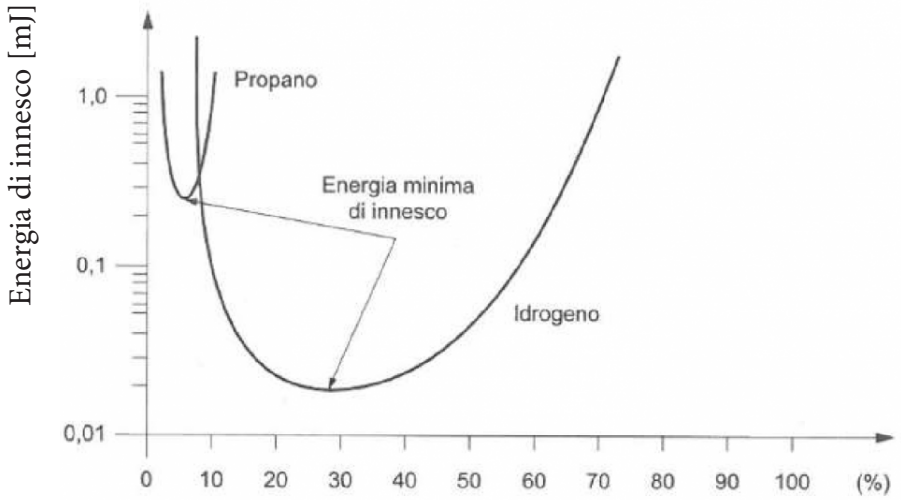


Figura 1.15 - Energia di innesco al variare della concentrazione di combustibile

Nella Tabella 1.14 a seguire vengono indicati le energie minime di accensione per alcuni combustibili.

COMBUSTIBILE	ENERGIA MINIMA DI ACCENSIONE [mJ]
Solfuro di carbonio	0,015
Acetilene	0,020
Idrogeno	0,020
Etilene	0,096
Etano	0,285
Propano	0,300
Metano	0,470
Pentano	0,490
Benzene	0,550

Tabella 1.14 - Energia minima di accensione per alcuni combustibili

L'energia minima di accensione per molti gas si aggira intorno ai 0,1-0,2 mJ, fino a raggiungere, per i gas molto reattivi come l'idrogeno e l'acetilene, valori di energia minima di accensione di circa 0,01-0,02 mJ.
Per le polveri i valori di MIE variano notevolmente, ma sono molto maggiori rispetto a quelli

dei gas, anche in relazione alla granulometria per la stessa sostanza. Le polveri si attivano, normalmente, nel range di energia compreso tra 10-100 mJ; al di sotto di questo sono considerati energie minime basse, mentre raramente si riscontrano polveri che necessitano di un'energia superiore a 1000 mJ.
A causa di questa differenza nell'energia minima di accensione, le nubi di polvere sono molto meno sensibili all'accensione mediante scintille.

1.4.1 Temperatura di autoignizione

Temperatura di autoaccensione, o autoignizione, MIT, è la temperatura minima alla quale una sostanza deve essere portata per iniziare spontaneamente a bruciare in presenza di ossigeno, ma senza sorgenti esterne di innesco.
Ogni sostanza ha la propria temperatura di autoaccensione, determinata in relazione alle specifiche condizioni in cui questa viene calcolata. All'atto pratico, in condizioni di sicurezza, è bene tenere conto del più basso valore riscontrato in letteratura.
Quando si porta una miscela verso il suo punto di autoaccensione questa si infiammerà solo dopo un breve, ma variabile, tempo noto come Periodo di induzione, o Ritardo all'accensione. L'accensione, seppur spontanea, non è mai immediata ed è differente da miscela a miscela, aumentando, generalmente, al diminuire della temperatura a cui è sottoposta.
La temperatura di autoaccensione determina la classe di temperatura alla quale un gas appartiene, come riportato in Tabella 1.15, secondo le indicazioni della normativa EN ISO 80079-36:2016.

CLASSE TEMPERATURA DEI GAS	MASSIMA TEMPERATURA SUPERFICIALE DEI PRODOTTI ATEX [°C]	TEMPERATURA DI AUTOACCENSIONE [°C]
T1	450	>450
T2	300	>300
T3	200	>200
T4	135	>135
T5	100	>100
T6	85	>85

Tabella 1.15 - Limite di temperatura superficiale dei prodotti ATEX

2. L'approccio ingegneristico alla sicurezza antincendio

L'emanazione del Decreto Ministeriale 9 maggio 2007, *Direttive per l'attuazione dell'approccio ingegneristico alla sicurezza antincendio*, nella legislazione italiana del settore della prevenzione incendi, introduce per il progettista un metodo alternativo alla valutazione della sicurezza antincendio. Questo approccio si presenta, infatti, come un mezzo alternativo, e quindi non vincolante, a quello previsto dal decreto del Ministero dell'interno 4 maggio 1998 in ambito della *Fire Safety Engineering*, FSE.

Il D.M. 9 maggio 2007, sopra citato, definisce i criteri e gli aspetti procedurali per valutare i livelli di rischio, e i relativi provvedimenti da adottare, legati agli ambienti e alle attività non regolate da specifiche disposizioni antincendio, ai sensi del D.P.R. n. 151 del 1 maggio 2011. Il decreto riporta così una metodologia flessibile, adottabile per lo studio e la verifica delle opere da costruzione soggette a un rischio di incendio aggiuntivo, al fine di risolvere alla mancata osservanza delle disposizioni prescrittive e adottare un procedimento di deroga compensativo.

L'approccio ingegneristico viene quindi proposto al progettista antincendio come utile mezzo per effettuare un'analisi di tipo quantitativo, e poter misurare l'accettabilità dei risultati, mettendo a confronto le conseguenze dello sviluppo di un incendio o di una esplosione. La progettazione antincendio, infatti, permette la ricerca della strategia antincendio più idonea a rendere minimo, e quindi accettabile, il rischio connesso al fenomeno. Una strategia antincendio, a seguito di una valutazione FSE, prevede la progettazione dell'insieme di misure da adottare, costituite sia da soluzioni tecniche che organizzative-gestionali. Tale valutazione viene resa possibile mediante simulazione di fluidodinamica computazionale, CFD, di scenari antincendio valutati secondo la più alta probabilità di accadimento, in relazione all'attività presa in esame.

Il risultato di una valutazione antincendio, mediante l'approccio ingegneristico, consente infine di definire un'utile documento da fornire al committente dell'attività lavorativa presa in esame, al fine di mettere in sicurezza le persone, *in primis*, i beni e l'ambiente circostante.

A seguito del D.M. 9 maggio 2007 prende forma il Decreto Ministeriale 3 agosto 2015, noto come Codice di Prevenzione Incendi, o più comunemente Codice. Questo si presenta come un testo unico e organico sotto forma di regola tecnica orizzontale, RTO, applicabile sia a tutte le attività di nuova costruzione sia a costruzioni esistenti. Riporta inoltre la metodologia che è necessaria seguire per l'attuazione dell'approccio ingegneristico alla sicurezza antincendio, in alternativa alle procedure operative descritte in passato dal Decreto Ministeriale 3 marzo 1998.

Questi due decreti, il D.M. 8 marzo 1998 da un lato e il D.M. 3 agosto 2015 dall'altro, presenta-

no due differenti approcci alla valutazione antincendio, ma entrambi ancora applicabili ai sensi dell'attuale legge italiana, secondo le esigenze e l'esperienza maturata dal progettista.
Il primo propone un approccio di tipo prescrittivo. La progettazione antincendio è governata dall'attuazione delle regole tecniche orizzontali e delle regole tecniche verticali, RTV, emanate per le specifiche attività assoggettate a controlli di prevenzione incendi previste dal D.P.R. 151/2011.
Il secondo decreto ministeriale, con un orientamento più rigoroso e attuale, propone un approccio di tipo prestazionale. Alla sicurezza antincendio e ai criteri di valutazione dei rischi sono applicati i principi ingegneristici, di regole e di giudizi esperti, basati sulla valutazione scientifica del fenomeno della combustione, degli effetti dell'incendio e del comportamento degli occupanti, per definire una valutazione analitica delle misure antincendio ottimali, necessarie al raggiungimento delle soglie di prestazioni. Tale metodo viene riportato, in questo capitolo, in tutte le sue fasi e successivamente approfondito in merito alle attività a rischio di esplosione.

2.1 La progettazione prescrittiva e la progettazione prestazionale

L'attuale quadro normativo italiano, in merito alla valutazione del livello di sicurezza antincendio, consente al progettista l'applicazione di due approcci: uno di natura prescrittiva, che fa capo al D.M. 10 marzo 1998, *Criteri generali di sicurezza antincendio e per la gestione dell'emergenza nei luoghi di lavoro*; l'altra di natura prestazionale, introdotta con il D.M. 9 maggio 2007, con la quale sono state definite le *Direttive per l'attuazione dell'approccio ingegneristico alla sicurezza antincendio*, successivamente riprese dal D.M. 3 agosto 2015, *Approvazione di norme tecniche di prevenzione incendi, ai sensi dell'articolo 15 del decreto legislativo 8 marzo 2006, n. 139*, più comunemente noto come Codice di Prevenzione Incendi.
In Italia, un ragionevole punto di partenza per la verifica delle condizioni di sicurezza antincendio in un'attività soggetta a rischio, prevede l'individuazione della categoria in cui si colloca l'attività in esame. A tale scopo il Decreto del Presidente della Repubblica 1 agosto 2011 n. 151, nominato *Nuovo regolamento di prevenzione incendi*, suddivide le attività soggette ai controlli di prevenzione incendi in relazione all'entità dell'attività e secondo la complessità e la dimensione della stessa. Vengono individuate così le seguenti tre categorie:

- nella Categoria A rientrano quelle attività dotate di una specifica regola tecnica di prevenzione incendi e connotate da una limitata complessità a causa delle ridotte dimensioni, affollamento o quantitativo di materiale combustibile presente;
- nella Categoria B sono comprese le attività già elencate nella categoria A che però hanno una maggiore complessità, nonché quelle sprovviste di una specifica regola tecnica di prevenzione incendi e che, comunque, sono caratterizzate nel complesso da un livello di rischio d'incendio inferiore a quello della categoria C;
- nella Categoria C sono comprese quelle attività ad elevata complessità, indipendentemente che esse siano dotate o meno di una specifica regola tecnica.

Tale distinzione permette di definire gli adempimenti a carico dei responsabili delle attività soggette ai controlli di prevenzione incendi.
Per le attività presenti nella categoria A non è prevista la valutazione del progetto. Pertanto per consentire l'inizio all'esercizio dell'attività viene presentata, dal responsabile per i controlli di prevenzione incendi al Comando Provinciale dei Vigili del Fuoco, la Segnalazione Certificata di Inizio Attività (SCIA), nelle modalità indicate dal D.M. 7 agosto 2012. Per le attività in categoria B e C, invece, bisogna prevedere una valutazione preventiva del progetto e successivamente, solo a seguito dell'approvazione del Comando dei VdF, può essere presentata la SCIA.
Il Comando Provinciale dei Vigili del Fuoco effettua, per le attività in categoria A e B, entro i sessanta giorni successivi dal ricevimento della SCIA, alcuni controlli a campione nelle attività soggette e ne attesta la regolare adempienza alle prescrizioni normative mediante il rilascio del verbale della visita tecnica. Per le attività in categoria C i suddetti controlli devono essere sempre eseguiti, con il rilascio, a seguito di una valutazione positiva, del certificato di prevenzione

incendi.
Ai fini della valutazione del rischio incendio è possibile seguire l'approccio ordinario oppure quello ingegneristico.
L'approccio ordinario prescrittivo prevede di seguire i requisiti minimi dichiarati nelle norme tecniche specifiche per alcune attività soggette ai controlli di prevenzione incendi. Queste regole tecniche, emanate e successivamente aggiornate negli anni, sono dette verticali e sono applicabili esclusivamente all'attività di riferimento. Tali riferimenti normativi sono caratterizzati da una semplificata progettazione e da un facile controllo dei requisiti, mediante checklist o matrice di verifica gestita da enti qualificati alla validazione dei progetti. A queste regole tecniche verticali si affianca una più ampia raccolta di riferimenti applicabili alla progettazione antincendio contenuti nel sopracitato D.M. 10 marzo 1998. Questo riferimento normativo, inoltre, fornisce i criteri da prendere in esame per la classificazione del rischio incendio nei luoghi di lavoro che viene condotto mediante l'identificazione dei pericoli, l'individuazione delle persone esposte, la rimozione e la sostituzione dei pericoli d'incendio, la classificazione degli ambienti del rischio incendio, la valutazione dell'adeguatezza delle misure adottate, la redazione della parte documentale relativa alla valutazione effettuata. In sostanza, è il legislatore che effettua la valutazione del rischio sulla base dell'attività soggetta e impone preventivamente le scelte protettive idonee a compensare il rischio esistente (lunghezza massima dei percorsi di esodo, valori di resistenza al fuoco di elementi strutturali, ecc.).
Tale approccio può risultare generalmente conservativo. Quando la realizzazione di determinati interventi prescrittivi risulta impossibile è necessario ricercare ulteriori provvedimenti, attraverso un'approfondita analisi del rischio incendio, volti a conferire all'attività un grado di sicurezza equivalente a quello stabilito dalle norme vigenti.
Recentemente è stato concesso al progettista di poter effettuare la valutazione antincendio mediante un approccio ingegneristico di tipo quantitativo, in alternativa a quello prescrittivo di tipo qualitativo. Il raggiungimento degli obiettivi di sicurezza viene verificato mediante una strategia antincendio effettuata sulla base degli scenari d'incendio probabilisticamente più gravosi, che potrebbero verificarsi durante lo svolgimento di un'attività. Mediante questo approccio il legislatore non fornisce più i livelli di sicurezza accettabili, bensì gli obiettivi diventano i valori di soglia, o intervalli di valori, per alcune grandezze specifiche (ad esempio, la visibilità delle segnalazioni di esodo presenti nelle vie di fuga non deve essere inferiore a 10 m, oppure che la superficie interessata dall'incendio non deve superare 200 m^2). Mediante il metodo prestazionale è possibile individuare, puntualmente, le soluzioni economicamente più vantaggiose che evitano la progettazione di misure ridondanti.
Il progettista antincendio ha quindi a disposizione un metodo rigoroso, opportunamente progettato, che mediante un congruo numero di dati tale da caratterizzare l'incendio e il suo sviluppo temporale, e con validati codici di calcolo, consente di poter effettuare un'attendibile valutazione del rischio.

Tale metodo rigoroso prevede lo sviluppo di un'iter dettagliato sviluppato in due fasi:

- Analisi preliminare (Fase I), per individuare le condizioni rappresentative del progetto e quindi del rischio al quale l'attività è esposta, e i livelli di prestazione a cui riferirsi in merito agli obiettivi di sicurezza da perseguire. Questa fase permette di prendere in conto le condizioni a contorno date dall'attività in analisi e gli scopi da perseguire, quindi per individuare gli scenari da indagare;
- Analisi quantitativa (Fase II) che permette la valutazione quantitativa degli effetti in relazione agli obiettivi assunti e secondo gli scenari individuati nella fase precedente.

La metodologia prestazionale, per sua natura, effettua un'analisi basata su scenari d'incendio mirati. Pertanto, il risultato di un'analisi prestazionale deve prendere in considerazione di fornire le indicazioni per il mantenimento nel tempo di tutti i parametri posti alla base delle scelte progettuale. A tal proposito il progettista redige un documento noto come Sistema di Gestione della Sicurezza Antincendio, SGSA, il quale riporta le specifiche di attuazione che sono soggette a controlli periodici da parte del personale del Corpo nazionale dei vigili del fuoco. Questo documento deve valutare ed esplicitare i provvedimenti necessari alla pianificazione dell'emergenza e alla manutenzione dei sistemi di protezione, all'organizzazione del personale e alla sicurezza delle squadre di emergenza.

La FSE non si configura come una regola tecnica che fissa a priori le misure e i relativi livelli prestazionali da adottare, ma rappresenta una linea guida che stabilisce un percorso metodologico da seguire, dove la novità dell'approccio ingegneristico alla sicurezza consiste nel fatto che, per ogni misura alternativa, può essere quantificato l'effetto.

ASuccessivamente è stato emanato il Decreto Ministeriale 3 agosto 2015 che semplifica e razionalizza in un testo unico le precedenti disposizioni.

Tale decreto è strutturato in quattro sezioni:

- Sezione G - Generalità: riportante i principi fondamentali per la progettazione antincendio;
- Sezione S - Strategia antincendio: che individua le misure di prevenzione, protezione e gestione in merito alle principali azioni progettuali, quali reazione e resistenza al fuoco, esodo, compartimentazione, rivelazione e sistemi di segnalazione ecc.. ;
- Sezione V - Regole tecniche verticali: che descrive le regole tecniche di protezione, prevenzione e gestione applicabili a specifiche attività. In questa sezione si colloca, al capitolo V.2, la regola tecnica in merito alle aree a rischio per atmosfere esplosive. Tale ambito non era definito nel D.M. 10 marzo 1998 con l'approccio prescrittivo, ma veniva demandato al D.Lgs. 81/2008;
- Sezione M - Metodi: con indicazioni sulle metodologie progettuali a disposizione del progettista con particolare riferimento al metodo dell'ingegneria della sicurezza antincendio.

Il D.M. 03 agosto 2015, nelle sue disposizioni di flessibilità e rigorosità, introduce inoltre nuove soluzioni progettuali, che il professionista antincendio può ritenere più efficaci per l'ottenimento

degli obiettivi di sicurezza. Vengono definiti così le soluzioni conformi, le soluzioni alternative e le soluzioni in deroga.
Le soluzioni conformi sono solo quelle proposte nei paragrafi della Sezione S; sono soluzioni di immediata applicazione di natura prescrittiva e che quindi non richiede ulteriori valutazioni tecniche (ad esempio, deve essere interposta una distanza di separazione su spazio a cielo libero verso le altre opere da costruzione non inferiore ad un certo valore).
Le soluzioni alternative sono ammesse solo per le attività con valutazione del progetto. Il progettista può fare ricorso alle soluzioni alternative secondo quanto proposto nella Sezione S e per ogni strategia indicata; qualora non ne siano proposte in questa sezione è possibile formulare specifiche soluzioni, tali da dimostrare il raggiungimento dell'obiettivo prestazionale necessario, mediante uno dei metodi di progettazione della sicurezza antincendio proposti nella Sezione M dello stesso riferimento normativo (ad esempio, in riferimento al livello di prestazione della soluzione conforme riportata prima, si deve dimostrare che la costruzione non danneggi altre costruzioni per effetto di collasso strutturale e si deve dimostrare il mantenimento della capacità portante in condizioni di incendio tale da garantire un margine di sicurezza non inferiore al 100%RSET e comunque non inferiore a 30 minuti).
Le soluzioni in deroga vengono applicate qualora non siano possibili soluzioni conformi o alternative; in tal caso sarà necessario dimostrare il raggiungimento degli obiettivi di sicurezza antincendio impiegando i metodi avanzati di progettazione: l'ingegneria della sicurezza antincendio, prove sperimentali o avvalendosi del giudizio di un parere esperto (le descrizioni e i limiti di applicazioni sono riportati al paragrafo G.2.7 del D.M. 3 agosto 2015).

2.2 Prima fase: analisi preliminare

La prima fase del metodo per l'ingegneria antincendio prevede un'analisi di tipo qualitativo, al fine di identificare e documentare i dati necessari per procedere con la quantificazione degli effetti della seconda fase, attraverso l'informazione dei seguenti aspetti:

- La definizione del progetto;
- L'identificazione degli obiettivi di sicurezza antincendio;
- L'individuazione dei livelli di prestazione;
- L'individuazione degli scenari di incendio di progetto.

In conclusione di questa fase dovrà essere raccolto in un sommario tecnico il processo (ingegneristico) seguito, e firmato congiuntamente dal progettista e dal titolare dell'attività.

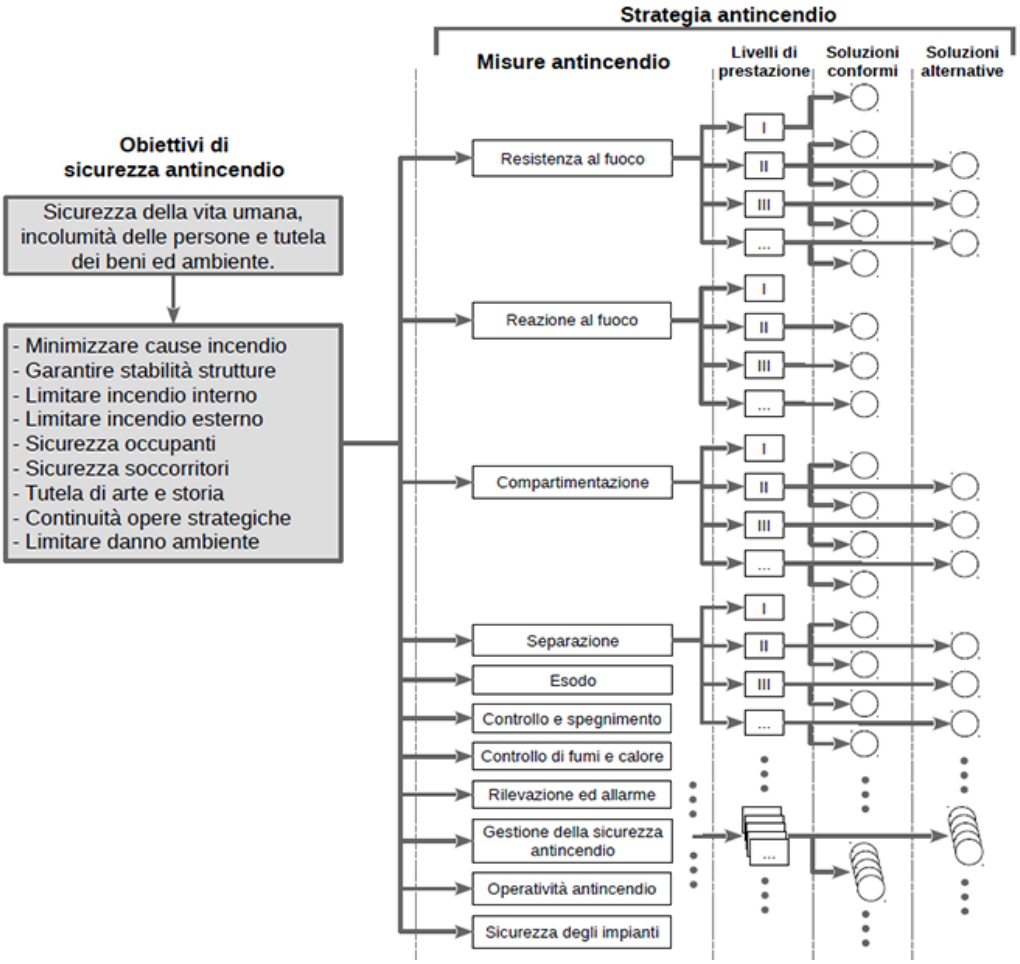


Figura 2.1 - Schematizzazione delle strategie antincendio secondo quanto previsto dal metodo dell'ingegneria

2.2.1 La definizione del progetto

La necessità di una descrizione del progetto è legata a conoscere e a documentare in modo dettagliato la situazione esistente o di progetto. Questa parte della documentazione sostiene le successive analisi, mediante la rappresentazione dei vari ambienti, le destinazioni d'uso e le attività che si svolgono in essi. In questa fase devono essere definiti almeno i seguenti punti:

- i vincoli progettuali di carattere normativo derivanti da esigenze legate all'attività, quali, ad esempio, difformità rispetto a regole tecniche che rendono necessario il procedimento di deroga o particolari esigenze di tutela architettonica.
- individuazione dei pericoli di incendio connessi con la destinazione d'uso prevista;
- descrizione delle condizioni ambientali al fine di valutare gli effetti che si potrebbero produrre, quali, ad esempio, i sistemi di ventilazione naturale, meccanica e zone compartimentate all'incendio o al fumo;
- caratteristiche del sistema delle vie d'esodo;
- impianti di protezione attiva;

- analisi delle caratteristiche degli occupanti in relazione alla tipologia di edificio e alla sua destinazione d'uso, nonché alla presenza di disabili o la familiarità degli occupanti con l'ambiente.

2.2.2 Gli obiettivi di sicurezza antincendio

In questa fase gli obiettivi di sicurezza antincendio devono essere identificati per stabilire i successivi livelli di prestazione, individuati in relazione alle specifiche esigenze dell'attività.
Gli obiettivi stabiliti devono tenere in considerazione almeno i requisiti essenziali di "sicurezza in caso di incendio" previsti dalla Direttiva Europea Prodotti da costruzione, quali:

- la salvaguardia dell'incolumità delle persone connesse al pericolo incendio, prendendo in considerazione anche la sicurezza delle squadre di soccorso;
- la capacità portante delle strutture che deve essere garantita per un periodo di tempo necessario all'evacuazione o alla messa in sicurezza del personale disabile;
- la limitazione dell'insorgere di incendi o esplosioni e la ridotta propagazione del fumo e del calore all'interno dell'opera o a quelle adiacenti;
- in particolari condizioni viene richiesta la continuità di esercizio dell'ambiente.

2.2.3 I livelli prestazionali

Sulla base dei predetti obiettivi di sicurezza, il progettista associa le grandezze significative a garantire il soddisfacimento di questi. I parametri possono prevedere la temperatura massima a cui potersi esporre, la visibilità, l'irraggiamento termico e la concentrazione in aria delle specie tossiche, l'altezza libera dal pavimento da fumi e gas di combustione, l'intervallo di tempo durante il quale si deve mantenere la capacità portante di un'opera da costruzione, ecc.
In seguito a quanto definito, devono essere quantificati i criteri di accettazione, in termini di livelli di prestazione ammissibili, per ogni misura antincendio presa in considerazione nella strategia antincendio adottata.
Questi costituiscono i limiti di soglia delle varie grandezze oggetto di specifica valutazione, per il quale il progettista deve giustificare le scelte decisionali con riferimento a disposizioni normative (ad esempio, la norma BS 7974, il decreto del Ministero dei Lavori Pubblici 9/5/2001, ecc.) o reperibili in letteratura.

2.2.4 Gli scenari di incendio

A seguito della descrizione del progetto in termini di vincoli e scelte progettuali, e definiti gli obiettivi di sicurezza e i livelli prestazionali associati, si procede a schematizzare gli eventi di innesco che possono verificarsi con elevata probabilità, in relazione alle caratteristiche di combustione dei materiali, alla destinazione d'uso dell'edificio e alla sua geometria, e alle condizioni degli occupanti. Tali dati risultano fondamentali per la caratterizzazione degli scenari di incen-

dio di progetto nell'ambito del processo di progettazione prestazionale.
Occorre innanzitutto identificare gli elementi dai quali dipendono i rischi d'incendio, o di esplosione, che caratterizzano la specifica attività in esame. A tal proposito, nota la destinazione d'uso del fabbricato e le attività che avvengono all'interno dei singoli locali, si può procedere con una valutazione del rischio sulla base dell'albero degli eventi, schema che riporta la probabilità di accadimento degli eventi correlati tra loro.
Gli scenari di incendio, che rappresentano la schematizzazione degli eventi i quali possono ragionevolmente verificarsi, devono tenere in considerazione, inoltre, le seguenti condizioni al contorno, lì dove previsti:

- Caratteristiche geometriche dei locali e delle proprietà termo-fisiche delle pareti e dei locali. In genere si considerano le pareti e i solai come superfici adiabatiche, trascurando così la quota parte di calore assorbito dagli elementi costruttivi, ponendosi, pertanto, in condizioni conservative in relazione alle temperature raggiunte nell'ambiente;
- Condizione di ventilazione naturale, interne ed esterna, secondo la presenza e la posizione di camini, cavedi, eventuali evaquatori di fumo e calore (EFC) opportunamente descritti, elementi di chiusura quali porte e finestre, specificando le tipologie e le caratteristiche dimensionali e costruttive;
- Condizioni di ventilazione meccanica, con riferimento ai sistemi di attivazione e spegnimento dell'impianto. Si deve informare inoltre in merito all'ubicazione delle condotte di mandata e di ripresa dell'aria, nonchè della portata della stessa, e della presenza di serrande tagliafuoco.

