

**‘POLITECNICO DI TORINO**

Collegio di Ingegneria Chimica e dei Materiali

**Corso di Laurea Magistrale  
in Ingegneria Chimica e dei Processi Sostenibili**

Tesi di Laurea Magistrale

**La valutazione dei rischi in ambito  
industriale: ATEX**



**Relatore**

Prof.ssa Micaela Demichela

**Candidato**  
Alvise Guagliano

Settembre 2018



# INDICE

Introduzione.....	1
1. Generalità e definizioni .....	3
1.1 Parametri chiave .....	4
1.2 Gas, vapori o nebbie infiammabili.....	8
1.3 Polveri combustibili.....	9
2. Classificazione dei luoghi.....	11
2.1 Classificazione dei luoghi per presenza di gas, vapori o nebbie esplosive .....	11
2.2 Procedimento per la classificazione dei luoghi pericolosi per presenza di gas, vapori o nebbie infiammabili .....	11
2.3 Calcolo della portata di emissione di una sostanza infiammabile .....	20
2.4 Calcolo della portata d'aria di ventilazione .....	22
2.5 Grado e disponibilità della ventilazione .....	28
2.6 Determinazione del tipo di zona pericolosa.....	30
2.7 Calcolo della distanza pericolosa "d <sub>Z</sub> " .....	31
2.8 Classificazione dei luoghi per presenza di polveri combustibili.....	33
2.9 Procedimento per la classificazione dei luoghi pericolosi per presenza di polveri combustibili .....	34
2.10 Calcolo della portata di emissione di una polvere combustibile.....	43
2.11 Grado e disponibilità di un sistema di asportazione delle polveri .....	43
2.12 Efficacia di un sistema di contenimento in depressione delle polveri .....	44
2.13 Efficacia di un sistema di rimozione degli strati di polvere.....	44
2.14 Efficacia di un sistema di inertizzazione dell'atmosfera dell'ambiente.....	45
2.15 Efficacia di un sistema di pressurizzazione per locale o edificio .....	46
2.16 Determinazione del tipo di zona pericolosa in base a grado di emissione e presenza di un sistema di bonifica .....	47
2.17 Calcolo della distanza pericolosa "d <sub>Z</sub> " e della quota "a" .....	49
3. Sorgenti d'innesco .....	53
3.1 Innesco di gas e vapori infiammabili .....	53
3.2 Innesco di nebbie infiammabili .....	54
3.3 Innesco di polveri combustibili .....	55
3.4 Innesco di miscele ibride .....	56
3.5 Sorgenti d'innesco di atmosfere esplosive .....	56
3.6 Sorgenti d'innesco efficaci .....	61
4. La valutazione dei rischi ATEX .....	63
4.1 Valutazione dei fattori P, C e D.....	63
4.2 Calcolo del rischio e barriere di protezione .....	65
5. Foglio di calcolo per la valutazione dei rischi ATEX.....	71
5.1 Struttura e funzionamento .....	71
5.2 Futuri sviluppi .....	77
Conclusioni.....	79
Bibliografia.....	81



## Introduzione

Nel corso degli anni, il fenomeno delle esplosioni ha interessato molti impianti che, per ignoranza o per fatalità, sono stati soggetti a fenomeni distruttivi più o meno gravi, che hanno causato danni sia a beni materiali sia a persone.

Questi fenomeni risultano essere più o meno gravi in base alle metodologie in cui avvengono e, negli ultimi anni, si è provato a studiare ed analizzare il fenomeno sempre più nel dettaglio ma partendo da basi sperimentali consolidate.

Durante la fine degli anni '90 e l'inizio del nuovo millennio le esplosioni a livello industriale sono state numerose ed è nata la necessità di trovare un metodo che riuscisse a valutare la probabilità di avvenimento di questi fenomeni, in maniera più corretta possibile. Le soluzioni provate sono state molteplici, ed essendo appunto una valutazione, ed in quanto tale soggetta a errore, si è cercato di trovare un metodo che riuscisse a considerare più aspetti possibili per una valutazione più veritiera, evitando ridondanze superflue.

Per arrivare a questo scopo si fa affidamento alle norme e guide tecniche, che saranno di seguito elencate, con lo scopo di ottenere risultati fisici, legati ai fenomeni di trasporto, creazione dell'atmosfera esplosiva ed esplosione, che potessero aiutare ad ottenere dei coefficienti utili per la