L'albero degli eventi sopracitato permette di identificare molteplici situazioni legate alle probabilità dell'evento di innesco (Si approfondirà l'argomento al prf. 3.1.2-*Scenari del rischio esplosione*). Tra questi si prenderanno in considerazioni quelli maggiormente più significativi, oltre agli scenari di eventi realmente accaduti sulla base di un'analisi storica, se rivelati, che possano fornire indicazioni quantitative per confrontare l'ordine di grandezza delle conseguenze attese.
Con particolare rilevanza, gli scenari di incendio richiedono di rendere note le condizioni degli occupanti. Nello specifico si dovranno tenere in considerazione i seguenti fattori che stabiliscono i tempi di deflusso della fase di esodo: l'affollamento, il grado di familiarità con gli ambienti e con i percorsi di esodo, lo stato di veglia o di sonno e la categoria degli occupanti in riferimento allo stato psico-fisico (lavoratori, studenti, malati, disabili, ecc.).
Con specifico riferimento alle atmosfere esplosive, l'RTV inserita all'interno del Codice di prevenzione incendi indica necessario prendere in considerazione almeno i seguenti due scenari:

- all'esplosione potrebbe seguire un incendio. Si deve valutare quest'ultimo scenario tenendo conto dell'indisponibilità di quanto danneggiato dall'esplosione;
- all'incendio potrebbe verificarsi un'esplosione. Si deve valutare quest'ultimo scenario tenendo conto dell'indisponibilità di quanto danneggiato dall'incendio.

In riferimento agli scenari ritenuti realisticamente più gravosi per la salvaguardia degli occupan-

ti, la stabilità strutturale e la sicurezza delle squadre di soccorso, si dovrà prestare attenzione alle particolari situazioni di elevato affollamento, all'eccessiva lunghezza dei percorsi di esodo e del numero limitato di uscite di emergenza, oltre a ulteriori sorgenti di innesco e particolari disposizioni spaziali di materiale combustibile che consentano uno sviluppo più rapido del fenomeno.

2.3 Seconda fase: analisi quantitativa

A seguito dell'identificazione degli scenari di incendio definiti nell'analisi qualitativa, il secondo step per l'approccio ingegneristico consiste in una valutazione quantitativa degli effetti considerati, di incendio o di esplosione, in relazione agli obiettivi di sicurezza. I risultati ottenuti verranno così confrontati con i livelli di prestazione ammissibili individuati precedentemente.
Per determinare i risultati dello scenario, l'approccio progettuale prevede innanzitutto di descrivere i provvedimenti da adottare, secondo la strategia progettata, in termini di misure preventive e protettive da assumere. Successivamente il progettista sceglie di applicare un modello analitico che indichi la variazione nel tempo di alcune grandezze indicative dello sviluppo del fenomeno e degli effetti associati. Infine, sulla base dei risultati ottenuti dalla valutazione fluidodinamica dello scenario a cui è stato associato il modello di incendio, può essere effettuato un confronto tra i risultati e i livelli prestazionali ammissibili; le soluzioni progettuali che superano i limiti imposti per tutte le soglie di prestazione devono essere scartate, fino a individuare la soluzione progettuale che verifica positivamente gli scenari di progetto.

2.3.1 Definizione della soluzione progettuale

Al fine di compensare il rischio riscontrato, si segue alla descrizione dei provvedimenti da adottare nei confronti del pericolo atteso, in considerazione delle condizioni ambientali e della descrizione delle misure preventive e protettive assunte.
Con particolare riferimento alle misure di prevenzione, quali prime azioni da prendere in considerazione in fase progettuale, si può fare riferimento all'utilizzo di sistemi di ventilazione nei locali o di sistemi di sicurezza a saturazione, quali sistemi di spegnimento del fronte di fiamma mediante l'abbassamento della concentrazione di ossigeno.
Altre soluzioni progettuali prevedono l'adozione di misure di protezione passiva e attiva. Per le prime si fa riferimento, ad esempio, alla resistenza al fuoco delle strutture, porte e chiusure tagliafuoco o barriere al fumo. Per le misure di protezione attiva si possono adottare sistemi di ventilazione ad estrazione meccanizzata dei fumi o di immissione per spegnimento o soppressione. Approfondimenti in merito alle tecnologie adottabili per il rischio esplosione vengono riportati, in questa trattazione, nel Cap. 4 - *Principi di protezione integrata*.
Tali provvedimenti per la compensazione del rischio incendio prevedono una particolare attenzione al comportamento al fuoco delle strutture e dei materiali oltre che ai sistemi di individuazione del pericolo mediante presidi antincendio opportuni.

2.3.2 Modelli di calcolo

Dopo aver definito le soluzioni adottate, il professionista antincendio deve individuare, per ognuno degli scenari di progetto, la modellazione più opportuna per valutare lo sviluppo degli incendi e le loro possibili conseguenze.

Attraverso modelli di calcolo è possibile rappresentare l'evoluzione nel tempo delle grandezze fisiche coinvolte in un incendio o in un'esplosione, quali la temperatura e la portata dei prodotti della combustione, nonchè la propagazione degli effetti, quali fumo, gas e onde d'urto, in relazione alle condizioni al contorno definite dai parametri di progetto dell'ambiente.

I modelli più frequentemente utilizzati attualmente sono i seguenti:

- modelli analitici semplificati basati sull'utilizzo di curve sperimentali che si limitano a descrivere l'andamento della temperatura nel tempo della durata dell'incendio;
- modelli di simulazione del comportamento strutturale in caso di incendio;
- modelli di simulazione dell'esodo;
- modelli di simulazione a zone per ambienti confinati;
- modelli di simulazione a campo.

Generalmente, la modellazione degli incendi all'interno di un compartimento può essere realizzata attraverso tecniche sperimentali oppure matematiche. Le prime comportano la riproduzione in scala reale, o ridotta, del caso studio in esame; i metodi matematici possono essere di natura probabilistica o deterministica.

I modelli matematici su base stocastica trattano il fenomeno come una successione di eventi, a cui vengono assegnati le probabilità di passaggio da uno stato a quello sequenziale, secondo un analisi sperimentale e storica.

I modelli matematici su base deterministica, invece, rappresentano i processi di sviluppo dell'incendio in un locale secondo espressioni matematiche di origine fisica e chimica. I modelli deterministici sono metodi di simulazione numerica avanzata dell'incendio e si suddividono in modelli a zone e modelli a campo.

I modelli di calcolo numerici dovranno risultare di comprovata affidabilità secondo le indicazioni delle relative validazioni sperimentali, e il professionista antincendio ne dovrà fare uso nei limiti del campo di validità. La validazione è quindi uno dei parametri di particolare importanza nella scelta del modello numerico.

Il progettista antincendio deve inoltre distinguere tra parametri interni ed esterni al modello.

Per parametri interni al modello si intendono quei parametri modificabili dall'utente quali, per esempio, la dimensione della griglia e il passo temporale di calcolo (*time step*). I parametri esterni costituiscono i valori di input della modellazione; questi vengono distinti in tre categorie:

- valori geometrici, quali dimensione degli ambienti e delle aperture di ventilazione;
- valori di scenario, quale la velocità di distribuzione del combustibile;
- valori termo-fisici, quali le proprietà delle partizioni dell'ambiente.

Con i modelli numerici il progettista antincendio ha attualmente a disposizione un utile stru-

mento di analisi e di come questi variano nel tempo. È possibile quindi stimare la variazione di altezza libera dal pavimento dei fumi e gas di combustione e quindi la visibilità per gli occupanti in fuga e dei soccorritori e il loro tempo di fuga, il tempo di rivelazione dell'incendio e di attivazione degli impianti sprinkler, portata massica e velocità dei prodotti di combustione in estrazione dalle aperture presenti in un locale, pressione, temperatura e potenza termica del rilascio dell'incendio, nonchè altre isosurface e diagrammi per rappresentare i risultati ottenuti.

2.3.2.1 Modelli a zone

I modelli a zona simulano lo sviluppo del fenomeno rappresentando l'ambiente confinato come divisibile in un piccolo numero di sottospazi (zone) per i quali le grandezze coinvolte siano pressochè uniformi spazialmente, ma variabili nel tempo.
Spesso di utilizza il modello a due zone, dove il locale nel quale si sviluppa l'incendio viene diviso in due zone: una superiore nel quale si colloca lo strato di gas caldi a contatto con il soffitto, mentre la zona inferiore la zona è rappresentata dall'aria fredda, considerando che questa non sia contaminata dalla presenza di fumo e gas di combustione.
L'ambiente in cui si sviluppa la combustione verrà caratterizzato, quindi, da una variazione a gradino della temperatura e delle grandezze di interesse in corrispondenza delle interfacce tra le zone. All'interno di ogni zona in cui il locale è suddiviso la temperatura tende ad aumentare con l'altezza dal pavimento, mentre a parità di altezza diminuisce all'allontanarsi dall'asse della fiamma dove si è sviluppato l'innesco.
Tali assunzioni possono ritenersi opportune se si considera il tempo di sviluppo dell'incendio compreso tra l'innesco e gli istanti di crescita precedenti al flashover, quindi con incendi localizzati. Tale assunzione, invece, può essere meno adatta per spazi vasti o per ambienti lunghi e stretti.
Se si vuole analizzare la condizione di crescita dell'incendio in prossimità del flashover, si può considerare il locale con il combustibile uniformemente distribuito, e quindi adottare un modello a singola zona. Questo è lecito nelle ipotesi in cui la temperatura dei gas caldi di combustione sia maggiore di 500 °C, oppure se lo strato di questi occupa almeno l'80% dell'altezza del locale o se la superficie del pavimento sia coinvolta nell'incendio per almeno il 50% o, infine, se la temperatura dei gas caldi sulla superficie dei materiali combustibili è almeno pari a quella di ignizione.
In conclusione, il modello a singola zona può essere impiegato anche per la simulazione nella fase successiva al flashover, fase in cui l'incendio è pienamente sviluppato e tutti il combustibile del carico d'incendio partecipano alla combustione. In tale condizione i gas caldi possono essere considerati distribuiti in modo omogeneo all'interno del volume confinato e con una distribuzione pressochè uniforme della temperatura interna che varia nel tempo.

2.3.2.2 Modelli a campo

Tra i modelli numerici, quelli definiti come "modelli a campo" permettono un'analisi fluidodinamica basandosi su metodi agli elementi finiti e per cui le equazioni di conservazione della massa, dell'energia e della quantità di moto, vengono risolte per ogni elemento volumico, mesh, di una griglia tridimensionale che suddivide il compartimento.

All'interno di ogni volume elementare in cui viene riprodotto l'ambiente, il codice di calcolo di fluidodinamica computazionale risolve le equazioni differenziali, non lineari e tridimensionali, in funzione del tempo, note come equazioni di Navier-Stokes, tenendo presente le variazioni che intervengono in ogni volume per effetto delle interazioni nei cambiamenti di quelli limitrofi.

Il modello a campo permette un elevato livello di analisi del fenomeno fluidodinamico e una notevole flessibilità di studiare geometrie complesse. Il modello a campo permette di rappresentare meglio l'ambiente in cui si sviluppa l'incendio, in quanto un numero più elevato di mesh tridimensionali di dimensioni ridotte consente di descrivere spazi complessi più facilmente rispetto a zone grandi di forma parallelepipeda. Allo stesso tempo, però, il processo iterativo e raffinato che lo caratterizza richiede una capacità computazionale con tempi di calcolo notevolmente più lunghi, che aumentano al ridursi della dimensione della cella e quindi all'incremento dei volumi a caratterizzare la geometria dell'ambiente.

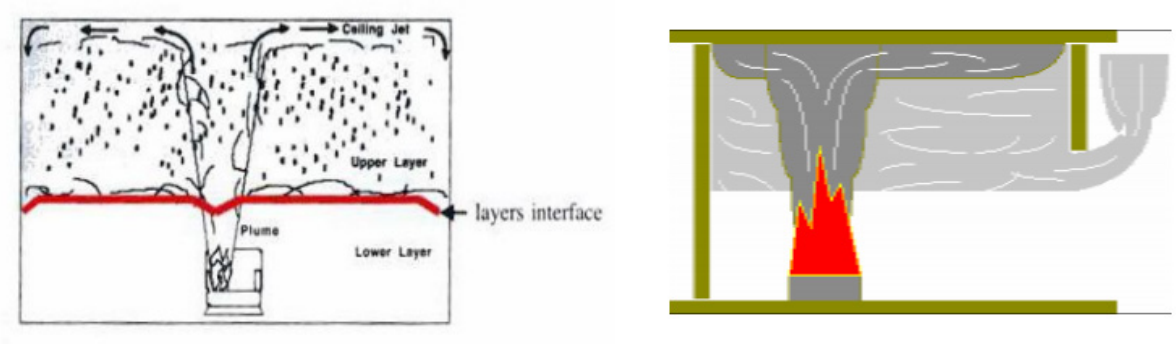


Figura 2.2 - Esempio di rappresentazione dell'incendio con modello a zone

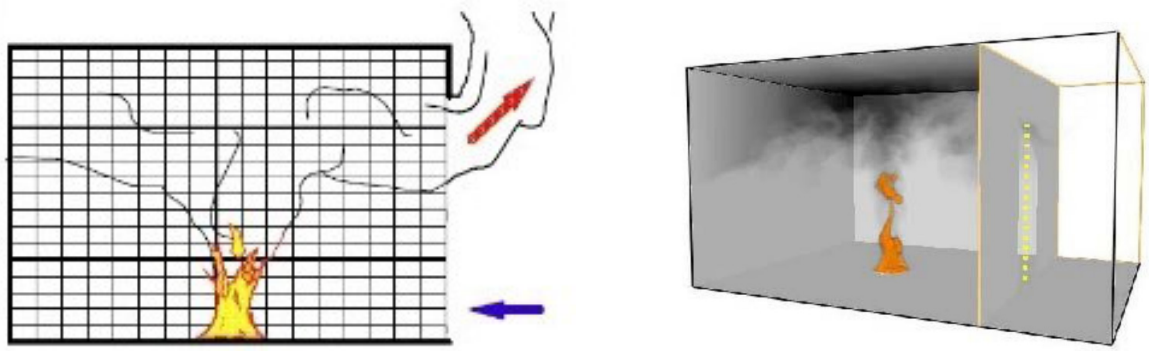


Figura 2.3 - Esempio di rappresentazione dell'incendio con modello a campo

2.3.3 Risultati delle elaborazioni e la documentazione di progetto

In conclusione della seconda fase, il professionista antincendio è in grado di confrontare i risultati in output dalla simulazione sui modelli di calcolo con i valori di soglia imposti. A tal fine viene redatta la Documentazione di progetto, quale documento conclusivo a dimostrazione delle scelte progettuali prese per il raggiungimento degli obiettivi prefissati.

In merito alla fase preliminare (I fase), la documentazione di progetto contiene il sommario tecnico. In questo vengono riportate le scelte ingegneristiche eseguite, al fine di individuare gli scenari di incendio di progetto statisticamente più gravosi e i livelli di prestazione da garantire, secondo quanto trattato nei capitoli precedenti. Come previsto dal punto M.1.6 del D.M. 3 agosto 2015, il sommario tecnico deve contenere almeno le seguenti informazioni:

- indicazioni sul responsabile delle attività;
- individuazione del referente alla progettazione antincendio generale e, nel caso siano differenti dal precedente, i professionisti antincendio che applicano l'approccio ingegneristico alla sicurezza antincendio;
- dichiarare gli scopi dell'analisi con il metodo prestazionale.

A seguito dell'analisi quantitativa (II fase), il progettista antincendio, a completamento della documentazione di progetto, redige la relazione tecnica nel quale si presentano i risultati ottenuti e le scelte effettuate in questa fase. Per la stesura della relazione tecnica si fa riferimento al punto M.1.7 del D.M. sopra citato, secondo il quale deve contenere almeno le seguenti informazioni:

- modelli di calcolo e i dati di input utilizzati per giustificare l'adattabilità con lo scenario di incendio di progetto;
- il codice di calcolo adottato, in termini di origine e caratteristiche. Devono essere riportate informazioni in merito alla riconosciuta affidabilità del codice, oltre che la sua denominazione, la versione, il distributore o l'autore e la base teorica su cui è stato sviluppato. Inoltre, deve essere dichiarato il campo di applicazione del codice di calcolo con le proprie limitazioni e ipotesi di utilizzo, e la comprovata validazione del software per modellazioni simili a quella al vaglio del progettista;
- i valori di input associati ai parametri, giustificandone la scelta con riferimenti di origine normativa, letteratura tecnico-scientifica o prove sperimentali;

Devono inoltre essere riportati i risultati ottenuti dalla modellazione e il confronto di questi con le soglie di prestazione definite nella prima fase. Per mezzo di tabelle, disegni, schemi grafici e immagini, devono essere adeguatamente illustrati le scelte progettuali che permettono di accertare il raggiungimento delle soglie di prestazione, per sottolineare l'adeguamento ai livelli di sicurezza presi in considerazione.

Una documentazione di progetto che ripercorre, in modo completo, l'iter progettuale, assicura che tutti i soggetti coinvolti prendano conoscenza delle limitazioni riscontrate durante l'analisi in merito alla specifica attività; sarà quindi alla base delle scelte per la gestione della sicurezza sia nel breve che nel lungo periodo.

2.4 Sistema di gestione della sicurezza antincendio - SGSA

Per tenere conto delle specifiche condizioni studiate mediante appositi scenari, il professionista antincendio, in conclusione della sua analisi, sottopone al Comando dei Vigili del Fuoco, congiuntamente alla richiesta di valutazione del progetto, un documento nel quale dispone la gestione delle misure stabilite, tali da mantenere il regolare livello di sicurezza antincendio di progetto.
Un idoneo sistema di gestione della sicurezza antincendio, SGSA, deve essere quindi un utile manuale per lo svolgimento dell'attività, rappresentato da un corretto uso delle procedure operative e da una continua formazione delle figure coinvolte, per il mantenimento di tutti i parametri posti alla definizione degli scenari.
Questo documento deve inoltre contenere le modalità di attribuzione delle responsabilità, all'interno della struttura organizzativa dell'attività, le risorse e le procedure di controllo per mantenere nel tempo le condizioni di sicurezza, secondo gli scenari identificati. Pertanto, il documento deve essere firmato congiuntamente dal responsabile dell'attività che è tenuto a verificare, attraverso una periodica e impegnativa azione di vigilanza, lo stato di sicurezza e richiedere eventuali azioni di correzione dell'analisi.
L'SGSA deve riportare quindi, conformemente a quanto disposto nel D.M. 5 maggio 2007 e dal D.M. 03 agosto 2015, gli espliciti provvedimenti per l'attività in esame in relazione ai seguenti aspetti:

- Organizzazione del personale. Devono essere segnalate tutte le figure coinvolte nell'attività finalizzate alla sicurezza antincendio con i relativi incarichi e responsabilità;
- Identificazione e valutazione dei pericoli derivanti dall'attività. Viene richiesto di esplicitare le procedure per identificare i pericoli e di valutare il rischio, sia in relazione agli scenari individuati nell'analisi prestazionale, sia in riferimento ai parametri significativi agli obiettivi di sicurezza;
- Controllo operativo. Si stabiliscono le procedure per il controllo e la verifica del corretto funzionamento degli impianti e dei dispositivi di sicurezza antincendio messi in atto, sia in condizioni di utilizzo, sia secondo le condizioni di inattività degli stessi;
- Gestione delle modifiche. Occorre stabilire i criteri di valutazione e le procedure per consentire una sensibile variazione al luogo di svolgimento dell'attività. Tale variazione rispetto al costruito non deve produrre sostanziali differenze rispetto allo scenario d'incendio di progetto e mantenere gli obiettivi di sicurezza antincendio fissati. Nel caso in cui vengano rese necessarie tali modifiche, e sia resa evidente una variazione dei parametri alla base della scelta degli scenari, è necessario identificare le procedure per sottoporre nuovamente il progetto all'approvazione del Comando Provinciale dei Vigili del Fuoco;
- Pianificazione di emergenze. Devono essere individuate le azioni e le responsabilità nelle varie fasi di emergenza, in relazione al piano di emergenza interno, compresa quella in

merito ai rapporti con le squadre di soccorso;

- Sicurezza delle squadre di soccorso. Devono essere prese in considerazione anche tutte le misure antincendio necessarie per il corretto svolgimento delle operazioni di soccorso, nonchè gli interventi di formazione del personale, con i relativi aggiornamenti, e le misure di protezione individuali in dotazione e necessarie secondo agli scenari d'incendio ipotizzati;
- Controllo delle prestazioni. È necessario, periodicamente, effettuare un controllo in merito ai reali parametri alla base della scelta degli scenari, attraverso i quali si valuta lo stato dei livelli di prestazione attesi e il conseguimento degli obiettivi di sicurezza antincendio;
- Manutenzione dei sistemi di protezione. Si segnalano le attività di manutenzione, secondo specifici criteri e metodi, dei componenti e dei sistemi di sicurezza antincendio. È inoltre necessario sottolineare i requisiti da verificare in merito alle ditte incaricate per la manutenzione e la loro idoneità all'esecuzione di tale servizio nell'apposito registro;
- Controllo e revisione. In questa sezione vengono trattati i processi e l'impegno diretto del responsabile delle attività a garantire la valutazione periodica per l'idoneità dell'intero sistema di gestione della sicurezza antincendio.

3. Progettare in aree a rischio specifico per atmosfere esplosive

La valutazione preliminare di un rischio è indispensabile per garantire un completo e corretto controllo del fenomeno in esame e per prevenire i possibili effetti involontari legati a processi lavorativi. Permette inoltre al progettista di agire con cognizione di causa per ridurre il pericolo di una specifica attività presa in analisi.
Il rischio viene tipicamente definito attraverso due parametri: la probabilità che un pericolo si manifesti e la misura della conseguenza che questo, se avviene, può causare. Analiticamente il rischio viene indicato secondo la seguente espressione:

$$R = P \cdot M$$

dove

- "R" è la misura del rischio;
- "P" indica la probabilità associata all'evento;
- "M" è la misura della magnitudine delle conseguenze attese.

Questa rappresentazione fornisce al progettista uno strumento oggettivo per porre a confronto il risultato ottenuto con le soglie di ammissibilità definite dal normatore e porre i criteri di accettabilità della progettazione. Tale approccio è applicabile anche per il rischio esplosione.
L'analisi di rischio è un processo codificato, disciplinato e strutturato che consente di determinare la stima e successivamente la valutazione del livello di rischio connesso a determinati scenari incidentali. Esso rappresenta uno degli strumenti principali per la determinazione dei requisiti di tipo tecnico alla base di un successivo processo di individuazione della strategia antincendio da attuare per ridurre la probabilità di occorrenza o la magnitudo delle conseguenze attese, per condursi a una misura del rischio ammissibile[1].
Una valutazione del rischio permette inoltre di individuare gli scenari di pericolo che possono verificarsi attraverso una valutazione probabilistica di eventi a catena, permettendo di indicare le sequenze incidentali più gravose da analizzare.
Alla base di una valutazione di questo tipo, in generale, si richiede una conoscenza accurata e completa dell'attività presa in analisi, per la quale si ritiene necessario un costante aggiornamento da applicarsi a ogni processo di lavorazione e per ogni situazione di funzionamento dell'impianto, in cui può formarsi un'atmosfera esplosiva dovuta da gas o da polveri combustibili o da

1 Fiorentini, L., Marmo, L., La valutazione dei rischi di incendio, EPC Editore, 2011

vapori infiammabili.
La valutazione del rischio esplosione entra a far parte della normativa legata alla sicurezza antincendio solo con l'attuazione del D.M. 3 agosto 2015. Precedentemente non veniva presa in considerazione nel decreto del 10 marzo 1998, ma si demandava ai principi di regolamentazione indicati nel *Testo unico sulla salute e sicurezza sul lavoro* o alle normative di carattere elettrotecnico relativo agli impianti da usare nei luoghi con pericolo di esplosione, nonché alle direttive ATEX.
Ora, con l'emanazione di una specifica Regola Tecnica Verticale, che prende posto all'interno del Codice di prevenzione incendi con il Capitolo V.2, viene applicata la metodologia quantitativa dell'approccio ingegneristico anche al fenomeno esplosivo, ponendosi come possibile strumento di valutazione del rischio delle aree con formazione di atmosfere esplosive.
Questa specifica RTV raccoglie le nozioni disperse tra le normative nazionali e internazionali in merito alle atmosfere esplosive e le presenta in un unico riferimento legislativo: riporta i criteri di zonizzazione delle aree in relazione alla probabilità di formazione delle atmosfere pericolose e i metodi applicabili per la valutazione degli effetti dell'esplosione, oltre alla classificazione delle categorie di azioni per le analisi di tipo strutturale. Introduce, quali novità del panorama normativo di riferimento, la quantificazione del livello di rischio accettabile e le misure per la riduzione del pericolo specifico per abbattere il rischio sugli occupanti, ponendo particolare attenzione, come per tutto il COPI, alla salvaguardia del personale coinvolto.
A questa valutazione di tipo quantitativo si affianca la possibilità di applicare un criterio a carattere qualitativo, mediante il quale determinare il rischio esplosione con valutazioni quanto più complete, ma pur sempre soggettive.
Nel presente capitolo verranno esposte sia l'analisi proposta dalla RTV in merito al rischio esplosione, proponendo l'iter normativo e approfondendo le soluzioni indicate, sia il metodo tradizionale a carattere qualitativo.

3.1 Analisi quantitativa del rischio esplosione

La valutazione e la riduzione dei rischi connessi in attività soggette, per la presenza di sostanze infiammabili allo stato di gas, vapori, nebbie o polveri combustibili, è indicata tra gli obblighi del datore di lavoro ai sensi del Decreto Legislativo 81/2008, per una corretta disamina dei criteri di sicurezza sul posto di lavoro. Per ogni processo di lavorazione, di produzione e per ogni situazione di funzionamento di un impianto in cui può manifestarsi la formazione di atmosfere esplosive, devono essere individuate le misure tecniche necessarie al raggiungimento degli obiettivi di sicurezza, considerando innanzitutto i seguenti tre principi generali (Disposizioni del paragrafo V.2.1 del D.M. 3 agosto 2015):

- Prevenire la formazione di atmosfere esplosive;
- Evitare l'accensione di atmosfere esplosive;
- Attenuare i danni di un'esplosione in modo da garantire la salute e la sicurezza degli oc-

cupanti.

Il D.M. 3 agosto 2015 fornisce una sequenza di fasi che il progettista deve esaminare per l'individuazione del grado di rischio connesso a un'attività, prendendo in analisi tutte le condizioni che porterebbero alla generazione del fenomeno esplosivo e l'utilizzo di sistemi di prevenzione e protezione che giustificherebbero i tre criteri elencati in precedenza.

Tra le fasi iniziali si ritiene necessario individuare le condizioni generali di pericolo di esplosione. Come indicato in precedenza, è di fondamentale importanza conoscere il processo produttivo che si sta analizzando, che deve essere caratterizzato in tutte le sue fasi di attività (normale funzionamento, avvio, fermata ordinaria, arresto di emergenza, guasto, manutenzione), l'ambiente di lavoro nelle sue sezioni più pericolose, nonché le apparecchiature e gli impianti a disposizione. Questa prima analisi permette di individuare le sorgenti di emissione.

Successivamente, individuate le sostanze coinvolte nell'ambiente di lavoro, si prevede una fase di studio delle sostanze coinvolte, per rendere note al progettista le loro caratteristiche chimico-fisiche pertinenti l'esplosione.

Si procede, quindi, alla suddivisione delle aree a rischio in relazione alla frequenza, alla durata e alla quantità dell'emissione delle atmosfere esplosive, in modo tale da individuare le estensioni interessate a livelli di rischio differenti e localizzare l'azione di prevenzione.

L'allegato XLIX al D.Lgs. 81/2008, così come il D.M. 3 agosto 2015, definiscono la classificazione in aree per le atmosfere esplosive secondo tre livelli di probabilità: zone 0, 1, 2 per le sostanze infiammabili di natura gassosa, zone 20, 21, 22 per indicare le aree con sostanze granulate infiammabili, polveri; la loro definizione verrà esposta di seguito insieme ai parametri che ne differenziano il loro confine.

La zonizzazione delle aree a rischio esplosione trova riscontro anche nelle definizioni di sorgenti di innesco descritte nel prf 1.4 - *Tipologie di innesco*, in relazione alla frequenza con cui queste vengono a contatto con la miscela esplosiva:

- Sorgenti di accensione che possono manifestarsi continuamente o frequentemente, in genere presenti durante le normali operazioni;
- Sorgenti di accensione che possono manifestarsi in circostanze rare, in genere a seguito di malfunzionamenti prevedibili;
- Sorgenti di accensione che possono manifestarsi in circostanze molto rare, in genere a seguito di malfunzionamenti estremamente rari.

Analogamente, in termini di attrezzature, sistemi di protezione e componenti utilizzati, le sorgenti di accensione prevedono la seguente classificazione:

- Sorgenti di accensione che possono manifestarsi durante il normale funzionamento;
- Sorgenti di accensione che possono manifestarsi unicamente a seguito di disfunzioni previste;
- Sorgenti di accensione che possono manifestarsi unicamente a seguito di disfunzioni rare.

In questa fase la valutazione del rischio legato agli inneschi deve essere condotta almeno per le

tredici tipologie indicate nella norma UNI EN 1127, e ciascuno di questi deve essere valutato per ogni ambiente, impianto e attrezzatura in opera, considerando però che in nessuna delle zone classificate 0, 1, 2 o 20, 21, 22 è consentito avere attrezzature che presentino inneschi continui o frequenti.

In merito alla declinazione dello stato di funzionamento riportato nelle precedenti classificazioni, si fa riferimento al capitolo G.1.18 del COPI il quale riporta le seguenti definizioni:

- Con funzionamento normale si intende lo stato in cui si trovano apparecchi, sistemi di protezione e componenti che svolgono la loro funzione prevista all'interno dei rispettivi parametri di progettazione;
- Con disfunzione si intende lo stato degli apparecchi, sistemi di protezione e componenti che non svolgono la funzione prevista;
- Con disfunzione prevista si intendono disturbi o guasti dell'apparecchio che si verificano normalmente;
- Con disfunzione rara si intende il tipo di disfunzione che si sa che può accadere, ma solo in rari casi. Due disfunzioni previste indipendenti che separatamente non creerebbero il pericolo di accensione, ma che in combinazione creano il pericolo di accensione, sono considerate una singola disfunzione rara.

Per una valutazione quantitativa del rischio esplosione secondo l'approccio ingegneristico, la fase successiva prevede di determinare la misura della conseguenza attesa, che deve essere quantificata secondo formulazioni semplificate presenti in normativa o espressioni empiriche debitamente riconosciute, che tengono conto delle possibili conseguenze sulle persone esposte, sulle strutture e sugli impianti.

In relazione a quanto già descritto nella seconda fase dell'approccio ingegneristico, l'analisi quantitativa, attraverso validati codici di calcolo riconosciuti o formulazioni semplificate presenti in normativa o espressioni empiriche che legano fra loro le grandezze più significative di una esplosione, quali quelle esposte nel Cap. 5 - *Metodi a confronto per la determinazione dell'effetto da sovrapressione,* è possibile valutare numericamente gli effetti fisici di un'esplosione, quali le fiamme e i gas caldi, l'irraggiamento termico, la proiezione di frammenti o il rilascio di sostanze tossiche o pericolose e, con particolare interesse in questa tesi, la sovrapressione.

Tale fase ha l'obiettivo di mettere in primo luogo la salvaguardia della vita umana, permettendo di verificare, sulla base dei più realistici scenari individuati a seguito dell'analisi probabilistica, il danneggiamento delle strutture di compartimentazione, degli impianti meccanici e degli impianti di protezione attiva che potrebbero essere impraticabili a seguito dell'esplosione, l'agibilità delle misure di protezione adottate sulle fonti di innesco e, ultimo non per importanza, le possibili conseguenze per effetto domino.

Attraverso i risultati così ottenuti, si procede, quindi, al confronto tra il rischio stimato con il valore quantitativo dell'effetto e la misura del rischio accettabile. Questa fase permette di stabilire se sono necessari interventi progettuali per la riduzione del livello di rischio effettivo attraverso

misure di prevenzione o gestionali, da preferire alle misure di tipo protettivo.
La ponderazione del rischio prevede quindi di porre a confronto due entità: da un lato il rischio stimato (R) e dall'altra il rischio accettabile (Ra), supposto che sia noto. L'utilizzo di mezzi per la riduzione del rischio stimato risulta quindi necessario se questo supera i livelli di rischio tollerabili[2]:

$$R > Ra$$

Il rischio accettabile è confrontabile in termini quantitativi solo per alcuni pericoli sui quali sono stati condotti studi o rilievi statistici; in altri casi è da preferire la valutazione qualitativa.
I termini di confronto quantitativi del rischio accettabile non vengono riportati nel D.M. 3 agosto 2015, ma sono rintracciabili nei riferimenti letterari e in normativa, mediante tabelle che mettono in corrispondenza il valore limite con il livello di danno. Particolare riferimento è da rivolgersi al Decreto Ministeriale dei Lavori Pubblici 9 maggio 2001 - *Requisiti minimi di sicurezza in materia di pianificazione urbanistica e territoriale per le zone interessate da stabilimenti a rischio di incidente rilevante*.
I livelli di soglia del rischio accettabile verranno riportati e approfonditi nel prf. 5.4 - *Criteri di ponderazione dell'effetto da sovrapressione*.
Infine, tra le fasi proposte dal Codice di Prevenzione Incendi, si indicano le misure finalizzate alla riduzione del rischio esplosione e alla salvaguardia degli occupanti.
Tra le strategie per la riduzione del rischio esplosione, è possibile adottare misure di prevenzione, misure di protezione e misure gestionali. Le misure di prevenzione e gestionali sono da preferire alle misure di protezione, a cui si ricorrono soltanto quando non si riesce a garantire un livello di rischio accettabile con le altre due[3].
Le misure di prevenzione riguardano la riduzione della probabilità di formazione di un innesco in presenza di un'atmosfera esplosiva. Le misure gestionali vengono invece adottate per la riduzione della probabilità di esplosione mediante l'adozione di procedure di corretta organizzazione del lavoro e dei processi produttivi, alcune delle quali vengono riportate nelle Tabelle V.2-3 e V.2-4 del riferimento normativo in analisi. Le misure di protezione, infine, permettono di mitigare gli effetti di un'esplosione entro limiti accettabili.
Vengono fornite inoltre alcune misure per la messa in sicurezza degli occupanti, ponendo in primo luogo l'attenzione a ridurre l'esposizione degli stessi agli effetti di un'esplosione. Tra gli accorgimenti utili si propone il trasferimento delle sorgenti di pericolo all'esterno del fabbricato, con schermature o debitamente distanziate, oppure all'interno del locale, ma opportunamente protetta rispetto alle posizioni fisse di lavoro. Si consiglia, inoltre, di porre le fonti di pericolo in

2 Ponderazione del rischio secondo *Manuale per l'applicazione delle direttive ATEX*, Cavalieri A., 2011, EPC Editore

3 Indicazione tratta dal paragrafo V.2.3 - *Misure per la riduzione del rischio esplosione* - comma 2 del D.M. 3 agosto 2015

locali dove è meno frequente la presenza di occupanti, oppure dotati di misure di rilevamento che permettano all'occupante di raggiungere un luogo sicuro prima dello sviluppo dell'esplosione.
Particolare attenzione viene posta anche ai prodotti impiegabili dove sia inevitabile la formazione delle atmosfere esplosive.
I prodotti utilizzabili devono rispettare le indicazioni della Direttiva ATEX 2014/34/UE. Sulla base delle definizioni delle Categoria 1, 2 e 3 per le apparecchiature, i componenti e i sistemi di protezione facenti parte del II Gruppo della direttiva di prodotto ATEX, già presentati nel prf. 1.2 - Quadro normativo sulle esplosioni, è possibile un'associazione tra la categoria del prodotto e la zona di utilizzo di questa, come riportato nella Tabella 3.2.

ATMOSFERA ESPLOSIVA	ZONA	CATEGORIA ATEX
Gas	0	1G
	1	1G, 2G
	2	1G, 2G, 3G
Polveri	20	1D
	21	1D, 2D
	22	1D, 2D, 3D

Tabella 3.1 - Compatibilità tra le zone classificate per la presenza di atmosfere esplosive e le Categoria ATEX per la classificazione degli apparecchi, componenti e i sistemi di protezione

In conclusione, la procedura quantitativa per una valutazione del rischio esplosione secondo il D.M. 3 agosto 2015 dispone di un procedimento a fasi che fornisce al progettista una guida completa:

- Individuazione delle condizioni generali di pericolo di esplosione;
- Identificazione delle caratteristiche delle sostanze infiammabili o polveri combustibili;
- Determinazione della probabilità di formazione, della durata e dell'estensione delle atmosfere esplosive;
- identificazione dei potenziali pericoli di innesco;
- valutazione dell'entità degli effetti prevedibili di un'esplosione;
- quantificazione del livello di rischio accettabile;
- adozione delle misure finalizzate alla riduzione del rischio esplosione.

3.1.1 Zonizzazione delle aree

Si definisce area esposta a rischio di esplosione uno spazio di estensione determinata "in cui è possibile formarsi un'atmosfera esplosiva in quantità tali da richiedere particolari provvedimenti di protezione per tutelare la sicurezza e la salute dei lavoratori interessati"[4].
Le aree a rischio esplosione vengono ripartite in zone sulla base della frequenza e della durata della presenza di atmosfere esplosive nello spazio indicato. In relazione alla ripartizione delle zone, come indicato tra gli obblighi del Datore di Lavoro prescritti agli art. 291 e 293 del D.Lgs. 81/2008 e con riferimento all'Allegato XLIX e all'Allegato L dello stesso, saranno disposti i livelli di provvedimento più idonei da adottare per l'abbattimento del rischio stimato.
Le zone vengono così ripartite per i luoghi con la presenza di gas, vapori o nebbie:

Zona 0: Area in cui è presente in permanenza o per lunghi periodi o spesso un'atmosfera esplosiva consistente in una miscela di aria e sostanze infiammabili sotto forma di gas, vapore o nebbia;

Zona 1: Area in cui occasionalmente durante le normali attività è probabile la formazione di un'atmosfera esplosiva consistente in una miscela di aria e sostanze infiammabili sotto forma di gas, vapore o nebbia;

Zona 2: Area in cui durante le normali attività non è probabile la formazione di un'atmosfera esplosiva consistente in una miscela di aria e di sostanze infiammabili sotto forma di gas, vapore o nebbia e, qualora si verifichi, sia unicamente di breve durata.
Analogamente, per i luoghi con la presenza di nubi di polveri o depositi di polvere viene indicata la seguente suddivisione:

Zona 20: Area in cui è presente in permanenza o per lunghi periodi o spesso un'atmosfera esplosiva sotto forma di nube di polvere combustibile nell'aria.

Zona 21: Area in cui occasionalmente durante le normali attività è probabile la formazione di un'atmosfera esplosiva sotto forma di nube di polvere combustibile nell'aria.

Zona 22: Area in cui durante le normali attività non è probabile la formazione di un'atmosfera esplosiva sotto forma di nube di polvere combustibile e, qualora si verifichi, sia unicamente di breve durata.
Per determinare il tipo di zona e l'estensione della stessa deve essere fatta distinzione tra gas, vapori, liquidi o nebbie infiammabili e polveri combustibili.
Per i gas, i vapori, i liquidi e le nebbie si può determinare la zona pericolosa (zona 0, 1, 2) in relazione al grado di emissione della sostanza e alla ventilazione, seguendo le indicazioni proposte

4 Definizione tratta da D.Lgs. 81/2008, Allegato XLIX comma 1

dalla normativa CEI EN 60079-10-1:2016[5].
Una volta individuate le sorgenti di emissioni, si determinano, per ognuno di queste, il grado di emissione della sostanza secondo le seguenti tre definizioni:

- Grado continuo: emissione continua o che può avvenire frequentemente o per lunghi periodi;
- Grado primo: emissione che può avvenire periodicamente od occasionalmente durante il funzionamento normale;
- Grado secondo: emissione che non è prevista durante il funzionamento normale e che, se avviene, è con frequenza bassa e per brevi periodi.

È necessario poi indicare il grado e la disponibilità della ventilazione relativi all'ambiente in cui si trovano le sorgenti di emissione.
Per il grado di ventilazione, il riferimento normativo del Comitato Elettrotecnico Italiano (CEI) sopra citato definisce in modo quantitativo la ventilazione come la quantità di aria che investe la sorgente di emissione in rapporto alla quantità di sostanze infiammabili emesse nell'ambiente. La ventilazione può quindi limitare la presenza di atmosfera esplosiva e ridurre la frequenza della stessa. Il grado di ventilazione viene classificato in alto, medio, basso e di seguito se ne riporta la descrizione associata:

- Un grado alto di ventilazione permette la riduzione della concentrazione in prossimità della sorgente di emissione in modo praticamente istantaneo, limitando la concentrazione al di sotto del LEL. Ne risulta una zona di piccola estensione, tale da poter rendere trascurabile l'estensione della zona pericolosa. Quando la disponibilità della zona non è buona, la suddetta zona di estensione trascurabile può essere circondata da un altro tipo di zona.
- Il grado di ventilazione medio indica la possibilità di influire sulla concentrazione, determinando una zona pericolosa entro limiti definiti mentre avviene l'emissione e tale da limitare il tempo di persistenza dell'atmosfera esplosiva al cessare dell'emissione. L'estensione e il tipo di zona sono condizionati dalle grandezze caratteristiche del progetto.
- La ventilazione è di grado basso se non risulta capace di controllare la concentrazione mentre avviene l'emissione e/o non può pervenire la persistenza eccessiva di un'atmosfera esplosiva dopo l'arresto dell'emissione.

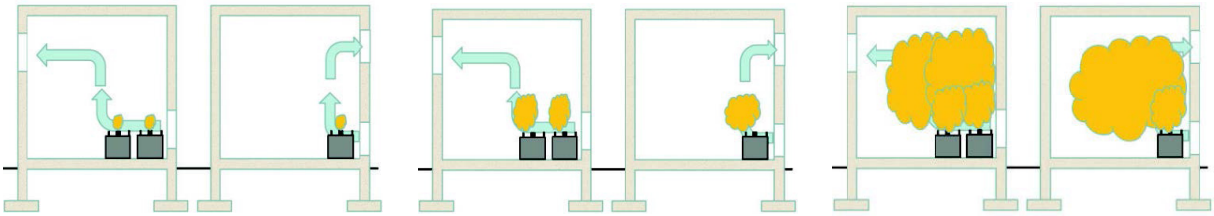


Figura 3.1 - Rappresentazione dei gradi di ventilazione: Alto (a sinistra), Medio (centro), Basso (a destra)

5 La normativa CEI EN 60079 Parte 10-1 è denominata *Classificazione dei luoghi - Atmosfere esplosive per la presenza di gas.* Entra in vigore dal marzo 2016, anno di pubblicazione, in sostituzione della precedente CEI EN 60079-10-1:2010, che però rimane applicabile fino al 13 ottobre 2018.

Ai fini analitici i tre gradi di ventilazione vengono determinati, sia per ambienti aperti che per ambienti chiusi, attraverso tre parametri: volume ipotetico di atmosfera parzialmente esplosiva (V_z), il tempo di persistenza (t) e la concentrazione percentuale media di sostanza infiammabile nell'atmosfera del volume totale dell'ambiente considerato (X_m%).

GRADO DELLA EMISSIONE	GRADO DELLA VENTILAZIONE						
	ALTO			MEDIO			BASSO
	DISPONIBILITÀ DELLA VENTILAZIONE						
	BUONA	ADEGUATA	SCARSA	BUONA	ADEGUATA	SCARSA	BUONA ADEGUATA O SCARSA
Continuo	Zona 0 NE [6] (Zona non pericolosa)	Zona 0 NE [6] + Zona 2 [8]	Zona 0 NE [6] + Zona 1 [8]	Zona 0	Zona 0 + Zona 2 [8]	Zona 0 + Zona 1 [8]	Zona 0
Primo	Zona 1 NE [6] (Zona non pericolosa)	Zona 1 NE [6] + Zona 2 [8]	Zona 1 NE [6] + Zona 2 [8]	Zona 1	Zona 1 + Zona 2 [8]	Zona 1 + Zona 2 [8]	Zona 1 o Zona 0 [7]
Secondo	Zona 2 NE [6] (Zona non pericolosa)	Zona 2 NE [6] (Zona non pericolosa)	Zona 2	Zona 2	Zona 2	Zona 2	Zona 1 o anche Zona 0 [6]

Tabella 3.2 - Determinazione del tipo di zone in base alla ventilazione e al grado di emissione secondo CEI EN 60079-10-1:2016[9]

Un altro sottoinsieme necessario a definire la zona di pericolosità è la disponibilità del grado di ventilazione considerato. Questo viene caratterizzato nella normativa di riferimento CEI EN 60079-10-1 secondo tre livelli:

- La disponibilità è buona se considerata presente con continuità quando la sorgente di emissione è attiva. Possono essere ammesse brevissime interruzioni. Con ventilazione naturale all'aperto, la disponibilità dell'aria buona si assume con velocità dell'aria pari a 0,5 m/s;
- Viene considerata adeguata la disponibilità di ventilazione quando è presente durante il funzionamento normale, con sorgente di emissione attiva. Sono ammesse delle interruzioni purché siano poco frequenti e per brevi periodi;
- Per ventilazione scarsa si intende una ventilazione che non corrisponde ai requisiti di "adeguata" o "buona" disponibilità. Non sono previste interruzioni per lunghi periodi quando la sorgente di emissione è attiva.

6 Le zone 0 NE, 1 NE e 2 NE indicano un'area teorica di estensione trascurabile.
7 É zona 0 se la ventilazione è così debole e l'emissione è tale che un'atmosfera esplosiva esiste praticamente in continuazione (si è vicino a una situazione con assenza di ventilazione).
8 Quando il grado della ventilazione è "Alto" la zona potrebbe essere di estensione trascurabile.
9 + sta a indicare "circondata da"

Definiti i criteri per determinare il grado di emissione di ciascuna sorgente e le caratteristiche di ventilazione relativa all'ambiente, per ogni sorgente è possibile stabilire il tipo di zona pericolosa con la Tabella 3.3, fornita dalla normativa CEI EN 60079-10-1 in merito alla classificazione delle zone per i gas.

Si consideri il caso illustrato in Figura 3.3 di una pompa industriale di liquido infiammabile posta a livello del suolo in un ambiente chiuso. Questa abbia una portata di 50m³/h e funzionamento a bassa pressione.

Nell'ambiente sia presente una ventilazione artificiale con grado medio e disponibilità adeguata.

In questo caso la sorgente di emissione è costituita da una tenuta della pompa di tipo premistoppa senza ghiera per il controllo del flusso in uscita e una conseguente pozza al livello del suolo; inoltre è prevista l'emissione del fluido in funzionamento ordinario dell'impianto. Pertanto il grado dell'emissione è di tipo primo.

Si individuano pertanto, con l'ausilio della Tabella 3.3, la presenza della zona 1 e della zona 2.

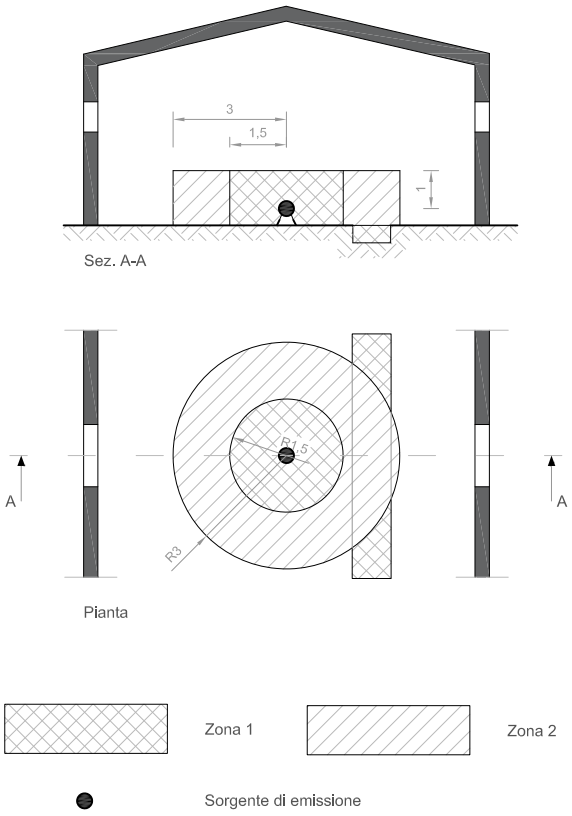


Figura 3.2 - Esempio di zonizzazione per un impianto di liquido infiammabile emesso da pompa [9]

La zona 1 si estende per 1.5m in orizzontale dalla sorgente di emissione e per 1m in verticale sopra la sorgente. La zona 1 è anche individuata per tutto il volume della fossa.

La zona 2 rappresenta un volume di 3m in orizzontale dalla sorgente di emissione e 1m un verticale.

Per le polveri, invece, esiste una corrispondenza biunivoca tra la zona pericolosa (zona 20, 21, 22) e il grado di emissione (continuo, primo grado, secondo grado).

Un'emissione di grado continuo genera una zona 20, un'emissione di primo grado una zona 21 e un'emissione di secondo grado una zona 22. Tale relazione è valida in assenza di sistemi di bonifica, ovvero sistemi e accorgimenti volti ad asportare la polvere combustibile presente in ambiente, e senza perturbazioni o vortici che varierebbero il grado di ventilazione.

Per le zone in ambiente aperto, la zona pericolosa si delimita verso il basso, fino alla superficie

10 Esempio tratto da *Guida all'applicazione delle direttive ATEX*, Cavaliere A., Scardamaglia P., EPC Editore.

di deposito, e con una estensione orizzontale almeno pari alla distanza pericolosa in relazione al danno preso in esame.

AMBIENTE	GRADO DI EMISSIONE DELLA SORGENTE DI EMISSIONE		
	CONTINUO	PRIMO	SECONDO
Chiuso	Zona 20 + Zona 22	Zona 21 + Zona 22	Zona 22
Aperto	Zona 20	Zona 21	Zona 22

Tabella 3.3 - Zone pericolose per le polveri senza provvedimenti di bonifica secondo CEI EN 60079-10-1:2016

Il tipo di zona per le polveri è quindi generalmente determinato in relazione al grado di emissione della sostanza, all'efficacia e alla disponibilità del sistema di bonifica, come indicato dalla normativa CEI EN 60079-10-2[6].
Per stabilire il grado di efficacia di un sistema di bonifica per asportazione di polveri, si richiede di aver nota la portata massima di emissione della polvere dalla sorgente. La norma sopra citata definisce i seguenti tre gradi di efficacia:

- Un sistema artificiale di asportazione di grado alto permette di ridurre la concentrazione di polvere nell'aria al di sotto del LEL attorno alla sorgente di emissione e all'interno del sistema di aspirazione in modo istantaneo;
- Il grado medio indica che il sistema non è capace di ridurre la concentrazione di polvere nell'aria al di sotto del LEL attorno alla sorgente di emissione e all'interno del sistema di aspirazione, ma è capace di catturare tutta la polvere emessa dalla sorgente, considerando il grado di emissione per cui il sistema è stato dimensionato;
- Se il sistema di asportazione è di grado basso questo non permette di ridurre la concentrazione di polvere nell'aria al di sotto del LEL, né attorno alla sorgente di emissione, né all'interno del sistema di aspirazione e non è capace di catturare tutta la polvere emessa.

Analogamente, la disponibilità del sistema di bonifica prevede i seguenti tre livelli:

- Per buona disponibilità si intende quando l'asportazione è presente in continuità;
- Adeguata disponibilità prevede l'asportazione durante tutto il funzionamento normale. Sono ammesse delle interruzioni purché poco frequenti e per brevi periodi;
- Il sistema di asportazione è considerata scarsa se non corrisponde ai requisiti di adeguata o buona, anche se sono previste interruzioni per lunghi periodi.

Per classificare un'area secondo una zona pericolosa per le polveri combustibili, in presenza di un sistema di aspirazione e captazione, occorre distinguere il volume compreso tra la sorgente di emissione e la bozza di aspirazione (cono di aspirazione) e la zona pericolosa al di fuori di tale volume.

6 La normativa CEI EN 60079 Parte 10-2 è denominata *Classificazione dei luoghi - Atmosfere esplosive per la presenza di polveri.* Entra in vigore dal marzo 2016, anno di pubblicazione, in sostituzione della precedente CEI EN 60079-10-1:2010, che però rimane applicabile fino al 13 ottobre 2018.

Ora è possibile determinare la zona di pericolo mediante opportune tabelle estratte dalla norma di riferimento per le polveri e riportate di seguito.

GRADO DELLA EMISSIONE	GRADO DELLA CAPTAZIONE E ASPORTAZIONE DELLA POLVERE						
	ALTO			MEDIO			BASSO [6]
	DISPONIBILITÀ DELLA CAPTAZIONE E ASPORTAZIONE DELLA POLVERE						
	BUONA	ADEGUATA	SCARSA	BUONA	ADEGUATA	SCARSA	BUONA ADEGUATA O SCARSA
Continuo	Zona 20 NE [12] (Zona non pericolosa)	Zona 20 NE [12] + Zona 22 [14]	Zona 20 NE[12] + Zona 21 [15]	Zona 20	Zona 20 + Zona 22 [14]	Zona 20 + Zona 21 [15]	Non considerato
Primo	Zona 21 NE [12] (Zona non pericolosa)	Zona 21 NE [12] + Zona 22 [14]	Zona 21 NE[12] + Zona 22 [15]	Zona 21	Zona 21 + Zona 22 [14]	Zona 21 + Zona 22 [15]	Non considerato
Secondo	Zona 22 NE [12] (Zona non pericolosa)	Zona 22 NE [12] (Zona non pericolosa) [14]	Zona 22 [15]	Zona 22	Zona 22 [14]	Zona 22 [15]	Non considerato

Tabella 3.4 - Zone pericolose esterne al cono di aspirazione delle polveri [9]

DISPONIBILITÀ DEL SISTEMA	GRADO DI EMISSIONE DELLA SORGENTE DI EMISSIONE		
	CONTINUO	PRIMO	SECONDO
Buona	Zona 20	Zona 21	Zona 22
Adeguata	Zona 20	Zona 21	Zona 22

Tabella 3.5 - Zone pericolose interne al cono di aspirazione delle polveri con grado di efficacia medio

La Tabella 3.6 si riferisce al solo grado medio di efficacia del sistema di aspirazione. Questo poiché se si considera un grado di efficacia alto, si avrebbe che nella zona interna al cono di aspirazione non si formerebbero zone pericolose. Allo stesso modo, con un grado di efficienza basso si avrebbe una condizione pari a non avere il sistema di bonifica, tale per cui questo grado può non essere considerato.

Si consideri l'esempio risolto in Figura 3.4. Questo rappresenta un'unità di svuotamento per polvere combustibile avente una grandezza media del particolato inferiore a 0.5mm. Il sistema si colloca in un ambiente senza estrazione di aria, rendendo nulli il grado e la disponibilità della ventilazione.

La sorgente di emissione è interna alla tramoggia verso il processo di lavorazione, e la bocca di

12 Le zone 20 NE, 21 NE e 22 NE indicano un'area teorica di estensione trascurabile.

13 Il grado Basso non è considerato in quanto le zone pericolose devono essere definite considerando l'assenza del sistema di captazione e asportazione della polvere.

14 É prevista la formazione di strati di polvere di spessore generalmente inferiore a 5 mm.

15 É prevista la formazione di strati di polvere di spessore generalmente maggiore di 5 mm, da valutare caso per caso.

carico è aperta per il versamento delle sacche nella tramoggia. Pertanto si individuano due gradi di emissione: continuo all'interno della tramoggia verso il processo e primo sulla bocca della stessa.
Si osserva che l'interno della tramoggia, data la presenza frequente, o continua, di una miscela di polveri esplosive in aria, si classifica come zona 20. Poichè la bocca di carico è aperta, attorno a questa si individua una zona 21 con estensione di 1m dal suo bordo e dal pavimento.

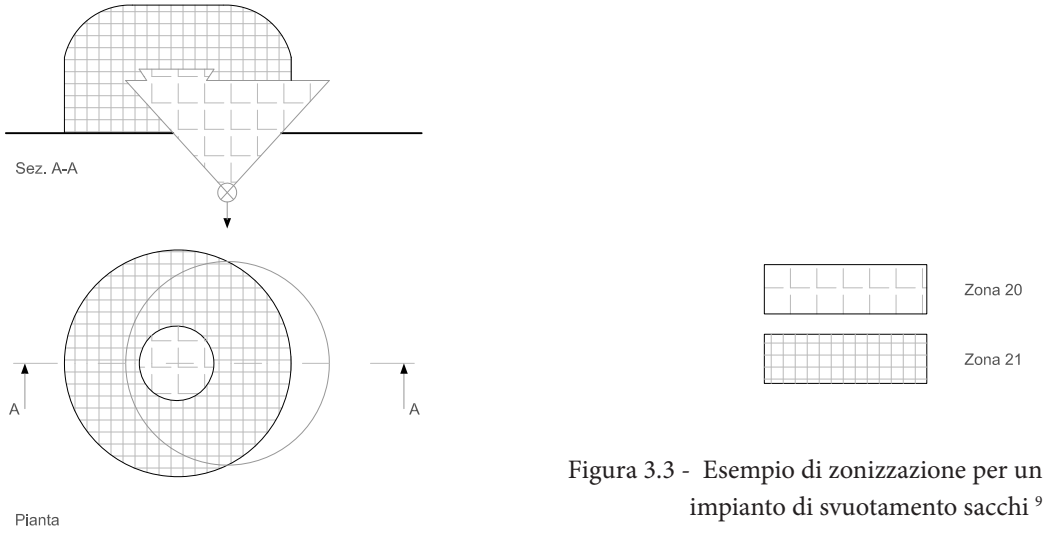


Figura 3.3 - Esempio di zonizzazione per un impianto di svuotamento sacchi [9]

3.1.2 Scenari del rischio esplosione

La valutazione delle condizioni di sicurezza, in qualsiasi campo di applicazione, prevede di identificare le possibili sequenze di eventi imprevisti che conducono, mediante un meccanismo di concatenazione, al verificarsi di un incidente rilevante non desiderato (*top event*).
Viene quindi effettuata, inizialmente, una valutazione puramente probabilistica del rischio incidente mediante una metodologia sistematica qualitativa, ma pur sempre realisticamente ipotizzabile secondo le condizioni di esercizio previste dall'attività.
Per definire uno scenario, ad ogni possibile conseguenza il progettista dovrà prevedere le seguenti domande:
1) Che cosa può andare storto? Quali sono gli eventi iniziatori che conducono alla conseguenza?
2) Quali sono e quanto sono gravi i potenziali danni?
3) Qual è la probabilità o frequenza di queste conseguenze indesiderate?
La definizione degli scenari, e la scelta di quelli probabilisticamente più gravosi, costituisce una fase fondamentale, che il professionista antincendio deve attentamente valutare per l'applicazione dell'approccio ingegneristico.
Il D.M. 3 agosto 2015 dispone già alcune indicazioni in merito alla scelta degli scenari da analizzare. Il paragrafo V.2.2.5 indica due principali condizioni che dovranno essere prese in analisi:

- All'esplosione potrebbe seguire un incendio. Questo scenario deve tenere conto dell'indisponibilità di quanto danneggiato dall'esplosione;
- A seguito dell'incendio potrebbe seguire un'esplosione. Questo scenario deve tenere conto dell'indisponibilità di quanto danneggiato dall'incendio.

Nella fase di identificazione degli scenari, il professionista del settore deve prendere in considerazione gli incidenti di esplosione o incendio che hanno interessato edifici simili, secondo un'analisi storica condotta su attività analoghe a quella considerata, riportando l'evento iniziatore e le condizioni dell'ambiente circostante, le condizioni di propagazione, l'azione degli impianti tecnologici e dei sistemi di protezione attiva, le azioni eseguite dai componenti della squadra antincendio e la distribuzione e il comportamento degli occupanti.
Altri scenari plausibili dovranno essere tenuti in considerazione e sviluppati mediante le tecniche di valutazione probabilistica della sicurezza. Tra le metodologie più usate in questo ambito, si fa riferimento all'albero degli eventi (*Event Tree*) e all'albero dei guasti (*Fault Tree*). Tali tecniche permettono al progettista antincendio di individuare ogni possibile sequenza pericolosa e, al contempo, di selezionare gli scenari più gravosi, al fine di ridurre il numero analisi da condurre, definendo il sottoinsieme degli scenari d'incendio di progetto.
In conclusione, ai fini dell'approccio ingegneristico di cui riporta questa trattazione, gli scenari di progetto opportunamente scelti dovranno essere tradotti in termini quantitativi, definendo gli input di calcolo per una descrizione dettagliata in relazione alla verifica delle soluzioni progettuali. Il professionista antincendio quindi indicherà i valori quantitativi per i criteri di attività, occupanti e incendio, opportunamente riportati secondo le indicazioni del D.M. 8 agosto 2015 nei paragrafi M.2.4.1, che descrivono le caratteristiche architettoniche e strutturali, impiantistiche, gestionali, e i fattori ambientali che influenzano le prestazioni antincendio dell'attività, M.2.4.2, per descrivere l'affollamento e la distribuzione degli occupanti, la tipologia, la famigliarità degli stessi con la struttura e lo stato di veglia, M.2.4.3, infine, per attribuire le caratteristiche della tipologia del focolare e la localizzazione di questo, la distribuzione spaziale del materiale combustibile, le fonti di innesco, i dati sperimentali connessi allo specifico caso studio pubblicati da fonti autorevoli.

3.1.2.1 Albero dei guasti

L'albero dei guasti, o FTA da *Fault Tree Analysis*, è la principale tecnica utilizzata nella valutazione del rischio ATEX per individuare gli scenari incidentali possibili.
Questa analisi risponde principalmente alla domanda "Cosa può aver causato il *top event*?". Permette quindi di poter rappresentare, secondo un'opportuna rappresentazione grafica, i rapporti di relazione tra gli eventi intermedi sui componenti e l'evento indesiderato sull'intero sistema, secondo un'ottica *top-down*.
I guasti sui componenti vengono classificati secondo le seguenti tre categorie:

- Il Guasto primario è quello dovuto alla costruzione o alle caratteristiche dei materiali del componente;
- Il Guasto secondario è un guasto imputato a influenze esterne, quali condizioni ambientali o per l'influenza di altri componenti del sistema;
- Il Guasto di comando è causato da errori di natura umana o da un uso scorretto del sistema.

Gli eventi base sono guasti primari, imputabili tipicamente alla scarsa manutenzione dei componenti. I guasti secondari e di comando sono eventi intermedi che richiedono un livello di indagine aggiuntivo.
L'albero degli eventi rappresenta graficamente le cause concatenanti secondo i principi dell'algebra booleana. Vengono solitamente utilizzati gli operatori logici rappresentati nella Tabella 3.7 per legare gli eventi tra di loro. Altre simbologie di connessione logiche sono riportate nella norma inglese EN BS 61025:2007 - *Fault tree analysis (FTA)*.

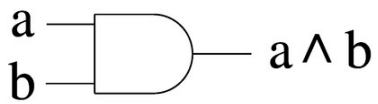
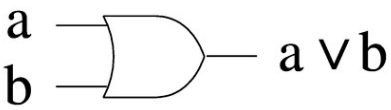
SIMBOLO DELLA PORTA LOGICA	PORTA LOGICA	RELAZIONE
	AND	L'evento risultante avviene solo se si verificano tutti gli eventi in input
	OR	L'evento risultante avviene se si verifica almeno uno degli eventi in input

Tabella 3.6 - Porte logiche AND e OR

L'applicazione di questo metodo di analisi, riassumendo, permette di indicare una catena di eventi sequenziali attraverso i quali si giunge alla costruzione dell'albero di guasto per permettere di quantificare il *top event*.
Innanzitutto bisogna individuare l'evento che si vuole analizzare, il top event. Non basta indicare che l'evento in analisi è semplicemente un incendio o un'esplosione, ma specificare la condizione di evento indesiderato in relazione alla specifica attività.
Successivamente si passa alla costruzione dell'albero dei guasti, individuando tutti i possibili eventi intermedi fino ad arrivare agli eventi base per ogni cammino percorribile. Tale fase si concretizza con l'utilizzo delle porte logiche AND e OR, che collegano tra logo gli eventi sequenziali.
Infine, si passa alla risoluzione dell'albero per definire quantitativamente la frequenza di accadimento del *top event*.
Per la soluzione dell'albero è possibile procedere attraverso l'analisi *minimal cut set*, che consiste nel semplificare l'albero fino a evidenziare tutte le minime combinazione di guasti sui componenti del sistema che portano all'evento finale, ovvero a definire i sistemi critici.

Le semplificazioni seguono le regole dell'algebra booleana, riportate di seguito, attraverso le quali si giunge a trovare un nuovo albero, più semplice da studiare, ma logicamente equivalente al precedente.

Proprietà commutativa	$A \vee B = B \vee A$
	$A \wedge B = B \wedge A$
Proprietà associativa	$A \wedge (B \wedge C) = (A \wedge B) \wedge C$
	$A \vee (B \vee C) = (A \vee B) \vee C$
Proprietà distributiva	$A \wedge (B \vee C) = A \wedge B \vee A \wedge C$
Proprietà di assorbimento	$A \vee A = A$
	$A \wedge A = A$
Proprietà di idempotenza	$A \vee A \wedge B = A$

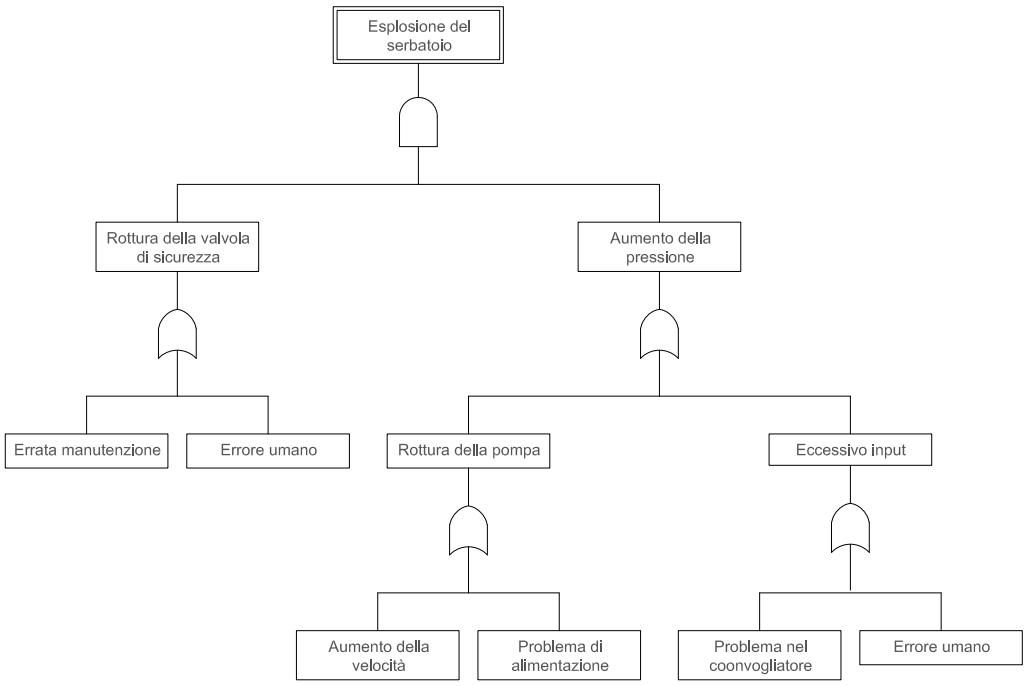


Figura 3.4 - Esempio di Albero dei guasti [10]

3.1.2.2 Albero degli eventi

L'albero degli eventi rappresenta, come per l'albero dei guasti, una descrizione schematica di tutti i possibili scenari, secondo i quali un particolare evento può svilupparsi in un sistema. L'analisi condotta secondo l'albero degli eventi segue le indicazioni fornite sella normativa BS EN 62502:2011 - *Analysis techniques for dependability. Event tree analysis (ETA).*

A differenza del precedente, però, l'albero degli eventi riporta una sequenza di relazioni a partire da un prefissato evento iniziatore, secondo un approccio causa-conseguenza, alla fine della quale sarà possibile associare, per ognuno di questi, la relativa probabilità di accadimento.

3.2 Analisi qualitativa del rischio esplosione

L'analisi qualitativa per la valutazione del rischio esplosione prevede l'elaborazione sistematica e documentata di informazioni, per prendere decisioni in merito ai fattori legati al rischio esplosione.
Il rischio viene visto, alla base, come combinazione tra probabilità di accadimento, P, e conseguenze associate, D, ai quali vengono associati valori numerici convenzionali di una scala qualitativa, procedendo secondo semplici passi:

- Identificazione dei pericoli;
- Determinazione della probabilità e durata di atmosfere esplosive;
- Determinazione della presenza e dell'efficacia di sorgenti di innesco;
- Determinazione delle conseguenze e dell'entità dell'esplosione;
- Identificazione della funzione di rischio più opportuna e dei relativi criteri di accettabilità.

Dopo aver identificato i pericoli legati alla specifica attività, e documentati sul processo lavorativo e sulle sostanze coinvolte, se si è in presenza di atmosfere potenzialmente esplosive, si procede a valutare la probabilità, la quantità e la durata della stessa.
Nell'analisi qualitativa la probabilità che si verifichi un'esplosione, P, viene connessa al tipo di zona e alla probabilità che siano presenti sorgenti efficaci di accensione.
Il tipo di zona indicata per un'area pericolosa costituisce intrinsicamente la probabilità che possa crearsi un'atmosfera esplosiva, PSE. Questa viene suddivisa qualitativamente in quattro livelli, rispettivamente per le zone 0/20, 1/21, 2/22 e per le zone non pericolose indicate con NE. A ciascuno di questi è assegnato un punteggio come indicato nella seguente tabella:

PSE	DEFINIZIONE	PUNTI
PSE4	Zona 0/20 - Area in cui è presente in permanenza o per lunghi periodi o frequentemente un'atmosfera esplosiva consistente in una miscela di aria e di sostanze infiammabili sotto forma di gas, vapore, nebbia o polveri.	4
PSE3	Zona 0/20 - Area in cui la formazione di un'atmosfera esplosiva, consistente in una miscela di aria e di sostanze infiammabili sotto forma di gas, vapori, nebbia o polveri, è probabile che avvenga occasionalmente durante le normali.	3
PSE2	Zona 0/20 - Area in cui durante le normali attività non è probabile la formazione di un'atmosfera esplosiva consistente in una miscela di aria e di sostanze infiammabili sotto forma di gas, vapore, nebbia o polveri o, qualora si verifichi, sia unicamente di breve durata.	2
PSE1	Zona NE - Area non pericolosa, nella quale è quasi impossibile che si formi un'atmosfera esplosiva consistente in una miscela di aria e di sostanze infiammabili sotto forma di gas, vapore, nebbia o polveri.	1

Tabella 3.7 - Probabilità PSE di formazione dell'atmosfera esplosiva

Analogamente, la capacità di una sorgente di innesco, PINN, di essere sufficientemente energetica per passare dal pericolo al danno, viene suddivisa in quattro livelli. PINN 4 rappresenta la presenza permanente di una sorgente di innesco. PINN 3 e PINN 2 indicano che l'innesco non è previsto nel progetto come elemento ordinario, ma è un contatto presente, rispettivamente,

talvolta, o quasi mai, nella zona. Il PINN 1 rappresenta un contatto mai presente tra l'atmosfera esplosiva e la sorgente di innesco.

PINN	DEFINIZIONE	PUNTI
PINN 4 (Molto probabile)	Le sorgenti di accensione sono presenti in maniera continua o frequente durante il normale funzionamento.	4
PINN 3 (Probabile)	Le sorgenti di accensione possono manifestarsi in circostanze rare a seguito di malfunzionamenti.	3
PINN 2 (Poco probabile)	Le sorgenti di accensione possono manifestarsi in circostanze molto rare a seguito di malfunzionamenti.	2
PINN 1 (Improbabile)	Sorgenti di accensione assenti o, se presenti, praticamente non efficaci.	1

Tabella 3.8 - Probabilità PINN di innesco dell'atmosfera esplosiva

Una volta determinati PSE e PINN, la probabilità che si verifichi un'esplosione può essere ricavata dalla matrice che segue, riportando il valore corrispondente ai due parametri sugli assi.

PINN				
4	1	3	4	4
3	1	2	4	4
2	1	2	2	3
1	1	1	1	1
	1	2	3	4

PSE

Tabella 3.9 - Matrice di probabilità

La probabilità che possa verificarsi un'esplosione, per la presenza di un'atmosfera pericolosa e di una sorgente di innesco energeticamente sufficiente, si presenta sotto tre livelli (improbabile, poco probabile, probabile, molto probabile) a ciascuno dei quali è associato un valore numerico che servirà per definire la soglia di rischio finale.

PROBABILITÀ DI ESPLOSIONE, P	DEFINIZIONE QUALITATIVA
1	L'esplosione è IMPROBABILE quando il suo manifestarsi è legato ad una serie di eventi tra loro indipendenti poco probabili. Non si sono mai manifestati eventi in condizioni analoghe.
2	L'esplosione è POCO PROBABILE quando il suo manifestarsi è legato al contemporaneo verificarsi di eventi sfavorevoli, anche non indipendenti tra loro.Sono noti solo rarissimi episodi già verificatesi in circostanze analoghe.
3	L'esplosione è PROBABILE quando è legata ad un evento o a più eventi concorrenti che possono innescare l'atmosfera esplosiva.

4	L'esplosione è MOLTO PROBABILE quando l'evento che può determinarla ha una elevata probabilità di verificarsi. Ad esempio: presenza di sorgenti di innesco nelle immediate vicinanze di atmosfere esplosive.

Tabella 3.10 - Classificazione del fattore di pericolo

Si procede ora alla determinazione delle conseguenze dell'esplosione, ovvero del danno, seguendo le disposizioni dell'INAIL (Istituto Nazionale per l'Assicurazione contro gli Infortuni sul Lavoro).
Il danno, D, può essere qualitativamente indicato secondo quattro livelli (Trascurabile, Lieve, Grave, Gravissimo) per il quale il valore viene determinato in relazione ai seguenti parametri:

- Classificazione della zona, CLZONA;
- Presenza di lavoratori esposti, LESP;
- Fattore di esplodibilità dell'atmosfera, Kesp;
- Indice relativo al volume Vz pericoloso per i gas, FVZ. L'ndice relativo allo spessore dello strato di polvere, IS;
- Fattore di confinamento, FC.

Per ogni livello che caratterizza i parametri appena elencati, viene associato un valore rumerico secondo le tabelle che seguono.
Al parametro CLZONA sono associati quattro livelli con pericolosità crescente, corrispondenti alle zone per sostanze infiammabili e combustibili e alla "Zona non estesa", NE.

ZONA	CLZONA
Zona 0/20	2
Zona 1/21	1
Zona 2/22	0,5
Zona NE	0

Tabella 3.11 - Parametri CLZONA

L'indicatore LESP rappresenta la presenza dei lavoratori esposti all'eventuale danno, secondo una classificazione di tre livelli (Nulla, Saltuaria, Continua). Questo parametro permette di caratterizzare la formulazione secondo una particolare attenzione legata al rischio vita del personale coinvolto.

PRESENZA LAVORATORI	LESP
Nulla	0
Saltuaria	0,25
Continua	0,5

Tabella 3.12 - Parametri LESP

Il parametro Kesp prende in considerazione il grado di pericolosità della sostanza in esame, attraverso l'indice di esplodibilità.

K_G [bar m/s]	K_{St} [bar m/s]	Kesp
≤ 500	≤ 200	0
$500 < K_G \leq 1000$	$200 < K_{ST} \leq 300$	0,25
> 1000	> 300	0,5

Tabella 3.13 - Parametri Kesp

Per il parametro FVZ, relativo ad atmosfere esplosive generate da miscele di gas ed aria, vengono definiti tre livelli in relazione al volume ipotetico di atmosfera potenzialmente esplosiva, Vz.

V_Z [dm^3]	FVZ
≤ 10	0
$10 < V_Z \leq 100$	0,25
> 100	0,5

Tabella 3.14 - Parametri FVZ

Il parametro IS viene applicato in presenza di strati di polvere combustibile, quindi in relazione allo spessore, S, dello stato.

SPESSORE S DELLO STRATO DI POLVERI [mm]	IS
≤ 5	0
$5 < S \leq 50$	0,25
> 50	0,5

Tabella 3.15 - Parametri IS

Infine, il prametro FC prende in considerazione lo spazio circostante in cui si colloca il volume di miscela esplosiva e quanto libertà di espansione permette di avere l'onda generata dall'innesco.

TIPO DI CONFINAMENTO	FC
Non confinata	0
Parzialmente confinata	0,25
Completamente confinata	0,5

Tabella 3.16 - Parametri FC

In definitiva, la misura del danno, D, viene rappresentata dalla sommatoria dei parametri appe-

na indicati secondo le seguenti relazioni, valide rispettivamente per i gas e per le polveri:

$$D = CLZONA + LESP + K_G + FVZ + FC$$

$$D = CLZONA + LESP + K_{ST} + IS + FC$$

Sulla base della sostanza considerata e del valore di danno condotto con le precedenti espressioni, l'analisi conduce a uno dei quattro livelli che descrivono la misura qualitativa del danno.

FATTORE DI DANNO, D	DEFINIZIONE QUALITATIVA
1	L'entità del danno è TRASCURABILE. Infortunio o episodio di esposizione con inabilità rapidamente reversibile. Piccoli infortuni o patologie di carattere fisico rapidamente reversibili.
2	L'entità del danno è LIEVE. Infortunio o episodio di esposizione acuta con inabilità reversibile. Infortuni o patologie di carattere fisico e/o psicofisico con effetti reversibili.
3	L'entità del danno è GRAVE. Infortunio o episodio di esposizione acuta con effetti di invalidità parziale. Infortuni o patologie di carattere fisico e/o psicofisico croniche con effetti parzialmente invalidanti.
4	L'entità del danno è GRAVISSIMA. Infortunio o episodio di esposizione acuta con effetti anche letali o che possono determinare una condizione di invalidità permanente. Infortuni o patologie di carattere fisico e/o psicofisico croniche con effetti totalmente invalidanti.

Tabella 3.17 - Classificazione del fattore di danno

Una volta determinati i valori qualitativi della probabilità di esplosione, P, e del fattore di danno, D, il valore che rappresenta il rischio, in particolari condizioni al contorno, determinato per ciascuna zona di emissione, viene calcolato moltiplicando i due fattori e arrotondando il valore alla cifra intera, a favore di sicurezza.
Si determinano così quattro range a rappresentare quattro soglie del rischio esplosione come riportato nella tabella seguente.

SOGLIA	RANGE	DEFINIZIONE DEL RISCHIO
Trascurabile	$1 \leq R \leq 2$	Gli interventi di adeguamento corrispondenti, di tipo organizzativo e tecnico, verranno programmati nel tempo con il fine di elevare il livello di prevenzione e ottimizzare lo stato dei luoghi e le procedure di lavoro.
Basso	$2 \leq R \leq 4$	Gli interventi di adeguamento corrispondenti al presente livello di priorità possono essere programmati nel tempo in funzione della fattibilità degli stessi.

Medio	$4 \leq R \leq 9$	Grado di rischio che implica la sussistenza di una condizione di rischio grave, ma non imminente per i lavoratori, e che potrebbe causare GRAVI danni con un elevato grado di inabilità o determinare patologie dagli effetti invalidanti permanenti. Sono richiesti interventi a medio termine.
Alto	$9 \leq R \leq 16$	Sono richieste misure di prevenzione e protezione urgenti poiché determinano i presupposti per l'accadimento di un possibile infortunio di GRAVISSIMA entità.

Tabella 3.18 - Descrizione delle soglie di rischio

Nella valutazione del rischio esplosione secondo la procedura qualitativa, le indicazioni riportate nella Tabella 3.19 a descrivere il livello di rischio permettono di indicare la necessità con cui attuare le misure preventive e protettive. Con i termini "urgenti" e "medio termine" si vuole lasciare, però, al Datore di Lavoro l'onere di stabilire la valenza temporale da attribuire agli interventi tecnici e di manutenzione, per minimizzare la probabilità di rischio legata alla formazione di atmosfere pericolose e al danno che queste potrebbero causare.
Seguendo la procedura indicata dall'INAIL, si può osservare come la formulazione proposta per calcolare la misura del danno può risultare non sempre a valenza universale.
Si consideri un particolare scenario tale per cui si abbia il valore massimo per ogni coefficiente, ad eccezione dell'indice di esplodibilità con cui si ha Kesp pari a 0 e il volume di atmosfera esplosiva FVZ pari a 0. Accettando queste condizioni si ha un fattore di danno pari a 3,0 , risultando così che l'analisi conduce a ipotizzare qualitativamente un'entità del danno grave.
Tale situazione, però, induce a considerare che anche trascurabili e poco reattive atmosfere esplosive, anche nulle, possono portare a considerevoli danni fisici, patologici o a invalidità parziali.

3.3 Metodo RAMSES per la valutazione del rischio esplosione

Particolare interesse nell'ambito dell'ingegneria antincendio dovuto da esplosioni può essere riposto nel metodo RAMSES®[7].
Il metodo RAMSES (Risk Assessment Methodology for workers Safety against ExplosionS) viene indicato come approccio specifico per la valutazione del rischio legato al fenomeno esplosivo. Tale metodologia è basata su un approccio logaritmico applicato agli indici del rischio, frequenza e danno. Questo permette di risolvere da un lato la discretizzazione presente in altre metodologie che tendono a ricondurre il significato fisico di frequenza e danno a valori numerici puramente indicativi, dall'altro la proprietà additiva legata all'operatore logaritmo consente di considerare i vari parametri rilevanti in modo indipendente, rendendo al contempo possibile poter sommare rischi di origine diversa e ponderarli correttamente.
Seguendo l'approccio RAMSES vengono definiti tre indici di rischio:

- Indici di pericolo associati agli agenti chimici;

7 La metodologia RAMSES è un marchio registrato di Associazione Ambiente Lavoro e Sindar s.r.l.

- Indici di rischio per sorgente di emissione;
- Indici di rischio per mansione.

Tutte le sostanze infiammabili e combustibili sono da considerare come agenti chimici in grado di generare un'atmosfera esplosiva se miscelati in aria e se confinati. Innescata la miscela esplosiva questa sviluppa un'esplosione, che genera danni di natura meccanica ed effetti indiretti dovuti a una possibile inalazione dei prodotti della combustione o per asfissia da consumo di ossigeno.

Il metodo RAMSES distingue così due indici di pericolo:

- IP_E, indice di pericolo per irraggiamento e onda di pressione;
- IP_T, indice di pericolo per inalazione a seguito dell'esplosione.

L'indice di pericolo per inalazione viene assunto tipicamente pari a 5, mentre l'indice di pericolo per onda di pressione e irraggiamento dipende dalle caratteristiche chimico-fisiche dell'agente nel seguente modo:

$$IP_E = 2{,}5 + IPI + IPC1 + IPC2 + IPE1 + IPE2$$

dove:

- IPI indica l'energia di innesco;
- IPC1 e IPC2 caratterizzano la concentrazione di combustibile. Il primo indica la facilità di ingresso nel campo di esplodibilità in base alla temperatura, mentre il secondo rappresenta l'ampiezza dello stesso;
- IPE1 e IPE2 indicano le caratteristiche dell'esplosione in termini, rispettivamente, di intensità e di velocità massima di aumento della pressione del tempo.

Visto la forte caratterizzazione con le proprietà del combustibile, si deve far distinzione sulla base della natura dell'agente chimico in gas, vapori, nebbie e polveri, come riportato nelle Tabelle 3.20 e 3.21.

Nel caso in cui il combustibile in analisi fosse una polvere, è necessario tenere in conto la dimensione granulometrica media e le particolari condizioni in cui si trova l'agente. Si consideri quindi la Tabella 3.22 che indicano i valori da sommare o sottrarre all'indice di pericolo.

Infine, ulteriori considerazioni devono essere trattate in merito alla trattazione dei dati forniti. Dovrà essere considerato l'aggiornamento e l'estensione da cui sono state ricavate le fonti, e se le fonti sono derivanti da misure sperimentali. Si riportano nella Tabella 3.23 i rispettivi valori correttivi che permettono di prendere in considerazione quanto appena indicato.

ENERGIA DI INNESCO							
IPI	Energia minima di accensione [mJ]	< 1	1 - 10	10 - 50	50 - 100	100 - 500	> 500
		1	0,8	0,6	0,5	0,3	0,1
	Temperatura di autoignizione [°C]	< 100	100 - 135	135 - 200	200 - 300	300 - 450	> 450
		0,9	0,8	0,6	0,4	0,2	0,1
CONCENTRAZIONE DEL COMBUSTIBILE							
IPC1	Frasi R		Solo combustibile		R10	R11	R12
			0,2		0,4	0,6	0,8
	Frasi H		Solo combustibile		H226	H221, 223, 225	H220, 222, 224
			0,2		0,4	0,6	0,8
	Punto di infiammabilità [°C]		> 55		≥ 21 - ≤ 55	> 0 - < 21	≤ 0
			0,2		0,4	0,6	0,8
IPC2	Limite inferiore di esplosività - LEL [%]		< 5		5 - 10	10 - 20	> 20
			0,8		0,6	0,4	0,2
	Ampiezza campo di esplosività UEL - LEL [%]		< 5		5 - 20	20 - 50	> 50
			0,2		0,4	0,6	0,8
CARATTERISTICHE DELL'ESPLOSIONE							
IPE1	Energia di combustione della miscela combustibile-aria [MJ/m^3]		< 0.1		0,1 - 3	3 - 10	> 10
			0,2		0,4	0,6	0,8
	Massima pressione di esplosione [bar]		< 5		5 - 7	7 - 10	> 10
			0,2		0,4	0,6	0,8
IPE2	Velocità di fiamma [m/s]		< 0,2		0,2 - 1	1 - 2,5	2,5
			0,2		0,4	0,6	0,8
	K_G [bas m/s]		< 100		100 - 500	500 - 1000	> 1000
			0,2		0,4	0,6	0,8

Tabella 3.19 - Parametrizzazione dell'indice di pericolo per i gas, i vapori e le nebbie

PER AGGIORNAMENTO DELLE FONTI	
Non è stato verificato l'aggiornamento delle fonti informative	Si aggiunge 0,25
I dati utilizzati derivano da fonti non aggiornati (oltre 5 anni)	Si aggiunge 0,25
Almeno alcuni dei dati utilizzati derivano da fonti aggiornati (ultimi 5 anni)	Si aggiunge 0,125
Quasi tutti i dati utilizzati derivano da fonti aggiornati (ultimi 5 anni)	Il valore resta invariato
PER ESTENSIONE DELLE FONTI DI DATI	
Dati ricavati da fonti diverse, senza probabilità di confronto dei singoli dati	Si aggiunge 0,5
Dati ricavati da un'unica fonte	Si aggiunge 0,25
Dati ricavati dal confronto di diverse fonti disponibili (dati discordi)	Si aggiunge 0,25

Dati ricavati dal confronto di diverse fonti disponibili (dati discordi, scelte conservative)	Il valore resta invariato
Dati ricavati dal confronto di diverse fonti disponibili (dati sostanzialmente concordi)	Il valore resta invariato
PER RICORSO A MISURE SPERIMENTALI	
Dati ricavati solamente dalla lettura	Si aggiunge 0,25
Almeno alcuni dei dati utilizzati derivano da misure sperimentali sull'agente considerato	Si aggiunge 0,125
Quasi tutti i dati utilizzati derivano da misure sperimentali sull'agente considerato	Il valore resta invariato

Tabella 3.22 - Correzioni dell'indice di pericolo sulla qualità delle fonti

ENERGIA DI INNESCO							
IPI	Energia minima di accensione [mJ]	< 1	1 - 10	10 - 50	50 - 100	100 - 500	> 500
		1	0,8	0,6	0,5	0,3	0,1
	Temperatura di accensione della nube [°C]	< 100	100 - 135	135 - 200	200 - 300	300 - 450	> 450
		0,9	0,8	0,6	0,4	0,2	0,1
	Temperatura di accensione dello strato [°C]	< 150		150 - 200		200 - 300	> 300
		0,8		0,6		0,4	0,2
CONCENTRAZIONE DEL COMBUSTIBILE							
IPC1	Frasi R	Solo combustibile		R10		R11	R12
		0,2		0,4		0,6	0,8
	Frasi H	Solo combustibile				H228	
		0,2				0,6	
IPC2	Minima concentrazione esplosiva [g/m^3]	< 10		10 - 50		50 - 100	> 100
		0,8		0,6		0,4	0,2
CARATTERISTICHE DELL'ESPLOSIONE							
IPE1	Energia di combustione della miscela combustibile-aria [MJ/m^3]	< 0.1		0,1 - 3		3 - 10	> 10
		0,2		0,4		0,6	0,8
	Massima pressione di esplosione [bar]	< 5		5 - 7		7 - 10	> 10
		0,2		0,4		0,6	0,8
IPE2	K_{ST} [bas m/s]	0		> 0 - ≤ 200		200 - ≤ 300	> 300
		0,2		0,4		0,6	0,8
	Classe di esplosività (St)	0		1		2	3
		0		0,4		0,6	0,8

Tabella 3.20 - Parametrizzazione dell'indice di pericolo per le polveri

CONDIZIONI PARTICOLARI DELL'AGENTE	
Polvere ad umidità molto aumentata rispetto al normale (min 30%)	Si sottrae 3 agli IP
Polvere con aggiunta di un solo inerte (min 50%)	Si sottrae 3 agli IP
Polvere molto secca rispetto al normale	Si aggiunge 1 agli IP
Miscela ibrida (polvere + gas/vapori infiammabili)	Si aggiunge 1 agli IP
Nessuna condizione particolare	Il valore degli IP resta invariato
GRANULOMETRIA	
Granulometria > 1000 µm	Si sottrae 3 agli IP
Granulometria 500 - 1000 µm	Si sottrae 2 agli IP
Granulometria 200 - 500 µm	Si sottrae 1 agli IP
Granulometria 100 - 200 µm	Si sottrae 0,5 agli IP
Granulometria 20 - 100 µm	Si sottrae 0,25 agli IP
Granulometria < 20 µm	Il valore degli IP resta invariato

Tabella 3.21 - Correzioni dell'indice di pericolo per specifiche condizioni delle polveri

Per determinare gli indici di rischio legati alle sorgente di emissione vengono presi in considerazione la probabilità di formazione dell'atmosfera esplosiva, la probabilità della presenza di un innesco e dell'estensione dei danni causati a seguito del fenomeno esplosivo.
Gli indici di rischio per sorgente di emissione sono così determinati:

$$IR_{E\text{-}SE} = IP_E + \Delta_{zona} + \Delta_{inneschi} + \Delta_{danni\ esplosione} + K_{SE\text{-}E}$$

$$IR_{T\text{-}SE} = IP_T + \Delta_{zona} + \Delta_{inneschi} + \Delta_{danni\ tossicità} + K_{SE\text{-}T}$$

dove:

- $IR_{E\text{-}SE}$ è l'indice di rischio da esplosione per sorgente di emissione;
- $IR_{T\text{-}SE}$ è l'indice di rischio di tossicità per sorgente di emissione;
- IP_E e IP_T sono gli indici di pericolo esplosione e tossicità riferito all'agente chimico calcolati come definito in precedenza;
- Δ_{zona} è la variazione del rischio dovuto alla classificazione della zona generata dalla sorgente di emissione;
- $\Delta_{inneschi}$ è la variazione del rischio dovuto alla probabilità di presenza di sorgenti di accensione;
- $\Delta_{danni\ esplosione}$ è la variazione del rischio dovuto all'entità di danni diretti da esplosione;
- $\Delta_{danni\ tossicità}$ è la variazione del rischio dovuto all'entità dei danni interni da tossicità dei prodotti di combustione;

- K_{SE-E} è la costante per sorgenti di emissione per rischio esplosione pari a 3;
- K_{SE-T} è la costante per sorgenti di emissione per rischio tossico pari a 3.

La variazione del rischio dovuto alla classificazione della zona prende in considerazione la frequenza e la durata dell'atmosfera esplosiva, e viene definita come:

$$\Delta_{zona} = \text{Log} (\text{Peso}_{zona})$$

Dove il peso assegnato viene così definito secondo i range di probabilità e durata per ogni zona:

		PROBABILITÀ DI ATMOSFERA ESPLOSIVA IN UN ANNO		DURATA COMPLESSIVA IN ORE PER LA PRESENZA ATMOSFERA ESPLOSIVA IN UN ANNO			
ZONA		Da	A	Da	A	PESO	Δ_{zona}
20	0	$1\ 10^{-1}$		876		$1\ 10^{-1}$	-1
21	1	$1\ 10^{-3}$	$1\ 10^{-1}$	8,76	876	$1\ 10^{-3}$	-3
22	2	$1\ 10^{-5}$	$1\ 10^{-3}$	0,09	8,76	$1\ 10^{-5}$	-5

Tabella 3.23 - Variazione del rischio dovuto alla classificazione della zona

La variazione del rischio dovuto alla probabilità per la presenza di sorgenti di accensione, invece, considera tutte le sorgenti di emissione presenti all'interno del volume in condizioni di esplosività. La variazione del rischio per la presenza di sorgenti di accensione è quindi legata alla frequenza e alla persistenza per ogni singola sorgente di innesco secondo la seguente formulazione:

$$\Delta_{inneschi} = \text{Log} (\sum \text{Prob}_{inneschi})$$

dove la sommatoria delle probabilità degli inneschi è così determinato:

	PROBABILITÀ DELLA PRESENZA DI SA IN UN ANNO		PERSISTENZA IN ORE IN UN ANNO			
ZONA	Da	A	Da	A	PESO	Δ_{zona} (per un solo innesco)
Durante di normale funzionamento	$1\ 10^{-1}$	1	876	8760	$1\ 10^{-1}$	-1
Durante guasti prevedibili	$1\ 10^{-3}$	$1\ 10^{-1}$	8,76	876	$1\ 10^{-3}$	-3
Durante guasti rari	$1\ 10^{-5}$	$1\ 10^{-3}$	0,09	8,76	$1\ 10^{-5}$	-5
Non considerata	$1\ 10^{-7}$	$1\ 10^{-5}$	0,0009	0,09	$1\ 10^{-7}$	-7

Tabella 3.24 - Variazione del rischio dovuto alla probabilità per la presenza di sorgenti di accensione

Infine, la variazione del rischio dovuto all'entità dei danni viene calcolato come segue, facendo distinzione tra gli effetti di natura meccanica da quella tossica:

$$\Delta_{\text{danni esplosione}} = \text{Log}\ (\ D_{\text{corretta E}}\ )$$

$$\Delta_{\text{danni tossicità}} = \text{Log}\ (\ D_{\text{corretta T}}\ )$$

dove:

$$D_{\text{corretta E}} = D_{\text{base E}} \cdot \prod \text{Fattori di correzione}_{E}$$

$$D_{\text{corretta T}} = D_{\text{base T}} \cdot \prod \text{Fattori di correzione}_{T}$$

per il quale:

$$D_{\text{base T}} = 5 \cdot D_{\text{base E}}$$

mentre $D_{\text{base E}}$ è la stima della distanza alla quale l'esplosione provoca un effetto negativo, posta convenzionalmente una distanza di soglia per una sovrapressione di picco pari a 0,07 bar, che è stato definito[8] come valore al quale corrispondono lesioni irreversibili per una popolazione sana.
Si procede, innanzitutto, con il calcolo della distanza di danno stimata, d, espressa in metri come:

$$d = f \cdot V^{1/3}$$

dove:

- f è un coefficiente che dipende dalle condizioni ambientali al contorno;
- V è il volume in condizioni di esplosività generalmente noto [m^3].

Il fattore f viene caratterizzato da due parametri. Da un lato la pressione massima di esplosione (P_{max}) e dall'altro dal livello di confinamento e di ostruzioni. Quest'ultimo caratterizza il fattore f secondo specifiche relazioni:

- Nube completamente confinata: indica la presenza di una nube in un ambiente chiuso oppure che si trova in presenza di ostacoli ravvicinati dove il 30% del volume totale dell'area in condizioni di esplosività è occupato da ostruzioni (frazione di ingombro) e con una distanza fra gli ostacoli inferiore a 3m;

$$f = 10^{(\text{Log}(P_{max}))/1{,}19 + 0{,}33)}$$

8 Definito secondo le Linee Guida Nazionali per la pianificazione dell'emergenza esterna dal D.M. 15 maggio 1996 e dal D.M. 9 maggio 2001

- Nube parzialmente confinata: indica una nube a contatto con due o più pareti oppure in presenza di ostacoli con una frazione di ingombro inferiore al 30% e/o una distanza tra gli ostacoli superiore a 3m;

$$f = 10^{(\mathrm{Log}(Pmax))/1{,}09 - 0{,}33)}$$

- Nube non confinata: indica l'assenza di ostacoli e di pareti, ad eccezione del terreno.

$$f = 10^{(\mathrm{Log}(Pmax))/0{,}98 - 1{,}48)}$$

Il grafico di seguito riportato mostra come varia la distanza di danno con diversi livelli di confinamento al variare della massima pressione per un volume di nube costante.

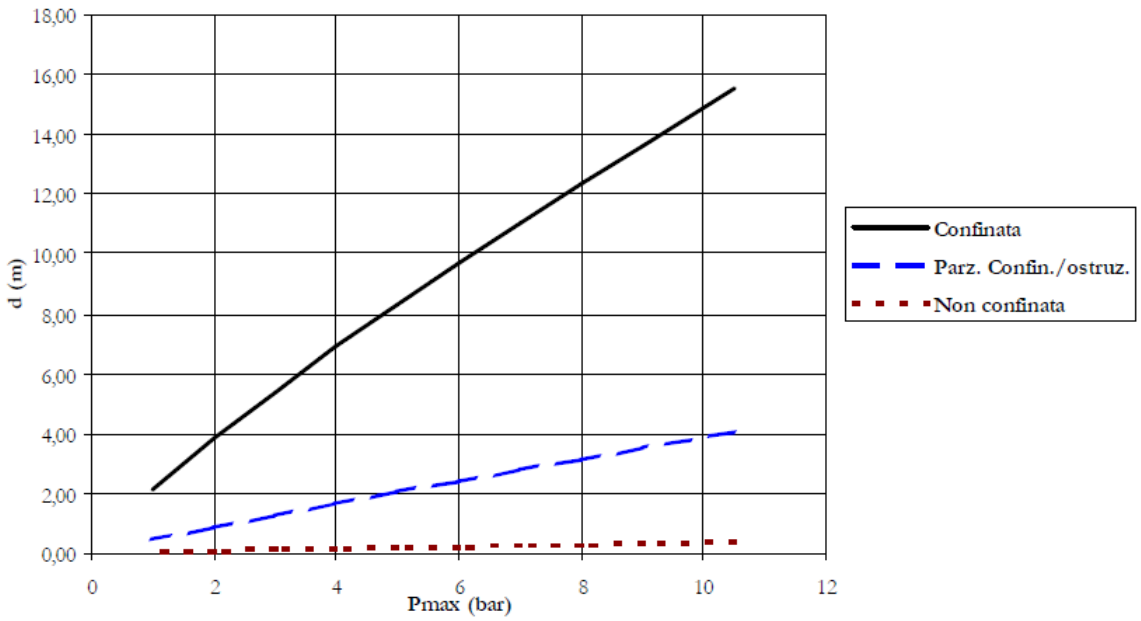


Figura 3.5 - Distanze di danno stimate al variare di Pmax per una nube di volume di 1 m^3

La produttoria dei fattore di correzione è invece dato da specifiche condizioni operative indicate nella Tabella 2.26.
Il metodo RAMSES infine definisce gli indici di rischio per mansione. Questi indicano il rischio per i lavoratori dovuto dalla potenziale presenza di atmosfere esplosive e vengono definiti come:

$$IR_{E\text{-}M} = IP_{E\text{-}SE} + \Delta_{prossimità\text{-}E} + \Delta_{frequenza} + \Delta_{formazione} + K_{M\text{-}E}$$

$$IR_{T\text{-}M} = IP_{T\text{-}SE} + \Delta_{prossimità\text{-}T} + \Delta_{frequenza} + \Delta_{formazione} + K_{M\text{-}T}$$

dove:

- IR_{E-M} è l'indice di rischio da esplosione per mansione;
- IR_{T-M} è l'indice di rischio di tossicità per mansione;
- IP_{E-SE} e IP_{T-SE} sono gli indici di rischio esplosione e tossicità per sorgenti di emissione come definiti in precedenza;
- $\Delta_{prossimità-E}$ e $\Delta_{prossimità-T}$ sono le variazioni del rischio dovute alla posizione della mansione all'interno dell'area per danni diretti da esplosione o indiretti da tossicità;
- $\Delta_{frequenza}$ è la variazione del rischio dovuto alla frequenza della presenza della mansione;
- $\Delta_{formazione}$ è la variazione del rischio dovuto al livello di formazione della mansione;
- K_{M-E} è la costante per mansione per rischio esplosione pari a 2;
- K_{M-T} è la costante per mansione per rischio tossico pari a 2.

Gli effetti dell'esplosione variano con l'aumentare della distanza dal punto di innesco. Pertanto i termini $\Delta_{prossimità-E}$ e $\Delta_{prossimità-T}$ tengono conto della distanza minima dell'operatore dal volume potenzialmente esplodibile e la distanza di danno precedentemente calcolata, d.
La tabella che segue riporta i valori di $\Delta_{prossimità}$ in relazione ai range di rapporto della distanza minima dall'operatore sulla distanza di danno.

POSIZIONE ALL'INTERNO DELL'AREA DI DANNO	RAPPORTO DISTANZA MINIMA / DISTANZA DI DANNO		$\Delta_{prossimità-E}$ $\Delta_{prossimità-T}$
	Da	A	
Oltre la distanza di danno	10		-6,00
	5	10	-4,00
	1,2	5	-2,00
In prossimità della distanza di danno	0,8	1,2	0,00
In posizione mediana tra il confine del volume e la distanza di danno	0,4	0,8	+0,48
In prossimità del confine del volume esplosivo	0,0	0,4	+1,00

Tabella 3.26 - Variazione del rischio dovuto alla prossimità degli operatori al volume potenzialmente esplosivo

Per il calcolo dell'indice di rischio per mansione si tiene conto anche della frequenza con la quale gli operatori possono trovarsi nell'area di impatto con gli effetti dell'eventuale esplosione. Si cacola come:

$$\Delta_{frequenza} = \text{Log (N. ore presenza a settimana / (40 • 50))}$$

Anche il livello di formazione, necessariamente richiesto dalle vigenti norme di sicurezza, pesa sulla stima dell'indice di rischio globale, in quanto condiziona da un lato il controllo delle sorgenti di accensione e dall'altro la capacità dell'operatore di mettere in atto le opportune misure di protezione.

La Tabella 3.28 riporta i valori di $\Delta_{formazione}$ in relazione al livello di informazione fornito.

LIVELLO DI FORMAZIONE	$\Delta_{formazione}$
Insufficiente informazione sui rischi da atmosfere esplosive	+1,00
Adeguata informazione sui specifici rischi da atmosfere esplosive	0,00
Adeguata formazione sulle corrette modalità operative da adottare	-0,30
Adeguata formazione e addestramento	-1,00
Procedure di lavoro scritte che contengono anche chiare indicazioni di sicurezza	-1,30

Tabella 3.27 - Variazione del rischio dovuto al livello di formazione dei lavoratori

A conclusione, il metodo RAMSES permette di determinare un indice di pericolo associato a ciascun agente in grado di generare un'atmosfera esplosiva, un indice di rischio per ogni sorgente di emissione presente in una zona classificata a rischio esplosione e un indice di rischio per ogni mansione esposta agli effetti dell'esplosione.
Vengono così determinati differenti livelli di rischio ai quali sono associati gli interventi di miglioramento della sicurezza e la riduzione della probabilità di pericolo. Tali azioni programmatiche sono riportati nella Tabella 3.29 che segue.

INDICE DI RISCHIO	PROGRAMMA INTERVENTI	DETTAGLIO SULLE MODALITÀ DI ATTUAZIONE
4-6: alto	Effettuare azioni correttive indilazionabili	· Intervento tecnico/manutentivo immediato · Attività addestrative effettuate e ripetute periodicamente sul personale · Sorveglianza continuativa da parte dei preposti sulla attività a rischio · Manutenzione preventiva dispositivi critici per la sicurezza · Verifica SPP aziendale sulla necessità di sospendere l'attività sino al ripristino delle condizioni di sicurezza
3-4: medio	Programmare interventi di miglioramento urgenti	· Intervento tecnico/manutentivo nel breve o brevissimo periodo · Attività addestrative prioritarie sul personale · Sorveglianza continuativa da parte dei preposti · Manutenzione preventiva dispositivi critici per la sicurezza · Controlli sanitari e di esposizione dei lavoratori · Verifica SPP aziendale sulla necessità di istituire specifiche restrizioni / forme di controllo
2-3: basso	Programmare interventi di miglioramento nel medio termine	· Intervento tecnico/manutentivo nel medio periodo · Attività addestrative sul personale · Sorveglianza continuativa da parte dei preposti sulle attività in oggetto · Controlli sanitari e di esposizione dei lavoratori · Manutenzione (preventiva/su chiamata) apparecchiature ed impianti critici per la sicurezza
1-2: accettabile	Non è strettamente necessario programmare interventi di miglioramento	· Intervento da programmarsi secondo fattibilità tecnico-economica · Mantenimento delle condizioni di sicurezza e del rispetto degli adempimenti generali in ottemperanza al D.Lgs. 81/08 e succ. int. e mod.

0-1: trascurabile	Non è necessario programmare interventi di miglioramento	· Mantenimento delle condizioni di sicurezza e del rispetto degli adempimenti generali in ottemperanza al D.Lgs. 81/08 e succ. int. e mod.

Tabella 3.28 - Programma degli interventi in relazione ai risultati dell'analisi RAMSES

DESCRIZIONE	SPECIFICHE	FATTORE ADOTTATO
Condizioni di danno aumentato		
Possibilità di ignizione ad alta intensità	Selezionare questa voce se è possibile che l'esplosione sia innescata da una fonte ad alta intensità, come accade per esempio nel caso di un'esplosione in ambiente aperto causata da una precedente esplosione avvenuta in uno spazio confinato	2
Possibilità di transizione da deflagrazione a detonazione	In apparecchiature allungate o raccordate tra loro, soprattutto in presenza di ostacoli che aumentano la turbolenza, è possibile che un'esplosione si propaghi con un'accelerazione del fronte di fiamma con passaggio da deflagrazione a detonazione	2
Possibile effetto domino	Si consideri la possibilità che l'esplosione iniziale generi esplosioni successive o causi altri eventi negativi (ad esempio incendi estesi) che aumentano il livello di danno	5
Mitigazione del danno diretto da esplosione		
L'esplosione è contenuta da pareti resistenti alla pressione di esplosione	Le pareti devono resistere all'esplosione senza subire deformazioni permanenti	0,01
L'esplosione è contenuta da pareti resistenti all'urto di esplosione	Le pareti devono resistere all'esplosione, ma possono subire deformazioni permanenti. In seguito ad un'esplosione deve essere previsto il controllo strutturale per la verifica della sicurezza del sistema	0,05
Sono presenti sistemi di sfogo dell'esplosione	Devono essere considerati solo sistemi (quali dischi di sicurezza, pannelli, sportelli di esplosione) adeguatamente dimensionati e installati in modo da non poter causare danni a persone in caso di intervento. Le valvole di sicurezza non vanno considerate	0,1
Sono presenti sistemi di soppressione dell'esplosione	I sistemi devono essere correttamente dimensionati e mantenuti attivi	0,05
Sono adottate misure contro la propagazione dell'esplosione	Si considerino per esempio l'iniezione di agenti estinguenti, e la presenza di filtri tagliafiamma, sifoni, deviatori di esplosione, valvole e cerniere ad azione rapida, valvole doppie, sistemi di strozzatura, ecc.	0,5
Sono presenti sistemi antincendio ad intervento automatico		0,9
Gestione dell'emergenza		
Presenza dello specifico scenario nel Piano di emergenza aziendale	Devono essere definite disposizioni specifiche per l'intervento in emergenza quali: arresto dell'impianto, interruzione di flussi, svuotamento di apparecchiature, allagamento di parti di impianto (con acqua, estinguenti, ecc.)	0,9
Lo scenario relativo all'esplosione con possibile rischio inalatorio è presente nel Piano di emergenza aziendale		0,9
Il personale è adeguatamente informato sul comportamento da tenere in emergenza		0,9
Possibilità di danno inalatorio post esposizione		
Il personale è adeguatamente informato sul comportamento da tenere in emergenza		0,5
Sono forniti e mantenuti in servizio dispositivi di protezione delle vie respiratorie da utilizzare in caso di emergenza		0,1

Tabella 3.25 - Fattori di correzione della distanza di danno

4. Principi di protezione integrata

Al fine di evitare o ridurre gli effetti causati da un'atmosfera esplosiva che entra in contatto con una sorgente di innesco efficace, ai sensi dell'Art. 289 del Titolo XI del *Testo unico sulla salute e sicurezza sul lavoro*, il datore di lavoro è obbligato a effettuare un'analisi del rischio e, di conseguenza, applicare i dovuti provvedimenti al fine di mettere in sicurezza i lavoratori esposti al pericolo.
Il datore di lavoro può adempiere a tale obbligo attuando principi di protezione integrata, secondo quanto disposto dalla normativa vigente UNI EN 1127-1. Può pertanto adottare misure di tipo preventivo o protettivo accompagnate da misure gestionali, o prevedere combinazioni di queste.
Le misure di **prevenzione** dagli effetti esplosioni hanno solo il compito di ridurre la probabilità di innesco, ma non di eliminarla completamente. Per attuare misure di prevenzioni è possibile seguire due possibili strategie:

- Evitare la formazione di atmosfere esplosive. Questa misura può essere attuata moderando i livelli di concentrazione della sostanza infiammabile al di fuori del range di infiammabilità, oppure agendo sulla concentrazione di ossigeno andando a limitarla al di sotto del LOC;
- Evitare qualsiasi sorgente di innesco.

Con le misure di **protezione** dalle esplosioni, invece, si intendono quelle scelte progettuali che si possono adottare al fine di controllare e mitigare gli effetti dell'innesco dovute dalla propagazione di una deflagrazione.

- L'attuazione di una misura protettiva prevede un'elevata probabilità per l'innesco dell'atmosfera e quindi porta il progettista ad accettare, inevitabilmente, l'eventualità di un'esplosione. Per ricondursi a un livello accettabile del danno si prevedono le cosiddette misure di protezione costruttiva.

Sebbene l'esplosione sia in questo caso accettata come inevitabile, deve essere comunque condotta un'analisi del rischio che permetta di determinare la strategia progettuale più adatta.
La scelta prioritaria dovrebbe essere sempre quella di evitare la formazione di atmosfere esplosive. Pertanto, la riduzione degli effetti mediante un sistema di protezione viene resa necessaria solo quando l'obiettivo di sicurezza sufficiente non viene raggiunto mediante unicamente l'attuazione di misure di prevenzione.
Sono essenzialmente solo quattro le strategie disponibili in letteratura e in normativa per l'attuazione di misure di protezione costruttiva:

- Progettazione resistente all'esplosione;

- Il venting (o Sfogo dell'esplosione);
- La soppressione dell'esplosione;
- L'isolamento dell'esplosione.

Nella progettazione delle misure preventive all'esplosione e protettive contro gli effetti è importante prendere in considerazione il normale funzionamento di questi sistemi, dalla fase di avviamento a quella di arresto, e le possibili disfunzioni tecniche intermedie.
Si rende necessaria l'introduzione di misure gestionali per evitare lo sviluppo di un'esplosione. Il datore di lavoro deve quindi assicurare un'idonea gestione dell'attività lavorativa secondo un'accurata formazione e completa informazione del personale coinvolto, ai sensi del *Testo unico sulla salute e sicurezza sul lavoro*.

4.1 Misure di prevenzione

Come detto in precedenza, le misure di prevenzione consistono principalmente in due strategie: evitare la formazione di condizioni in cui sia presente un'atmosfera esplosiva e, se questo non è possibile, evitarne il contatto con una fonte di innesco.
Le misure di prevenzione devono essere le prime condizioni da tenere in considerazione nella progettazione della sicurezza antincendio. Se queste non bastano per garantire il livello prestazionale atteso, allora sarà necessario attuare anche le misure di protezione più idonee.
Una misura alla base della prevenzione dell'esplosione prevede di agire sull'elemento combustibile, evitando il campo di esplosione e sostituendo materiali infiammabili con sostanze inerti o, se questo non è possibile, limitare e controllare i materiali in grado di generare elevate concentrazioni di atmosfere esplosive.
Il livello di concentrazioni di atmosfera esplosiva deve essere mantenuto al di sotto del limite inferiore di esplosione e sufficientemente oltre il limite superiore, prendendo in considerazione, inoltre, le fasi di avviamento e di arresto del processo produttivo in cui è coinvolta inevitabilmente la concentrazione. Questa misura di controllo viene segnalata attraverso sensori acustici spesso abbinati a rilevatori di portata, opportunamente calibrati in relazione alla sostanza coinvolta, in quanto ad ogni sostanza corrispondono livelli del range di infiammabilità diversi.
Nel caso di liquidi combustibili, la concentrazione è contenuta al di sotto del limite inferiore di esplosione se la temperatura superficiale del liquido è mantenuta sempre a valori inferiori del punto di infiammabilità[1].
Nel caso di miscele di polveri in aria è difficile mantenere i livelli di concentrazione, in tutto il volume, al di fuori del range di infiammabilità, in quanto le polveri tendono a formare miscele non omogenee e possono aggregarsi in concentrazioni locali. Per queste è possibile applicare la

1 Il punto di infiammabilità, *flash point*, di un liquido infiammabile è la temperatura più bassa alla quale si formano vapori in quantità tale che in presenza di ossigeno e di un innesco danno luogo a fenomeni di combustione.

tecnica dell'inertizzazione, ovvero l'aggiunta di gas inerti nel volume della miscela (per esempio gas nobili o azoto), oppure di sostanze polverose inerti o di vapore acqueo, con il problema che quest'ultimo possa formare condensa. L'inertizzazione per mezzo di gas inerti permette una riduzione della concentrazione di ossigeno nell'ambiente e quindi di evitare la formazione di atmosfere infiammabili agendo sul controllo del comburente.
Un'ulteriore metodologia di prevenzione per limitare la formazione di atmosfere esplosive consiste nella diluizione per ventilazione. La prevenzione è ottenuta creando una pressione leggermente inferiore della pressione ambiente attraverso un apposito sistema di aspirazione. Per le polveri, la ventilazione è resa efficiente solo quando il materiale fine viene estratto direttamente dal luogo di origine (aspirazione localizzata) e se vengono evitati depositi pericolosi. A tal proposito si possono attuare diverse misure progettuali:

- Deve essere prestata particolare attenzione al percorso dei tubi del sistema di trasporto e di aspirazione delle polveri, alla velocità di scorrimento e alla rugosità delle superfici;
- Gli elementi strutturali dell'ambiente devono avere, quanto più possibile, superfici lisce o rivestendo o inclinando le possibili superfici di deposito;
- Devono essere evitati gli accumuli di polveri su superfici riscaldate;
- Devono essere scelti dispositivi di svuotamento idonei per gli impianti di raccolta delle polveri.

Analogamente è possibile agire sulla presenza di fonti di innesco per evitare che queste possano venire a contatto con atmosfere esplosive. Lì dove non è possibile eliminare le sorgenti di accensione dal luogo pericoloso, la normativa UNI EN 1127-1 dispone di alcune misure protettive al fine di rendere le sorgenti di accensione innocue.
Il tipo di misura da adottare dipende dalla probabilità di comparsa di un'atmosfera esplosiva e dalle conseguenze di una possibile esplosione. Ciò si valuta facendo distinzione tra tre diverse categorie di apparecchi di cui alla Direttiva ATEX 34/16/CE, che riflettono i requisiti delle zone della classificazione dei luoghi pericolosi.
Gli apparecchi di categoria 1 assicurano un livello di sicurezza molto alto e sono progettati per essere usati in luoghi in cui sono presenti frequentemente o per lunghi periodi atmosfere esplosive di origine gassosa, vapori, nebbie o nubi di polveri. Gli apparecchi in questa categoria devono garantire il livello di protezione anche a seguito di incidenti molto rari e prevedere il corretto funzionamento anche nel caso di due disfunzioni indipendenti dell'apparecchio.
Nella categoria 2 rientrano quegli apparecchi progettati per poter assicurare un alto livello di protezione e sono destinati per essere utilizzati nelle zone 1 o 21.
Infine, la categoria 3 comprende apparecchi progettati in grado di assicurare un livello di protezione normale e sono previsti nell'utilizzo dei luoghi in cui è improbabile che si verifichino atmosfere esplosive o che siano presenti per brevi periodi.

4.2 Misure di protezione

Se le misure di prevenzione non possono essere adottate, dovrà essere scelta la progettazione mediante i sistemi di protezione alternativi in modo da limitare gli effetti di un'esplosione ad un livello di sicurezza accettabile.
Le misure di protezione sono definite "sistemi di protezione costruttiva" e sono riconducibili principalmente a sole quattro tipologie:

- Progettazione resistente all'esplosione;
- Il venting (o Sfogo dell'esplosione);
- La soppressione dell'esplosione;
- L'isolamento dell'esplosione.

STRATEGIE DI PROTEZIONE	RIFERIMENTO DI PARAGRAFO EN 1127-1	NORMATIVA TECNICA ARMONIZZATA	NORMATIVA TECNICA NFPA
Progettazione resistente all'esplosione	6.5.2	EN 14460	NFPA 69
Sfogo dell'esplosione	6.5.3	EN 14491 EN 14994 EN 16009	NFPA 68 NFPA 69
Soppressione dell'esplosione	6.5.4	EN 14373	NFPA 69
Isolamento dell'esplosione	6.5.5	EN 15089 EN 16020	NFPA 69 NFPA 654

Tabella 4.1 - Riferimenti normativi applicabili alle misure di protezione e prevenzione [2]

Conoscere i meccanismi alla base delle strategie di protezione dalle azione dell'esplosione permette di individuare la più idonea scelta progettuale in relazione alle condizioni al contorno coinvolte.
Si consideri, per esempio, il sistema di soppressione dell'esplosione. Questo è l'unico approccio che permette di "soffocare" l'esplosione all'origine del suo sviluppo. Fornisce quindi una protezione lì dove altri metodi non possono soddisfare le richieste imposte dall'analisi dei rischi. Il venting è un metodo inappropriato dove sono coinvolti materiali tossici o nocivi o dove non è possibile sfogare i gas in ambienti sicuri. I metodi di isolamento, d'altro canto, sono usati per proteggere le unità lavorative adiacenti a scapito del volume dove l'ignizione ha avuto inizio. E la progettazione per il contenimento dell'esplosione, invece, è applicabile solo dove il volume permette una sufficiente resistenza a pressione.
Analizziamo, quindi, di seguito, le quattro strategie di protezione.

2 Normative in vigore alla data dell'ultima revisione di questa trattazione

4.2.1 Progettazione resistente all'esplosione

Un'ulteriore misura progettuale, per limitare gli effetti di un'esplosione a un livello di sicurezza accettabile, prevede di valutare le caratteristiche strutturali di resistenza degli apparecchi, dei sistemi di protezione e dei componenti applicati nelle zone a rischio.
In merito a tale misura di protezione, si effettua generalmente una distinzione progettuale come indicata dalla normativa UNI EN 1127-1:

- Progettare per la pressione massima di esplosione;
- Progettare per la pressione di esplosione ridotta in associazione con lo scarico dell'esplosione o la soppressione dell'esplosione.

I recipienti e gli apparecchi progettati per resistere alla pressione di un'esplosione possono richiedere caratteristiche di indeformabilità permanente oppure essere progettati per resistere alla pressione senza rompersi, pur subendo una deformazione in campo plastico. Nel secondo caso si tratta di resistenza all'urto di pressione dell'esplosione per il quale, a seguito del fenomeno, si richiede di verificare se le parti colpite possono ancora essere utilizzata in modo sicuro.
Con il termine "Pressione di esplosione ridotta" si intende la pressione generata dalla deflagrazione di un'atmosfera esplosiva in un recipiente quando questo viene protetto da un sistema di soppressione o dal venting. La scelta di uno di questi sistemi di protezione permette di ridurre la pressione che si andrebbe a sviluppare sulle pareti del recipiente, se questo non venisse progettato con opportuni sfoghi o contenimenti.
In merito alla progettazione di strutture resistenti all'esplosione (blast design), la normativa statunitense NFPA 68 - *Standard on explosion protection by deflagration venting* - definisce che lo sfogo deve essere dimensionato al fine di garantire una pressione di deflagrazione ridotta, P_{red}, pari a due terzi del limite ultimo che porterebbe a rottura il serbatoio o del carico di snervamento nel caso di resistenza all'urto.
In generale si può scrivere la seguente relazione:

$$P_{red}=P_{es}/DLF$$

dove:

- P_{red} è la massima pressione sviluppata durante la deflagrazione con la presenza di sistemi di protezione integrata [bar];
- P_{es} è la pressione di esercizio stimata sul serbatoio calcolata come pressione statica equivalente di quella generata dall'esplosione [bar];
- DLF è il fattore di carico dinamico definito come segue:

$$DLF=X_m/X_s$$

dove:

- X_m è la deformazione dinamica massima;

- X_s è la deformazione statica equivalente allo spostamento prodotto nel sistema quando il carico di picco è applicato staticamente.

In assenza di un'analisi strutturale dettagliata, viene applicato il valore cautelativo pari a DLF=1.5 e la verifica si basa sull'elemento strutturale più debole, "zone calde".
Come specificato prima, questo valore di pressione di deflagrazione ridotta, in accordo con la normativa UNI EN 1127-1, è il valore da porre a confronto con gli stati limiti imposti dalle due condizioni sulla progettazione degli apparecchi, dei sistemi di protezione e dei componenti utilizzati nelle zone a rischio.
Per la prima condizione, per la quale non viene accettata una deformazione permanente, si deve verificare che:

$$P_{red} \leq (2/3) \cdot F_y \cdot P_{MAWP}$$

Alla prima condizione, per la quale è contemplata una deformazione permanente purchè questa non porti a rottura, si deve verificare che:

$$P_{red} \leq (2/3) \cdot F_u \cdot P_{MAWP}$$

dove:

- F_y è il rapporto tra la sollecitazione di snervamento e la sollecitazione ammissibile del materiale del sistema;
- F_u è il rapporto tra la sollecitazione ultima e la sollecitazione ammissibile del materiale del sistema;
- P_{MAWP} è la pressione di deflagrazione di progetto quando l'ambiente è in pressione.

Per gli ambienti con pareti in acciaio o in acciaio inossidabile, Fu e Fy sono pari a 3.5 e 1.75.
È necessario notare, quindi, come la proprietà del materiale di un involucro siano determinanti per la progettazione resistente all'esplosione. Ulteriori considerazioni possono essere riferite all'inerzia. Se le superfici di un involucro sono tali da poter assorbire l'impatto di un'onda d'urto, la massa complessiva dell'ambiente, quale per esempio quella di un edificio, è in grado di attenuare per inerzia gran parte della quantità di energia di un'esplosione, in relazione alla sua risposta deformativa nei confronti degli sforzi.
Pertanto è possibile distinguere due tipologie di strutture. Una prevalentemente elastica caratterizzata da piccole deformazioni a seguito di grandi sforzi, e che porta la struttura ad essere molto robusta. La seconda tipologia è una struttura più leggera e duttile, per cui a basse resistenze corrispondono grandi deformazioni e le riserve di duttilità vengono strutturate per assorbire l'energia[3].
Nel primo caso si ha quindi una struttura di tipo elastico, con un elevato impiego di materiale, un grande peso e un notevole impatto economico, tipicamente utilizzate in applicazioni militari

3 Fidelibus, A., *La resistenza degli edifici alle esplosioni*, Safety & Security, Gen-Feb 2010

affinchè il manufatto mantenga la propria agibilità anhe a seguito di ripetuti fenomeni esplosivi. La seconda si tratta di una struttura dissipativa, più esile, in cui i materiali sono destinati alla plasticizzazione e con una notevole riduzione dei costi; tale struttura trova applicazione nelle realizzazioni di tipo civile e hanno le superfici tipicamente rivestite di pannelli che rispondono a deformabilità programmata per permettere di dissipare l'azione dell'esplosione.

4.2.2 Venting

Questa misura di tipo costruttivo permette, come già accennato nel capitolo in relazione alla progettazione resistente all'esplosione, di sfogare la sovrapressione generata dalla deflagrazione al di fuori del recipiente, *vessel*, e ridurne così gli effetti causati dall'energia rilasciata dall'onda d'urto. Ciò è ottenuto prevedendo alcune aperture sulle superfici dell'involucro, opportunamente dimensionate, permettendo di ridurre la pressione iniziale fino a una pressione di esplosione ridotta, tale da impedire la rottura dall'interno del componente.
La superficie di scarico necessaria a un sistema di sfogo dipende principalmente dai seguenti aspetti:

- Resistenza del recipiente;
- Velocità massima di aumento di pressione, $(dP/dt)_{max}$, e pressione massima di esplosione, P_{max};
- Pressione di azionamento del dispositivo di scarico;
- Tipo e peso del dispositivo di scarico;
- Volume e geometria del recipiente;
- Dimensione dei condotti di scarico (se utilizzati);
- Turbolenza iniziale o indotta nel recipiente.

I sistemi di sfogo della pressione devono essere installati in modo da evitare eventuali danni al personale presente durante il processo di scarico. Per questo motivo, lo sfogo deve essere direzionato verso un luogo sicuro ed evitare le zone di lavoro, a meno che venga dimostrato che il personale non viene esposto al pericolo. Talvolta, qualora questo vincolo non può essere soddisfatto, viene aggiunto al pannello di sfogo un dispositivo che garantisce la fuoriuscita della sola sovrapressione, sopprimendo il fronte di fiamma. Per tale motivo, quindi, questa misura di protezione deve prevedere gli effetti dello scarico sull'ambiente esterno in relazione al fenomeno in uscita dallo sfogo.
Come detto in precedenza, e secondo quanto previsto dall'NFPA 68 - *Standard on explosion protection by deflagration venting* -, il dimensionamento delle superfici di sfogo avviene principalmente secondo la velocità massima di aumento di pressione e la pressione massima di esplosione quindi, indirettamente, secondo la natura del materiale infiammabile.
Per miscele di gas infiammabili o miste in volumi capaci di resistere a P_{red} fino a 0.1 bar (1.5 psi), l'area dello sfogo è generalmente calcolata come:

$$A_v = (C \cdot A_S)/(P_{red}^{(1/2)})$$

dove:

- A_v è l'area dello sfogo [m^2 o ft^2];
- C è il parametro del venting, coerente con l'unità di misura di P_{red};
- A_s è l'area della superficie interna del serbatoio;
- P_{red} è la massima pressione sviluppata durante la deflagrazione [bar o psi].

Il parametro del venting, C, può essere definito dalle seguenti equazioni per velocità di reazione, S_u, minori di 60 cm/sec:

$$C = 1.57 \cdot 10^{(-5)} \cdot (S_u)^2 + 1.57 \cdot 10^{(-4)} \cdot (S_u) + 0.0109 \quad \text{per esprimerlo in } [bar^{1/2}]$$

$$C = 6.1 \cdot 10^{(-5)} \cdot (S_u)^2 + 6.1 \cdot 10^{(-4)} \cdot (S_u) + 0.0416 \quad \text{per esprimerlo in } [psi^{1/2}]$$

Analogamente può essere utilizzato il seguente grafico che mostra la variazione del parametro C in relazione alla velocità di innesco:

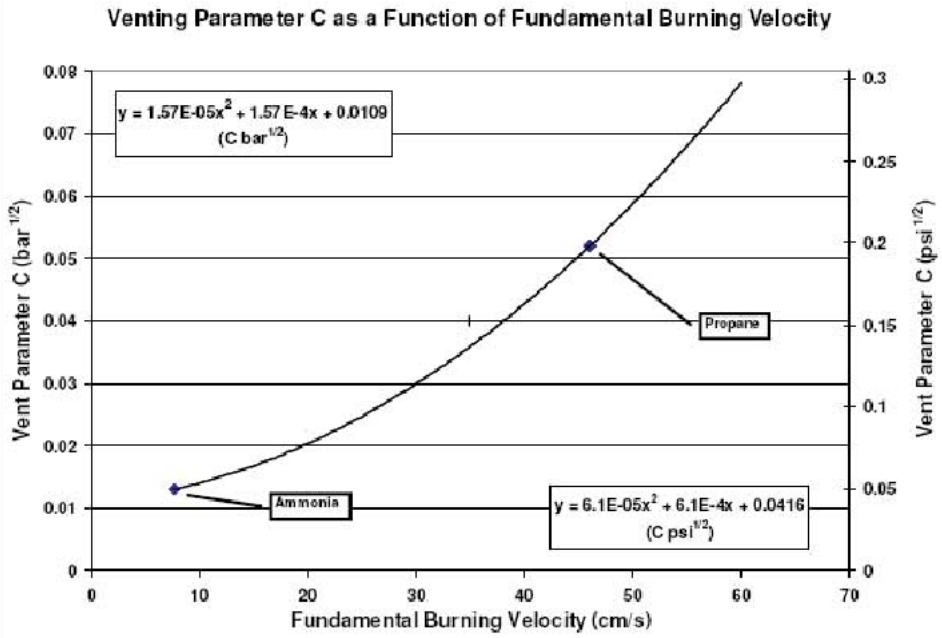


Figura 4.1 - Parametro di venting C in funzione della velocità di innesco

Per volumi capaci di resistere a valori di P_{red} maggiori di 0.1 bar (1.5 psi) viene applicato il seguente dimensionamento:

$$A_V = \{[(0.127) \cdot \log_{10}(K_G)-(0.0567)] \cdot P_{red}^{(-0.582)}\} \cdot V^{(2/3)} + [(0.175) \cdot P_{red}^{(-0.572)} \cdot (P_{Stat}-0.1)] \cdot V^{(2/3)}$$

dove:

- $K_G \leq 550$ bar-m/sec;
- $P_{red} \leq 2$ bar e almeno superiore al P_{stat} di 0.05 bar ;
- $P_{stat} \leq 0.5$ bar;
- $V \leq 1000$ m^3.

Al valore ottenuto dalle precedenti considerazioni devono essere prese in considerazione ulteriori condizioni al contorno che riducono l'apertura del pannello e quindi la pressione di scarico necessaria per ricordursi al P_{red} voluto.
Qualora la massa del pannello fosse maggiore di un valore limite, M_T, l'area di sfogo viene dimensionata subendo un incremento di superficie utile in funzione della massa del pannello, per tenere conto del fattore inerziale. Se questa supera il valore stabilito dalla seguente relazione:

$$M_T = (6.67 \cdot P_{red}^{0.2} \cdot n^{0.3} \cdot V/(K_G^{0.5}))^{1.67}$$

dove:

- n è il numero di pannelli;
- M_T è la massa di soglia del pannello [kg/m^2];
- P_{red} è la pressione ridotta [bar];
- K_G è l'indice di deflagrazione del gas ≤ 130 [bar-m/sec];
- $V > 1$ m^3

Se $M>M_T$ l'area dello sfogo deve essere incrementato di un valore ΔA pari a:

$$\Delta A_i = A_v \cdot (0.0075) \cdot M^{0.6} \cdot ((K_G^{0.5})/n^{0.3}) \cdot V \cdot P_{red}^{0.2}$$

dove:

- M è la massa effettiva del pannello di sfogo [kg/m^2];
- A_v è l'area calcolata con l'equazione generale;
- K_G è l'indice di deflagrazione posto uguale a 75 se il gas ha un valore minore [bar-m/sec];

Se, inoltre, la progettazione prevede uno sfogo mediante un canale di diametro D e lunghezza L, allora il rapporto L/D determina un possibile incremento della superficie utile di sfogo.
Per ridotte pressioni con P_{red} fino a 0.1 bar (1.5 psi), la lunghezza non deve essere superiore a tre volte il diametro.
Per pressioni con P_{red} maggiori a 0.1 bar (1.5 psi) e non più alto di 2 bar, a seguito di un rapporto L/D compreso tra 2 e 5, l'area di sfogo deve essere incrementata, rispetto alla formulazione indicata precedentemente, di un valore pari a:

$$\Delta A = (A_v \cdot K_G \cdot ((L/D)-2)^2) / 750$$

dove:

- D è il diametro idraulico, che per sezioni non circolari viene determinato come:

$$D = 4(A/p)$$

con:

- A è l'area della sezione trasversale normale all'asse del condotto;
- p è il perimetro della sezione trasversale.

Si prenda ora in considerazione il dimensionamento delle aperture di *venting* in presenza di deflagrazioni per l'innesco di miscele di polveri e ibride.
La minima area di sfogo necessaria viene determinata con la seguente formulazione:

$$A_{vo} = 1 \cdot 10^{(-4)} \cdot (1 + 1.54 \cdot P_{stat}^{(4/3)}) \cdot K_{St} \cdot V^{(3/4)} \cdot ((P_{max}/P_{red}) - 1)^{1/2}$$

dove:

- A_{v0} è la minima area dello sfogo necessaria [m^2];
- P_{stat} è la pressione di combustione statica nominale [bar];
- K_{St} è l'indice di deflagrazione della polvere [bar-m/sec];
- V è il volume del contenitore [m^3];
- P_{red} è la pressione ridotta da raggiungere dopo l'operazione di sfogo [bar];
- P_{max} è la massima pressione di deflagrazione [bar].

Alla precedente formulazione vengono però associate le seguenti limitazioni:

- 5 bar $\leq P_{max} \geq$ 12 bar ;
- 10 bar-m/sec $\leq K_{St} \geq$ 12 800 bar-m/sec ;
- 0.1 $m^3 \leq V \geq$ 10.000 m^3 ;
- $P_{stat} \leq$ 0.75 bar ;

Come nel caso del dimensionamento per lo sfogo della deflagrazione da gas, anche per le polveri è necessario prendere in considerazione una variazione incrementale della superficie utile rispetto all'area minima della precedente formulazione, a seconda di specifiche condizioni progettuali.
Nel caso in cui il rapporto L/D del canale verso cui sfoga la deflagrazione è mantenuto minore di 2 non è previso alcun incremento di area utile. Per valori di L/D maggiori di 2 e minori o uguali di 6 l'area di sfogo viene calcolata come segue:

$$A_{v1} = A_{v0} \, [1 + 0.6 \, (L/D-2)^{0.75} \cdot \exp(-0.95 \cdot P_{red}^{2})]$$

La precedente formulazione è valida alle condizioni che la velocità media assiale, v_{axial}, e tangenziale, v_{tan}, dell'aria nella condotta siano entrambe minori di 20 m/sec; con valori superiori per entrambi i valori, invece, deve essere applicata il seguente dimensionamento:

$$A_{v2} = [1 + ((\max(v_{axial}, v_{tan}) - 20)/36) \cdot 0.7] \cdot A_{v1}$$

Analogamente, per aree di sfogo in edifici in cui è stato valutato un rischio esplosione da polveri, il venting può essere definito più semplicemente come segue:

$$A_{v2} = 1.7 \cdot A_{v1}$$

Come per i gas, anche l'effetto dell'inerzia determina un incremento di superficie di sfogo. In particolare, per una massa del pannello, M, superiore alla massa limite, M_T, definita come segue:

$$M_T = (6.67 \cdot P_{red}^{0.2} \cdot n^{0.3} \cdot V/(K_{St}^{0.5}))^{1.67}$$

dove:

- n è il numero di pannelli;
- M_T è la massa di soglia del pannello [kg/m^2];
- P_{red} è la pressione ridotta [bar];
- K_{St} è l'indice di deflagrazione del gas ≤ 130 [bar-m/sec];
- V > 1 m^3

l'area di sfogo utile viene calcolata nel seguente modo:

$$A_{v3} = A_{v2} \cdot [1 + (0.0075) \cdot M^{0.6} \cdot ((K_{St}^{0.5})/n^{0.3}) \cdot V \cdot P_{red}^{0.2}]$$

dove:

- M è la massa effettiva del pannello di sfogo [kg/m^2];
- A_{v2} è l'area calcolata con le equazioni riportate in precedenza lì dove applicabili;
- K_{St} è l'indice di deflagrazione posto uguale a 75 se la polvere ha un valore minore [bar-m/sec];

Nel caso in cui la massa del pannello, invece, fosse inferiore o pari alla massa limite, MT, l'area di sfogo rimarrebbe invariata e pari a:

$$A_{v3} = A_{v2}$$

4.2.3 Soppressione dell'esplosione

La soppressione di un'esplosione è l'unico dei quattro metodi di protezione che termina il processo di combustione prima che la miscela combustibile-aria sia completamente consumata.
I sistemi di soppressione della deflagrazione sono misure attive simili a quelli di protezione del fuoco. Queste tipicamente prevedono una fase di rivelazione mediante sensori ottici o di pressione, un'azione di comando dal pannello di controllo e una successiva risposta di estinzione dalle condotte contenenti l'inibitore e collegate all'ambiente in cui avviene l'innesco.
Per assicurare il successo del sistema, questo deve rivelare la deflagrazione nella fase iniziale

quando il volume del materiale combustibile è ancora notevolmente ridotto rispetto al volume dell'ambiente protetto. A tal fine possono essere usati rivelatori ottici che impiegano l'uso di sensori ultravioletti, combinati con sensori infrarossi, oppure di rilevatori sensibili all'incremento di pressione adatti ad ambienti con la prevalenza di atmosfere polverose.
Gli agenti estinguenti tipicamente impiegati sono i seguenti:

- Acqua con o senza additivi;
- Composti chimici secchi, generalmente basati su bicarbonato di sodio o monoammonio fosfato o altri estinguenti in polvere inerte;
- Idrocarburi alogenati come il clorobromometano[4].

La scelta dell'agente è legata a rigide considerazioni di rendimento, tossicità, compatibilità del prodotto, residuo di inerte e volatilità della sostanza. Pertanto, gli agenti chimici secchi sono i più comunemente usati per applicazioni di soppressione dell'esplosione.
La risposta globale del sistema in termini di tempo è uno dei principali parametri di progetto quando vengono applicati i sistemi di soppressione. Il tempo di risposta del sistema è dato dalla risultante dei seguenti momenti:

- Tempo di rivelazione;
- Tempo di attivazione del soppressore;
- Tempo di rilascio del soppressore;
- Tempo di risposta dell'inibitore.

Affinchè il sistema sia efficace, quando un rilevatore di innesco si attiva l'agente estinguente deve essere distribuito su tutto il volume protetto in tempi più rapidi rispetto al tempo di accrescimento delle fiamme.
Il sistema di soppressione opera al fine di ridurre la pressione di deflagrazione generata dall'innesco fino a un valore minore di progetto, P_{red}, il quale deve risultare inferiore del limite imposto dalla sommatoria di due componenti: l'incremento di pressione dovuto dai prodotti della combustione prima della totale estinzione e il contributo di pressione generato dagli agenti iniettati.
La scelta di un sistema di soppressione permette di agire sul controllo del tempo di consegna dell'inibitore, sulla concentrazione nominale dell'agente, sulla collocazione e il dimensionamento di uno specifico numero di soppressori, per consentire un'azione uniforme sul volume di atmosfera esplosiva. L'aumento del numero di soppressori permette di ampliare l'area d'influenza, diminuire il tempo di distribuzione e ridurre la pressione, migliorando la dispersione uniforme all'interno del volume protetto. Se l'incremento di pressione totale a seguito dell'azione del sistema di soppressione, P_{red}, è minore della forza di pressione generata dalla deflagrazione, allora la soppressione è considerata efficace.
Solitamente, in combinazione con i dispositivi di soppressione delle esplosioni si prevede un sistema di isolamento per le parti dell'impianto collegate al volume principale, mediante il quale

4 Ricerche propongono anche l'uso di fluorocarburi e idrofluorocarburi per le applicazioni di protezione dalle esplosioni.

si contengono gli effetti dell'esplosione, limitando l'area di rischio.

4.2.4 Isolamento dell'esplosione

L'isolamento è la strategia di protezione all'esplosione che interrompe la propagazione dell'onda di pressione e del fronte di fiamma in transito tra apparecchiature interconnesse.
Questa misura di protezione è atta a prevenire la propagazione della deflagrazione all'interno di un canale o di una tubatura che, se non opportunamente progettata, porterebbe a effetti di accelerazione e quindi alla transizione di una deflagrazione a una detonazione o alla generazione di effetti secondari. Test sperimentali hanno mostrato come tubazioni con diametri minori di 100mm comportano un limite inferiore alla progettazione con il sistema di isolamento, generando una velocità di propagazione superiore rispetto all'azione di risposta dell'isolamento.
Si riportano di seguito alcuni dispositivi, suddivisi per tecnologia attiva e passiva, opportunamente studiati e commercializzati al fine di evitare la propagazione di esplosioni in condotte collegate o in canali di trasporto.

4.2.4.1 Sistemi di isolamento attivo

La progettazione di un sistema di isolamento attivo si basa sulla tempestività di tre processi principali: il tempo necessario per la detenzione di una esplosione, il tempo necessario per la stabilizzazione di una barriera, e il tempo con il quale l'esplosione raggiunge la barriera per la dissipazione del fronte di fiamma. Se l'esplosione raggiunge la barriera prima che questa sia completamente consolidata, il fronte di fiamma supera l'ostacolo e l'isolamento è inefficace; il completo abbassamento di un adeguato ostacolo prima dell'arrivo del fronte di fiamma rende efficace la protezione.
Il tempo richiesto per la detenzione di un'esplosione è dipendente principalmente dal volume del contenitore e dall'indice di esplosività, K_{st} o K_G; cresce se aumenta il volume e decresce se diminuisce K_{st} (o K_G). Per esempio, una nube di polvere con un basso indice K_{St} in un grande volume richiede più tempo per rivelare la pressione, piuttosto che con un alto valore di K_{st} e un volume ridotto. L'effetto del ritardo della detenzione può permettere alla fiamma di propagarsi più lontano e più velocemente prima che abbia inizio l'isolamento, portando al fallimento della misura protettiva.
Il tempo richiesto per l'installazione della barriera dipende dal tipo di sistema di isolamento. Per un isolamento chimico, il tempo necessario è funzione della velocità di immissione della sostanza chimica e dai parametri geometrici di lunghezza e diametro della condotta di scarico. Per un isolamento meccanico, il tempo richiesto per la chiusura delle valvole dipende dall'energia necessaria alla chiusura e dal diametro della condotta.
Il tempo di propagazione della fiamma è il più impegnativo da determinare. È ben noto che la velocità di combustione e l'accelerazione della fiamma aumentano nel tempo e sono influenzati dalle caratteristiche del combustibile (K_{st}, K_G), dalla presenza di turbolenza, dai gomiti o altre

ostruzioni della condotta, della velocità di trasporto del flusso e dalla pressione ridotta nel volume a monte. Nella pratica vengono usate alcune semplificate correlazioni basate su limitati dataset, in quanto non esistono valide metodologie scientifiche accettabili.
La progettazione del sistema di isolamento più idoneo deve considerare sia lo scenario di esplosione più gravoso, da cui poter determinare la minima distanza a cui dover istallare la barriera, sia lo scenario per l'esplosione più debole.
I sistemi di isolamento attivi più comunemente commercializzati sono le valvole flottanti, le valvole di arresto, le valvole automatiche meccaniche ad azione rapida e i sistemi di isolamento chimico.

Le valvole flottanti attive. Sono sistemi di chiusura del flusso analoghe alle valvole per uso idraulico. Sono interne ai sistemi di connessione, tipicamente a forma sferica, e permettono di contenere basse spinte dovute dalle sovrappressioni per esplosioni. Sono solitamente equipaggiate con sistemi pneumatici per rendere più rapida e facilitata la loro chiusura.

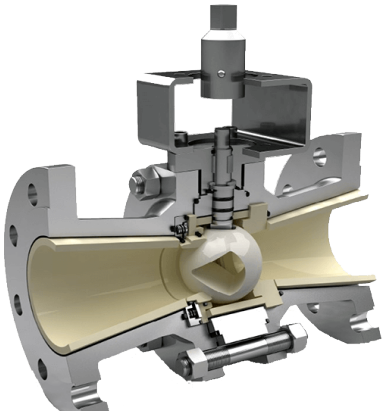


Figura 4.2 - Valvole flottanti attive

Le valvole automatiche meccaniche ad azione rapida. Sono dispositivi di isolamento che chiudono il flusso mediante un meccanismo a ghigliottina. Un rivelatore manda il segnale a un dispositivo di controllo il quale comunica l'abbassamento della barriera. Questo sistema è permesso da un pistone pneumatico cilindrico posto in sommità della valvola che, azionato mediante un gas pressurizzato, abbassa il pistone e chiude la sezione. Speciali smorzatori assorbono la forza attraverso la superficie della barriera e prevengono lo scorrimento orizzontale dovuto dal ritorno elastico dopo la chiusura.

Figura 4.3 - Valvola automatiche meccaniche ad azione rapida

Le valvole di arresto interne. Anche detti sistemi di strozzatura, sono generalmente elastomeri con una camera d'aria che contornano interamente una sezione della condotta. Durante la deflagrazione un segnale elettrico viene mandato dai sensori, tipicamente applicati su un dispositivo di rivelamento di esplosioni, a un serbatoio di aria montato sulla valvola; il serbatoio libera il gas nella camera attorno all'elastomero che com-

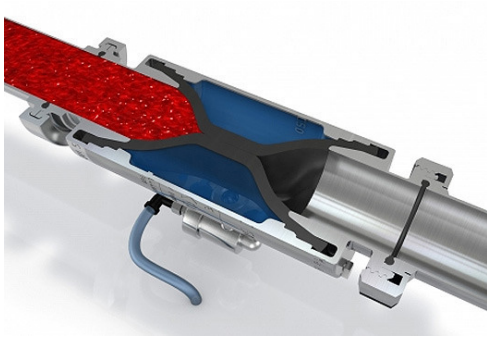


Figura 4.4 - Valvola di arresto

prime la sezione interrompendo il flusso. Il sistema, però, può rispondere in modo sfavorevole alle alte temperature che si possono riscontrare in presenza di fiamme generate dall'esplosione.

Il sistema di isolamento chimico. Un differente sistema di isolamento, rispetto a quelli precedentemente descritti che comportavano la chiusura meccanica della condotta, prevede l'inserimento di inibitori chimici estinguenti all'interno della condotta a formare un "tappo" non infiammabile. Questi sistemi richiedono particolari considerazioni in merito alla velocità del flusso introdotto nella condotta. L'isolamento chimico mediante componente estinguente, come il sodio bicarbonato o il fosfato di-idrogeno di ammonio, chimiche comunemente usate nell'estinzione degli incendi, è ampiamente usato nell'isolamento da esplosioni per la sua elevata efficacia, purchè appropriato al tipo particolare di sostanza infiammabile e giustificato per ogni scelta ingegneristica in cui l'applicazione è coinvolta.

4.2.4.2 Sistemi di isolamento passivo

I sistemi di isolamento passivo costituiscono misure in grado di ridurre gli effetti dell'esplosione senza l'attivazione di un impianto o dell'azione dell'uomo, ma secondo principi fisici automatici. Questi sono rappresentati tipicamente da sistemi di soffocamento quali valvole rotative, deviatori del fronte di fiamma, valvole flottanti passive, dispositivi di arresto statico a secco e di tipo idraulico.

I dispositivi di arresto. Sono elementi circolari inseriti nella condotta e vengono progettati in modo tale che il fronte di fiamma passi attraverso piccole ostruzioni che impediscono l'ossigenazione della fiamma. Viene definito MESG (*Maximum Experimental Safe Gap*) il massimo interstizio concesso sperimentalmente attraverso il quale la fiamma non può passare. I dispositivi di arresto sono normalmente posti a fine della condotta in prossimità della potenziale sorgente di ignizione, con la necessità, se richiesto, di porre più dispositivi in serie per contrastare l'effetto persistente del fronte di fiamma.
La National Electric Code, NEC, propone tre differenti gruppi in funzione della rispettiva area di MESG come indicato nella tabella che segue.

CLASSE DEL GRUPPO I SECONDO NEC	DIMENSIONE MESG	ESEMPIO DI GAS
Gruppo A	0.25 mm	Acetilene
Gruppo B	≤ 0.45 mm (Eccetto acetilene)	Idrogeno
Gruppo C	0.45 mm < MESG ≤ 0.75 mm	Etilene
Gruppo D	> 0.75 mm	Propano

Tabella 4.2 - Classificazione del MESG per i gas del Gruppo I

I deviatori del fronte di fiamma. Queste posso servire per il controllo della pressione e della

fiamma. Il principio alla base di questo dispositivo consiste nello sfogo della deflagrazione mediante una deviazione del flusso e lo scarico della pressione di esplosione all'apertura del dispositivo di scarico. Per evitare che alcune parti del dispositivo di scarico vengano proiettate via, la sezione di sfogo viene coperta da una gabbia resistente. Tale misura di protezione, proprio come nel caso del venting, deve evitare di porre in condizioni di pericolo il personale e l'ambiente vicino. Pertanto lo sfogo, così come tutte le misure di protezione, deve avvenire in condizioni di sicurezza e quindi deve essere direzionato verso uno spazio libero da possibili conseguenze.

Figura 4.5 - Schema del deviatore di fiamma

Le valvole flottanti passive. Analogamente ai sistemi attivi omonimi, le valvole flottanti passive sono progettate per bloccare uno specifico flusso risultato da una esplosione. In questo caso, come illustrato in Figura 4.4, l'onda di pressione che precede il fronte di fiamma spinge la valvola fino alla chiusura della sezione, ostruendo il passaggio e impedendo la transizione del fronte di fiamma.

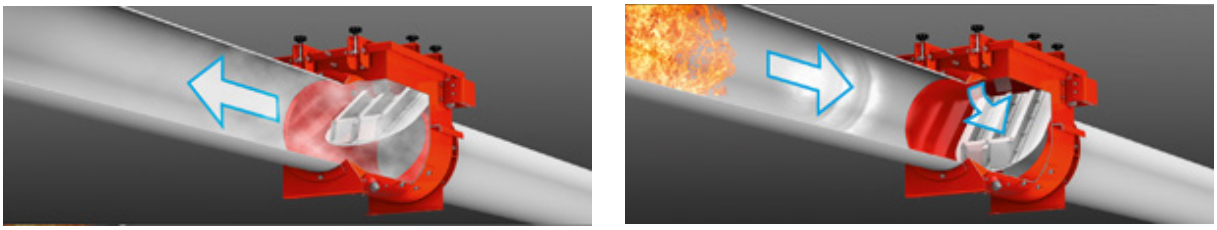


Figura 4.6 - Funzionamento passivo delle valvole flottanti

Le valvole rotative. Sono comunemente usate nei processi designati per mantenere una differenza di pressione tra dispositivi interconnessi. A seguito di un'esplosione la valvola rotativa viene automaticamente fermata, evitando il trasporto di materiale infiammato a valle del dispositivo dove questo può agire come sorgente di ignizione per le nubi di polveri e causare una seconda esplosione. La scelta progettuale legata alle valvole rotative permette un duplice sistema di isolamento: mantenere all'interno un volume chiuso e isolato fino all'estinzione della fiamma e bloccare la transizione del materiale ardente per mantenere il volume a rischio sopra la valvola.

Figura 4.7 - Valvola rotativa

4.3 Prescrizioni minime gestionali secondo D.Lgs. 81/2008

Le azioni preventive o protettive sono inefficaci se non supportate da un'idonea preparazione da parte del personale coinvolto nelle lavorazioni a stretto contatto con materiale di tipo esplosivo. Il D.Lgs. n. 81 del 9 aprile 2008 - *Testo unico sulla salute e sicurezza sul lavoro*, al Titolo IX - *Protezione da atmosfere esplosive*, dispone per il datore di lavoro le indicazioni di sicurezza da mantenere nelle condizioni di pericolo in zone con rischio esplosione.
Le disposizioni al presente titolo possono essere applicate in molteplici ambiti lavorativi, comprese le attività in sotterraneo, ad eccezione, però, delle aree utilizzate per le cure mediche dei pazienti, in attività per le quali è coinvolto un materiale chimico instabile o esplosivi, nelle attività delle industrie estrattive e nell'impiego di mezzi di trasporto terrestre, marittimo, fluviale e aereo.
Ai sensi di questo riferimento normativo, che dispone quanto prescritto dalla direttiva ATEX 1999/92/CE, il datore di lavoro è tenuto ad adottare le idonee misure tecniche e organizzative adeguate alla natura dell'attività a cui fanno riferimento. Pertanto, se questa, per sua natura non consente di poter prevenire la formazione di un'atmosfera esplosiva, il datore di lavoro deve evitarne l'innesco o attenuare gli effetti di un'esplosione al fine di garantire la salute e la sicurezza dei lavoratori, disposizioni che dovrà periodicamente controllare e verificare in caso di cambiamenti rilevanti.
Nell'assolvere gli obblighi stabiliti dal riferimento legislativo in merito, il datore di lavoro deve, inoltre, disporre un'analisi dei rischi che metta in relazione il processo produttivo in esame con i principi fondamentali dell'esplosione. Il datore di lavoro dovrà pertanto prendere in considerazione, nella loro coesitenza, almeno i seguenti aspetti:

- probabilità e durata della presenza di atmosfere esplosive;
- probabilità che le fonti di accensione, comprese le scariche elettrostatiche, siano presenti e divengano attive ed efficaci;
- caratteristiche dell'impianto, sostanze utilizzate, processi e loro possibili interazioni;
- entità degli effetti prevedibili.

Le valutazioni riscontrate dal datore di lavoro, per la messa in sicurezza dei luoghi di lavoro soggetti ad attività a rischio per le atmosfere esplosive, vengono riportate in un unico documento, denominato "Documento sulla protezione contro le esplosioni". Tale riferimento deve riportare i seguenti aspetti:

- i rischi di esplosione sono stati individuati e valutati;
- le misure adeguate per raggiungere gli obiettivi;
- i luoghi che sono stati classificati nelle zone, in accordo all'allegato XLIX del medesimo decreto degislativo;
- i luoghi in cui si applicano le prescrizioni minime di cui all'allegato L;
- i luoghi e le attrezzature di lavoro, compresi i dispositivi di allarme, concepiti, impiegati e

mantenuti in efficienza tenendo nel debito conto la sicurezza;
- gli accorgimenti adottati per l'impiego sicuro di attrezzature di lavoro.

In merito alle indicazioni di sicurezza applicati nell'allegato L fa riferimento anche l'articolo 294-bis del Titolo XI, riportando gli obblighi del datore di lavoro in merito alla formazione del personale.

A tale scopo, viene indicato che è reso necessario che il datore di lavoro provveda a una sufficiente e adeguata formazione in materia di protezione dalle esplosioni impiegati in luoghi di lavoro dove possono formarsi atmosfere esplosive. Con particolare riguardo, i lavoratori esposti al rischio vengono informati e formati in relazione al risultato della valutazione dei rischi sui seguenti aspetti:

- alle misure adottate in applicazione del Titolo XI;
- alla classificazione delle zone;
- alle modalità operative necessarie a minimizzare la presenza e l'efficacia delle sorgenti di accensione;
- ai rischi connessi alla presenza di sistemi di protezione dell'impianto;
- ai rischi connessi alla manipolazione ed al travaso di liquidi infiammabili e/o polveri combustibili;
- al significato della segnaletica di sicurezza e degli allarmi ottico/acustici;
- agli eventuali rischi connessi alla presenza di sistemi di prevenzione delle atmosfere esplosive, con particolare riferimento all'asfissia;
- all'uso corretto di adeguati dispositivi di protezione individuale e alle relative indicazioni e controindicazioni all'uso.

Sulla base, inoltre, del Documento sulla protezione contro le esplosioni devono essere svolte solo le lavorazioni autorizzate e scritte nel documento, secondo le istruzioni impartite dal datore di lavoro e secondo un dichiarato sistema di autorizzazioni che deve essere rilasciato prima dell'inizio dei lavori.

Solo un completo e adeguato controllo del datore di lavoro, sulle misure adottate e sul funzionamento di esse da parte dei lavoratori, può permettere una risoluzione efficace ed efficiente dell'analisi dei rischi, contemplata ai sensi dell'attuale normativa in vigore ai fini della sicurezza antincendio e, in generale, del lavoro.

5. Metodi a confronto per la determinazione dell'effetto da sovrapressione

Non sempre è possibile evitare l'innesco di un'esplosione, per quanto deve essere di primaria importanza ai fini della sicurezza doverne prevenire lo sviluppo. L'analisi della sicurezza condotto secondo un approccio ingegneristico di tipo prestazionale deve valutare anche l'entità degli effetti prevedibili che un'esplosione può produrre sui lavoratori, sulle cose, intese come apparecchiature e strutture, e sull'ambiente.
In generale, è necessario indicare che gli effetti condotti a seguito di un'esplosione possono essere molteplici, sia di natura meccanica che di natura chimica, sia diretti che indiretti dall'esplosione. Con riferimento al paragrafo V.2.2.5 - *Valutazione dell'entità degli effetti prevedibili di un'esplosione* - si riportano i seguenti effetti fisici di un'esplosione:

- Fiamme e gas caldi;
- Irraggiamento termico;
- Proiezione di frammenti od oggetti;
- Rilasci di sostanze pericolose;
- Onde di pressione.

Particolare attenzione deve essere fatta nei riguardi della combinazione di questi effetti, lì dove potrebbero portare a un effetto domino con la formazione di una seconda esplosione, anche con magnitudo e intensità molto maggiori rispetto alla prima.
Per esempio, se si considera un basso livello di manutenzione in pulizia, possono depositarsi strati di polveri[1] sulle apparecchiature e sulle superfici in zone a rischio esplosione. Quando l'esplosione sfocia, accidentalmente, nei pressi del deposito, l'onda d'urto da questa generata solleva lo strato di polvere a formare una nube aerodispersa. Il calore indotto dal fronte di fiamma della prima esplosione può inoltre essere fonte di innesco per l'atmosfera esplosiva così generata, e portare allo sviluppo di una esplosione secondaria. Questo scenario è sovente considerato negli stabilimenti da polvere di cereali.

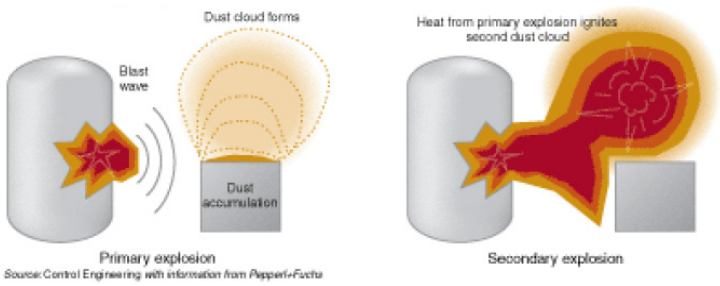


Figura 5.1 - Esplosione secondaria

1 Letterature anglosassoni indicano che uno strato di polvere può risultare pericoloso se non permette di distinguere il colore della superficie su cui è depositato.

Tra i riferimenti normativi di carattere strutturale in merito alle esplosioni, si indica il Decreto Ministeriale 17 gennaio 2018, anche noto come *Le nuove Norme Tecniche per le Costruzioni*, che insieme all'Eurocodice 1 Parte 2-7 propongono una classificazione delle azioni dovute dalle esplosioni sulla base degli effetti che queste possono generare.
L'Eurocodice classifica le azioni di progetto dovute dall'esplosione in tre categorie, sulla base degli effetti che questa può produrre sulla costruzione:

CATEGORIA DI AZIONE	POSSIBILI EFFETTI
1	Conseguenze limitate
2	Conseguenze medie
3	Conseguenze ampie

Tabella 5.1 - Categorie di azioni dovute alle esplosioni secondo Eurocodice 1

La Categoria 1 indica un livello di azione con effetti trascurabili sulle strutture, per la quale non è prevista alcun tipo di verifica.
La Categoria 2 raggruppa le azioni che generano effetti di tipo localizzato su parte della struttura. Si può adottare un'analisi semplificata con l'applicazione di azioni statiche equivalenti di progetto, oppure applicando procedure progettuali minime.
Per le azioni di Categoria 2 è possibile approssimativamente utilizzare la pressione statica equivalente nominale data dal maggiore tra:

$$p_d = 3 + p_v \qquad \text{o} \qquad p_d = 3 + p_v/2 + 0{,}04/(A_v/V)^2$$

dove:

- p_v è la pressione statica uniformemente distribuita alla quale cedono le aperture di sfogo;
- A_v è l'area delle aperture di sfogo [m^2];
- V è il volume del vessel fino a un massimo di 1000m^3;

Su tutti gli elementi chiave di dettaglio di una struttura deve essere posto come valore prescrittivo limite un'ideale pressione statica eccezionale di progetto, p_d, pari a 20 kN/m^2 su ogni direzione di tutti gli elementi analizzati.
La Categoria 3, infine, prevede un'attenzione maggiore sulla struttura, in quanto comprende gli effetti generalizzati sulla sua globalità. Per questa categoria vengono richieste analisi dinamiche con modelli non lineari del fenomeno e, se necessario, considerazioni in merito all'interazione carico-struttura. Questa categoria viene approfondita nell'Appendice B dell'Eurocodice di riferimento, indicando particolari osservazioni sulle sezioni strutturali da analizzare e scegliendo il gas propano come elemento d'indagine a carattere esplosivo.
Nel caso in cui, quindi, si ritenga inevitabile lo sviluppo di un'esplosione, dovranno essere tenute in conto l'adozione di misure di protezione tali da mitigarne gli effetti entro limiti accettabili, e

quindi di dover modellare accuratamente la misura dello stesso, quantificando le azioni mediante tecniche analitiche o codici numerici riconosciuti.
Nello specifico, in questo capitolo, saranno messi a confronto differenti metodologie per la valutazione dell'effetto da sovrapressione.

5.1 TNT Method

Il metodo del TNT equivalente viene applicato per la stima degli effetti di una qualsiasi nube di gas, assimilandoli però a quelli di una più nota detonazione ideale di TNT.
I valori di pressione di picco raggiungibile da un gas sono dell'ordine di poche decine di bar; quelle di un candelotto di TNT sono invece notevolmente maggiori. Questo pone in dubbio l'applicazione del metodo per la valutazione degli effetti sulle deflagrazioni di miscele di gas in prossimità del punto di innesco.
L'applicazione di questo metodo prevede, come primo passo, di individuare la massa di gas equivalente al corrispettivo valore di TNT, posti in relazione energeticamente attraverso le masse e le energie sviluppate indipendentemente nell'esplosione. Per gli idrocarburi, la massa del gas in equivalenti TNT viene così indicata:

$$M_{TNTeq} = \eta \cdot (\Delta H_{comb} / \Delta H_{TNT}) \cdot M_{comb}$$

dove:

- M_{TNTeq} indica la quantità di massa equivalente [kg];
- η è il fattore di efficienza;
- ΔH_{comb} è l'entalpia di combustione del gas infiammabile [kJ/kg];
- ΔH_{TNT} è l'entalpia di decomposizione del TNT pari a 4700 kJ/kg;
- M_{comb} è la massa di combustibile [kg].

La precedente formulazione può essere semplificata considerando che il rapporto tra l'energia rilasciata dalla combustione di un gas idrocarburo è pari circa a 10 volte l'energia data dalla decomposizione del TNT, per la medesima massa[2].
Il fattore di efficienza, η, invece, tiene conto della diversità di esplosione tra la detonazione del TNT e la deflagrazione di un gas. Risulta un parametro di difficile determinazione in quanto è relazionato alle condizioni al contorno della tipica esplosione (condizioni orografiche, caratteristiche di reattività della sostanza, ...). Il fattore di efficienza è inoltre funzione della massa di gas presente all'interno dei limiti di infiammabilità al momento dell'innesco, ma poichè tale parametro è di difficile indicazione, viene comunemente stimato sulla base dell'intera massa di gas infiammabile rilasciata, indicando così valori del fattore di efficienza compresi tra 0,02 e 0,7.
Per gas naturali, invece, si propone la seguente formulazione per indicare la riultante massa

2 Cavaliere, A., Manuale per l'applicazione delle direttive ATEX. Roma, EPC Editore, 2011

equivalente di TNT:

$$M_{TNTeq} \sim 0{,}16 \cdot V$$

dove V è il volume, espresso in m^3, del più piccolo valore tra il volume del vessel in cui è contenuto il gas o quello del gas stesso, assunto un valore di pressione atmosferica iniziale.

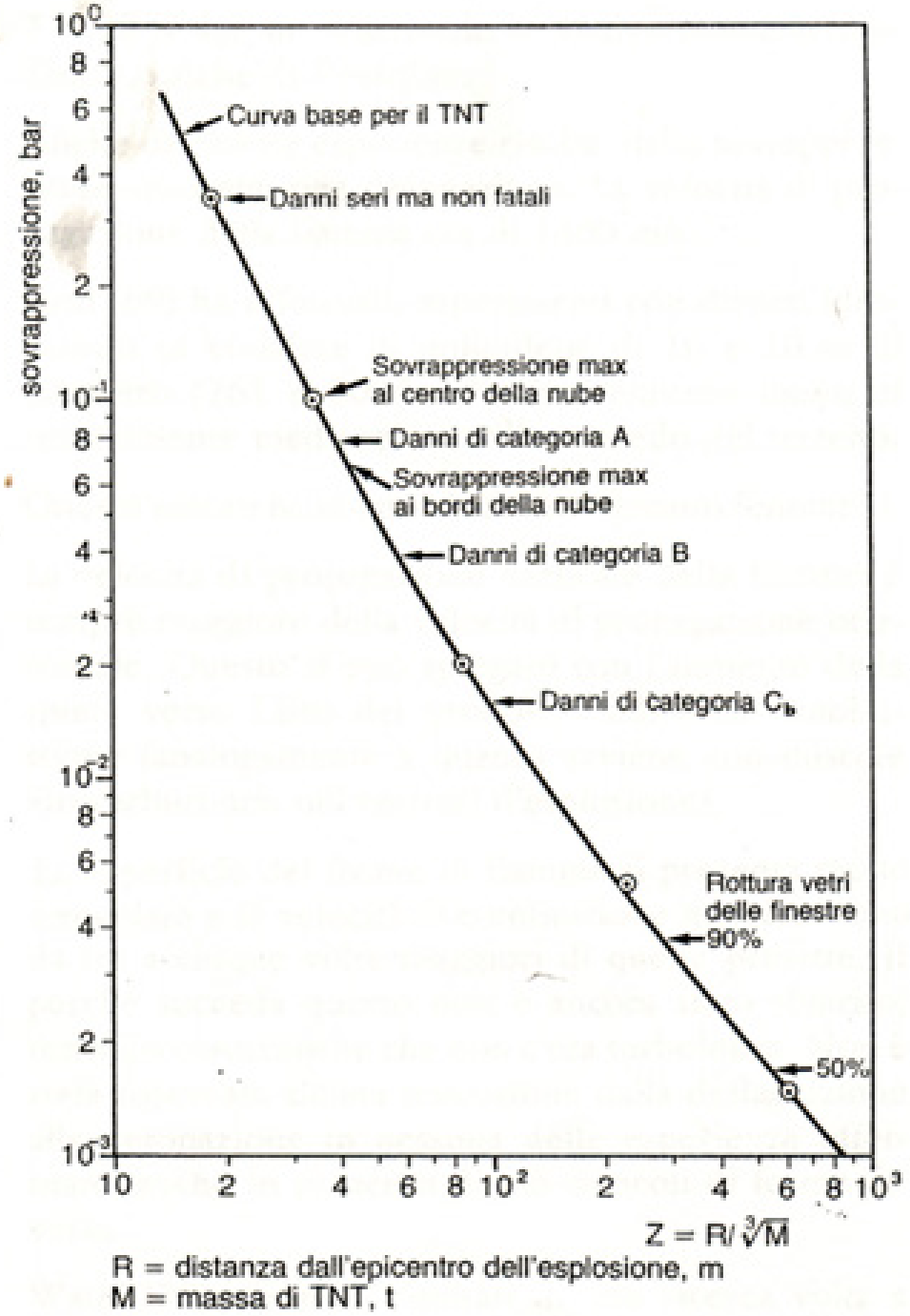


Figura 5.2 - Curva di sovrapressione del TNT

Definito il valore della massa di TNT equivalente, la sovrapressione di picco e altri effetti legati alla dinamica dell'esplosione vengono correlati mediante la distanza scalata. Già presentata nel paragrafo 1.3.3, la distanza scalata è definita, in termini di massa equivalente, come:

$$Z = z / (M_{TNTeq}^{1/3})$$

dove:

- Z è la distanza ridotta espressa in [m/J $^{1/3}$] o [m/kg $^{1/3}$];
- z è la distanza dal punto di innesco [m];

Nota la distanza ridotta così calcolata, mediante il grafico in Figura 5.2 riportante la curva dei valori di sovrapressione del TNT al variare della distanza, è possibile indicare la sovrapressione generata da un dato gas reso equivalente.
Questa metodolo risulta valida sotto l'applicazione di aclune limitazioni. Il metodo TNT equivalente viene utilizzato solo per la stime delle sovrapressioni per nubi di gas non confinati (UVCE), fornendo risultati accettabili ad elevate distanze dal confine della nube, ma sovrastimando notevolmente la sovrapressione nelle zone interne alla nube. Per tale motivo, si limita l'utilizzo di questa metodologia per valori di sovrapressione interna pari a 1 bar.

5.2 Multi-Energy Method

Il metodo Multi-Energy, anche detto MEM, è un metodo semplificato alla pari del TNT equivalente, ed è stato proposto dai laboratori del TNO, un centro olandese che opera nell'ambito della ricerca scientifica applicata.
Questo metodo si avvale di curve parametriche ottenute attraverso prove di laboratorio e che riportano la distribuzione delle caratteristiche dell'onda d'urto in relazione alla distanza scalata.
Questo metodo è stato sviluppato da Van Der Berg e da Van Wingerder, i quali valutarono che affinchè una nube di gas infiammabile possa generare un'esplosione confinata l'innesco debba avvenire in particolari condizioni di congestione.
A differenza del metodo TNT equivalente, viene specificato che non è condizione sufficiente che il gas, o porzioni di esso, sia all'interno del campo di infiammabilità, nè tantomeno può essere semplificato all'intero volume di gas presente. Pertanto questo modello dispone che solo il gas presente all'interno di aree congestionate contribuisce alla formazione di una UVCE, in quanto le condizioni al contorno legate al congestionamento della nube riportano un'elevato grado di turbolenza e quindi un significativo aumento del fronte di fiamma.
Partendo dalla determinazione dell'energia di combustione nel volume di gas, come precedentemente descritto, si definisce che per gli idrocarburi l'energia è così approssimabile:

$$E \sim 3{,}5 \cdot V$$

dove:

- E è l'energia di combustione espressa in [MJ/m^3];
- V è il volume delle sole porzioni di gas congestionate [m^3];

Con il metodo Multi-Energy è possibile stimare la pressione di picco e la durata della fase positiva. Questo avviene individuando il profilo della curva di pressione che più si presta per individuare il caso in esame. Il TNO fornisce dieci curve, ognuno delle quali è corrisposta a un valore di pressione iniziale, rappresentato dall'etichetta ad essa assegnata.
La scelta della curva parametrica è il principale limite del metodo. In letteratura si riscontrano alcune correlazioni (Tabella 5.1), puramente indicative, che associano un ipotetico scenario al range di curve parametriche più idonee. La curva 10 è la modellazione più vicina al metodo TNT equivalente e può essere usata per condizioni di detonazione. Le curve dalla 1 alla 9 sono rappresentative di esplosioni deflagranti. Nello specifico, la curva 1 può essere usata in assenza di congestionamento e quindi per miscele in quiete.

CARATTERISTICHE DELLO SCENARIO	CURVA MULTI-ENERGY
Energia di accensione: ALTA Ostruzione: ALTA Confinamento piano parallelo: PRESENTE	7 - 10
Energia di accensione: ALTA Ostruzione: ALTA Confinamento piano parallelo: ASSENTE	7 - 10
Energia di accensione: BASSA Ostruzione: ALTA Confinamento piano parallelo: PRESENTE	5 - 7
Energia di accensione: ALTA Ostruzione: BASSA Confinamento piano parallelo: PRESENTE	5 - 7
Energia di accensione: ALTA Ostruzione: BASSA Confinamento piano parallelo: ASSENTE	4 - 6
Energia di accensione: ALTA Ostruzione: NO Confinamento piano parallelo: PRESENTE	4 - 6
Energia di accensione: BASSA Ostruzione: ALTA Confinamento piano parallelo: ASSENTE	4 - 5
Energia di accensione: ALTA Ostruzione: NO Confinamento piano parallelo: ASSENTE	4 - 5

Energia di accensione: BASSA Ostruzione: BASSA Confinamento piano parallelo: PRESENTE	3 - 5
Energia di accensione: BASSA Ostruzione: BASSA Confinamento piano parallelo: ASSENTE	2 - 3
Energia di accensione: BASSA Ostruzione: NO Confinamento piano parallelo: PRESENTE	1 - 2
Energia di accensione: BASSA Ostruzione: NO Confinamento piano parallelo: ASSENTE	1

Tabella 5.2 - Scelta della curva Multi-Energy in base allo scenario di esplosione

Una volta definita la curva più rappresentativa del modello in esame, si adotta il grafico che lega la distanza scalata, calcolata in funzione dell'energia di combustione, alla sovrapressione scalata, o agli altri parametri scalati rispetto alle loro condizioni iniziali.

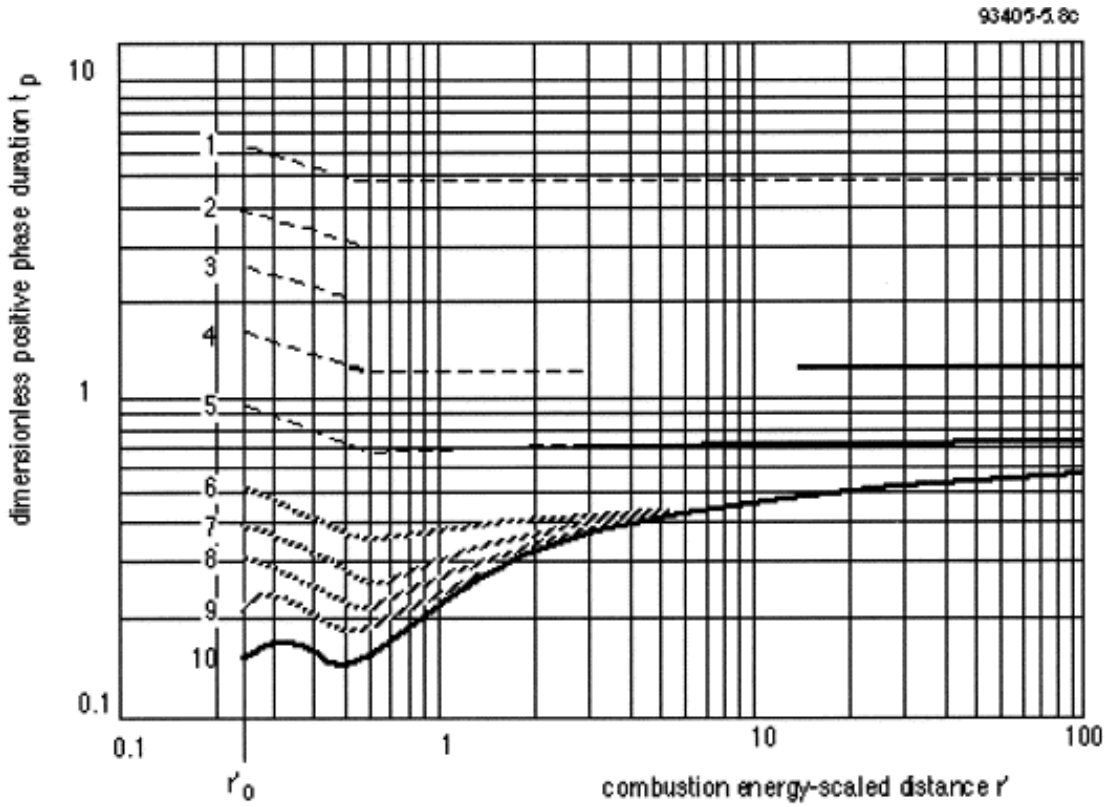


Figura 5.3 - Curva di durata della fase positiva scalata nel metodo Multi-Energy

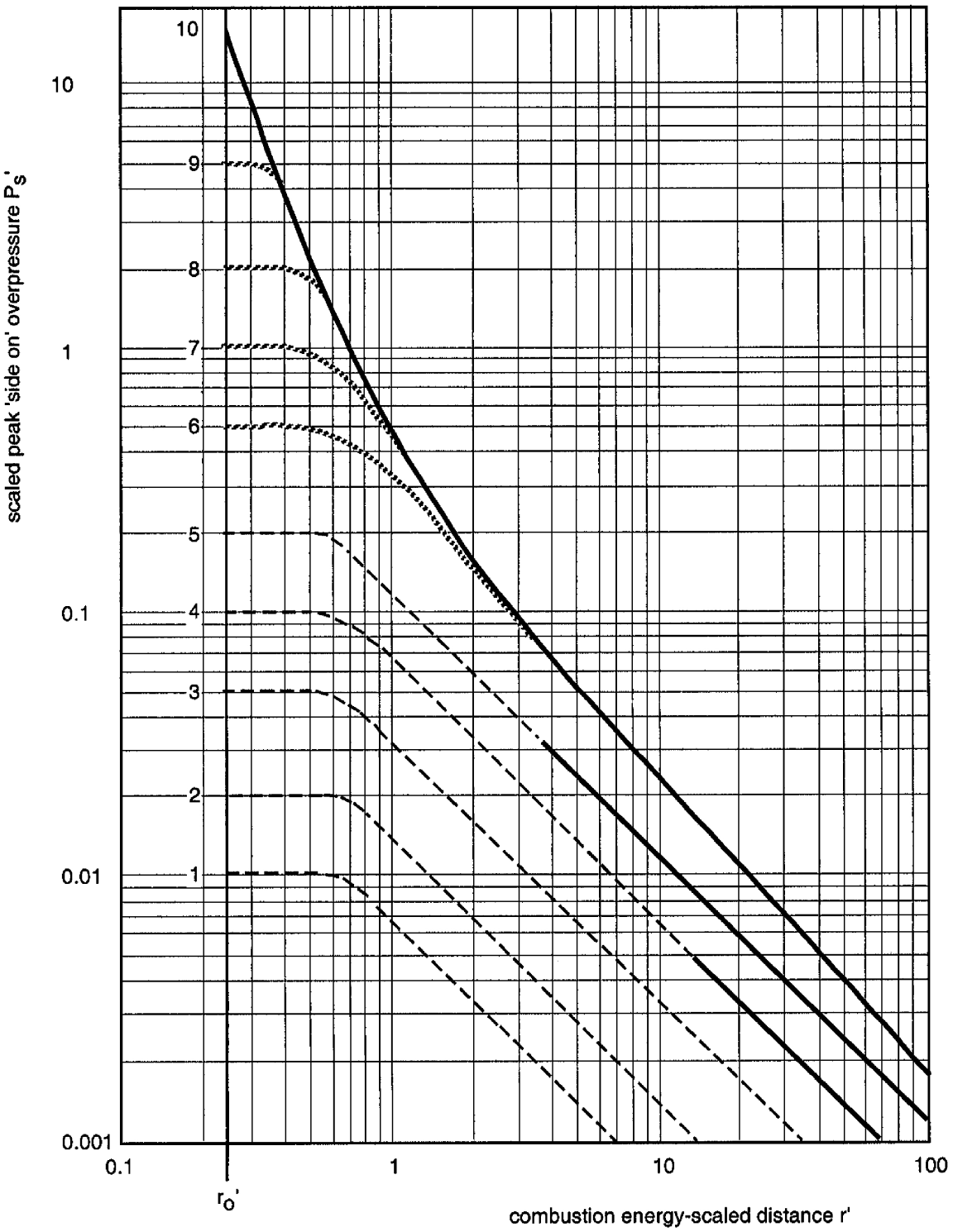


Figura 5.4 - Curva di sovrapressione scalata nel metodo Multi-Energy

5.3 Metodo ATECOS - Released Power

Il metodo ATECOS - Released Power, proposto dall'ingegnere Fidelibus, si pone l'obiettivo di fornire una formulazione analitica semplificata alla valutazione della sovrapressione, colmando alcuni svantaggi dei metodi appena discussi e fornendo una soluzione che leghi il valore atteso alle proprietà intrinseche e di facile reperibilità della miscela esplosiva e dell'ambiente in cui avviene l'esplosione.
Il metodo semplificato si avvale della disposizione di numerose sperimentazioni condotte sul campo prove di proprietà dell'azienda ATECOS s.r.l., ponendosi l'obiettivo di fornire al progettista antincendio una formulazione adatta a molteplici condizioni, di facile applicazione e non onerosa. Questo metodo, inoltre, soddisfa le richieste dei più avanzati dettami normativi che impongono la valutazione delle azioni a seguito di condizioni accidentali e degli effetti da essi causati. L'appoccio ingegneristico alla valutazione delle condizioni di sicurezza antincendio, infatti, insieme alle NTC, forniscono solo alcune indicazioni tecniche di massima sugli obblighi imposti al datore di lavoro nella valutazione gli effetti da esplosione, lasciando, però, libertà di scelta al progettista di applicare il metodo più indicato.
Il metodo ATECOS[3] si propone come formulazione analitica in grado di legare, nello specifico, il valore di pressione di picco a seguito di un'esplosione con le caratteristiche fisiche della sostanza ATEX, le condizioni di confinamento e il volume della miscela.
Sono state quindi presentate le seguenti formulazioni indicate come Formula Fidelibus. La prima per gli ambienti non confinati:

$$\Delta P = K \cdot LEL_m \cdot a \cdot (H/E)$$

e la seguente per gli ambienti totalmente confinati:

$$\Delta P = K \cdot LEL_m \cdot a \cdot H \cdot (V_{ex}/V)$$

dove:

- ΔP è la sovrapressione di picco;
- K è il fattore di dosaggio della miscela compreso tra 1 e K_{UEL}, dove K_{UEL} è il rapporto UEL/LEL;
- LEL_m è il limite inferiore di esplosività;
- UEL è il limite superiore di esplosività;
- H è il potere calorifico inferiore della miscela per unità di massa [MJ/kg];
- E è il fattore di espansione;

3 Cancellieri, P., Fidelibus, A., Ponticelli, L. , *Un metodo semplificato per la verifica degli effetti di esplosioni sulle strutture*, Antincendio 10/15

- V è il volume del vessel [m^3];
- V_{ex}/V è il rapporto di confinamento, dove V_{ex} è il volume di miscela [m^3].

Entrambe le formulazioni indicano a che è il fattore correttivo. Questo viene indicato come:

$$a = a_1 \cdot a_2 \cdot a_3$$

dove:

- a_1 è il fattore di efficienza dell'esplosione. Minore di 1 se la combustione risulta incompleta, maggiore di 1 se si possono verificare accelerazioni del fenomeno esplosivo;
- a_2 è il fattore di interazione fluidodinamica tra l'onda d'urto e la struttura colpita. Maggiore di 1 per ambienti congestionati che quindi generano effetti turbolenti;
- a_3 è il fattore di interazione tra le caratteristiche chimiche della sovrapressione e le caratteristiche dinamiche dell'oggetto, determinato in relazione al rapporto tra la durata dell'esplosione, t, e i periodo proprio di oscillazione della struttura colpita.

La sovrapressione così calcolata permette di individuare possibili effetti sequenziali all'onda d'urto quali effetti domino e la verifica dell'effettiva funzionalità degli impianti di spegnimento o per valutare possibili esplosioni secondarie durante le fasi di soccorso.
È evidente come, noto il volume libero V in cui i gas combustibili possono espandersi, la sovrapressione di picco dipende solo dalle caratteristiche energetiche della sostanza (H) e dalla quantità di sostanza.
In particolare si può osservare la corrispondenza con il metodo Multi-Energy nella individuazione di un plafond iniziale in corrispondenza del punto di innesco.

5.4 Criteri di ponderazione dell'effetto da sovrapressione

La ponderazione è la fase conclusiva di un'analisi destinata a stabilire se la misura attesa è considerata accettabile o devono essere adottate misure di riduzione del rischio.
In merito alle esplosioni da miscele ATEX il Codice di prevenzione incendi ha l'indubbio merito di aver correttamente impostato la problematica della valutazione degli effetti da esplosione; sarebbe tuttavia opportuno, a parere di chi scrive, che fossero identificate soluzioni conformi, come, invece, è indicato nella trattazione delle strategie antincendio.
A tal proposito si possono individuare due percorsi di seguito proposti.
Il primo, in linea con quanto descritto dall'approccio ingegneristico, potrebbe consiste nel rinviare ad analisi dinamiche secondo i metodi indicati dalle varie regole tecniche (Eurocodice e NFPA) eventualmente riferiti ai valori di sogliaindicati dal D.M.LL.PP. 9 Maggio 2001, *Requisiti minimi di sicurezza in materia di pianificazione urbanistica e territoriale per le zone interessate da stabilimenti a rischio di incidente rilevante.* Questo indica cinque valori di soglia in relazione all'entità del danno per persone o strutture. Al di sotto di questi si ritiene convenzionalmente

che il danno non accada, viceversa, superati questi si ritiene che il danno avvenga in relazione all'entità.
Si riportano nella tabella che segue i valori di soglia consigliati dalla sopracitata normativa.

SCENARIO INCIDENTALE	ELEVATA LETALITÀ	INIZIO LETALITÀ	LESIONI IRREVERSIBILI	LESIONI REVERSIBILI	DANNI ALLE STRUTTURE / EFFETTI DOMINO
	1	2	3	4	5
Incendio (radiazione termica straordinaria)	12,5 kW/m^2	7 kW/m^2	5 kW/m^2	3 kW/m^2	12,5 kW/m^2
BLEVE/Fareball (radiazione termica variabile)	Raggio fireball	350 kJ/m^2	200 kJ/m^2	125 kJ/m^2	200-800 m (secondo la tipologia del serbatoio)
Flash-fire (radiazione termica istantanea)	LFL	1/2 LFL			
VCE (sovrapressione di picco)	0,3 bar (0,6 spazi aperti)	0,14 bar	0,07 bar	0,03 bar	0,3 bar
Rilascio tossico (dose assorbito)	LC50 (30min,hmn)		IDLH		

Tabella 5.2 - Valori di soglia per gli effetti da esplosione

Il secondo, potrebbe consistere invece nella individuazione di soluzioni conformi come quella riportata nelle NTC. Questa richiede la verifica degli elementi chiave di una struttura, ovvero nelle sezioni particolarmente sollecitate, dove il valore di sovrapressione statica di progetto non deve essere superiore a 20 kN/m^2. Tale scelta si riconduce a una valutazione legata alla natura del materiale di cui è costituito l'ambiente dove si sviluppa l'esplosione. Noto il limite di resistenza di un materiale, si richiede di verificare se l'azione agente sulla superficie investita dall'onda d'urto supera lo limite ultimo di resistenza che porta a rottura il materiale o se è contenuto nel rispetto dello stato limite di esercizio.

6. Conclusioni

Allo stato dell'arte esistono strumenti, tra cui in particolare l'approccio ingegneristico, che permettono di definire una sequenza logica per l'analisi del rischio esplosione. Sono disponibili metodi consolidati per tener conto del differente comportamento dei gas e delle polveri e conseguentemente dei metodi per la valutazione dei rischi e le relative tecniche di prevenzione e protezione. In questa tesi si è voluto approfondire l'aspetto della sovrapressione generata da un'esplosione quale effetto a cui sono associate conseguenze catastrofiche in caso di incidente. Esaminando la normativa, emerge che la scelta della metodologia di calcolo della sovrapressione dovuta dall'onda d'urto è demandata al progettista. A tale scopo sono stati messi a confronto differenti metodi: il TNT equivalente, il TNO-Multy-Energy e il metodo ATECOS - Released Power, quale approccio recentemente proposto.
Nella tabella che segue sono evidenziate le risultanze relative a specifici aspetti.

	TNT EQUIVALENTE	MULTI-ENERGY METHOD	ATECOS - Released power
Applicabile a nudi di gas	X	X	X
Per miscele confinate		X	X
Per miscele non confinate	X		X
Basato su valutazioni energetiche	X	X	X
Limitate condizioni di pressione iniziale	X	X	
Lega la sovrapressione alla distanza scalata	X	X	
Relazione diretta tra miscela e sovrapressione			X
Il volume di miscela è quello congestionato		X	X
Considera l'interazione tra l'onda d'urto è il target da esso investito			X

Tabella 6.1 - Confronto tra metodi per la determinazione della sovrapressione

Ognuna delle valutazioni indicate risulta affetta da limiti di applicabilità che collocano la metodologia più idonea in ristretti casi pratici.
Il metodo TNT equivalente, così come il metodo Multy-Energy, sono indicati esclusivamente per esplosioni di gas non confinati, nel primo caso, o confinati, nel secondo, e prevedono valutazioni discrezionali riconducibili all'esperienza del progettista che condizionano fortemente i risultati.
Il metodo TNT equivalente, inoltre, riconduce il confronto al comportamento di un detonante solido, il TNT, per certi versi molto distante da quello di una miscela ATEX.

Il metodo ATECOS - Released Power, seppur ancora in fase di validazione, si propone come valida alternativa alle due metodologie precedenti in quanto riconduce la sovrapressione alle proprietà del materiale e ad altri parametri di facile reperibilità.
In conclusione, per successivi approfondimenti, si propone di poter testare in prima istanza l'affidabilità delle tecniche sovra descritte mediante l'utilizzo di codici numerici riconosciuti, quali FLACS o ANSYS o ExDAM, che si avvalgono di risolutori analitici per la fluidodinamica computazionale.

Bibliografia e sitografia

Dal corpo normativo:

D.Lgs. 9 Aprile 2008, n.81, *Testo unico sulla salute e sicurezza sul lavoro*, 2016.

D.P.R. 1 Agosto 2011, n.151, *Nuovo regolamento di prevenzione incendi*.

D.M. 9 Maggio 2007, n.117, *Direttive per l'attuazione dell'approccio ingegneristico alla sicurezza antincendio.*

D.M. 10 Marzo 1998, *Criteri generali di sicurezza antincendio e per la gestione dell'emergenza nei luoghi di lavoro*.

D.M. 3 Agosto 2015, *Approvazione di norme tecniche di prevenzione incendi, ai sensi dell'articolo 15 del decreto legislativo 8 marzo 2006, n. 139*.

D.M. 17 Gennaio 2018, *Norme tecniche delle costruzioni*.

Direttiva ATEX 1999/92/CE del Parlamento europeo e del Consiglio, 16 Dicembre 1999 relativa alle prescrizioni minime per il miglioramento della tutela della sicurezza e della salute dei lavoratori che possono essere esposti al rischio di atmosfere esplosive.

Direttiva ATEX 2014/34/UE del Parlamento europeo e del Consiglio, 26 Febbraio 2014 concernente l'armonizzazione delle legislazioni degli Stati membri relative agli apparecchi e sistemi di protezione destinati a essere utilizzati in atmosfera potenzialmente esplosiva.

D.M.LL.PP. 9 Maggio 2001, *Requisiti minimi di sicurezza in materia di pianificazione urbanistica e territoriale per le zone interessate da stabilimenti a rischio di incidente rilevante*.

UNI EN 1127-1, *Atmosfere esplosive - Prevenzione dell'esplosione e protezione contro l'esplosione - Concetti fondamentali e metodologia*, 2011.

UNI EN 14491, *Sistemi di protezione mediante sfogo dell'esplosione di polveri*, 2012.

UNI EN 14034-1, *Determination of explosion characteristics of dust clouds - Part 1: Determination of the maximum explosion pressure Pmax of dust clouds*, 2004.

UNI EN 1991-1-2, *Eurocodice 1- Azioni sulle strutture - Parte1-2: Azioni in generale-Azioni sulle strutture esposte al fuoco*, 2004.

CEI EN 60079-10-1, *Classificazione dei luoghi - Atmosfere esplosive per la presenza di gas*, 2016.

CEI EN 60079-10-2, *Classificazione dei luoghi - Atmosfere esplosive per la presenza di polveri*, 2016.

NFPA Fire protection handbook, Section 2, Chapter 8, *Explosions*, 2017.

NFPA Fire protection handbook, Section 17, Chapter 8, *Explosions Prevention and Protection*, 2017.

NFPA Fire protection handbook, Section 18, Chapter 6, *Deflagration (Explosion) Venting*, 2017.

NFPA 68 - *Standard on explosion protection by deflagration venting, 2007*

NFPA 69 - *Standard on Explosion Prevention Systems, 2002*
NFPA 921 - *Guide for Fire and Explosion Investigations, 2004*

Dalla letteratura:

La Malfa, A., La Malfa, S. e La Malfa, R. , *Ingegneria della Sicurezza Antincendio: Progettazione con il metodo tradizionale e il codice di prevenzione incendi*. Roma, Legislazione tecnica, 2017.
Cavaliere, A. , *Manuale per l'applicazione delle direttive ATEX*. Roma, EPC Editore, 2011.
Cavaliere, A., Scardamaglia, P. , *Guida all'applicazione delle direttive ATEX*. Roma, EPC Editore, 2005.

Da articoli e periodici del settore:

De Rosa, A. e Notaro, F. (2012). *Esplosioni ai raggi X così opera il Nia*. *Antincendio*, 7, 32-42.
Mazzaro M. (2016). V*alutazione e riduzione del rischio nelle attività soggette: la nuova RTV "aree a rischio specifico per atmosfere esplosive"*. *Antincendio*, 10, 92-100.
Marigo, M. (2004). *Le norme da rispettare per tenere sotto controllo le esplosioni da polveri. Prima parte*. Antincendio, 4, 81-91.
Marigo, M. (2004). *Le norme da rispettare per tenere sotto controllo le esplosioni da polveri. Seconda parte*. Antincendio, 5, 131-136.
Cancelliere, P., Fidelibus, A. e Ponticelli, L., *Un metodo semplificato per la verifica degli effetti di esplosioni sulle strutture*. Antincendio, 10, 38-41.
Vanzini, V. (2016). *Progettare con il Codice: valutazione tabellare ed analitica delle distanze in un caso reale.* Antincendio, 2, 16-28.
Mazzaro, M. e Turturici, C. (2015). Gli scenari di incendio nella FSE: un esempio secondo il nuovo codice di Prevenzione Incendi. Antincendio, 9, 34-48.
Cocchi, A. e Cocchi, G. (2016). *La semiotica degli incendi: il ruolo dei segni nell'attività investigativa*. Antincendio, 2, 39-54.
Nassi, L. (2016). *La qualità degli studi con l'approccio ingegneristico e la qualifica degli operatori*. Antincendio, 5, 86-100.

Altre fonti:

Fidelibus, A. , *Appunti di fisica delle esplosioni*, ebook, 2016.
Fidelibus, A., *La resistenza degli edifici alle esplosioni,* Safety & Security, Gen-Feb 2010;
Basso, B., Bellamino, F., Carpegna, C., Alviano, Alviano, M., Iannello, S., Sai, G.M. , *La prevenzione delle esplosioni da polvere*, Arpa Piemonte, Dicembre 2015.
Prevenzione e protezione contro le esplosioni, Suva, Luglio 2014.
Cardillo, P. , *Le esplosioni di gas, vapori e polveri*, Stazione sperimentale per i combustibili.

Piccinini, N., Cardillo, P. , *Gas, vapori e polveri a rischio di esplosione e incendio*, Politecnico di Torino.

Colombo, S., Galatola, E., Perugini, V., Salvagio, D., *La Metodologia RAMSES 4*, Sindar s.r.l., Studio tecnico Salvagio, Marzo 2014.

Cancelliere, P., Fidelibus, A., Ponticelli, L. e Romani, A., Validazione sperimentale di un metodo semplificato per la valutazione degli effetti delle esplosioni, CNVVF DCPST, ATECOS s.r.l., TRR s.r.l.

Pera, F., Giuffrida, M., *Il rischio di esplosione, misure di protezione ed implementazione delle Direttive ATEX 94/9/CE e 99/92/CE*, INAIL, Edizione 2013

Sitografia:

www.gexcon.com
www.uni.com
www.minambiente.it
www.atexitalia.it
www.atecos.com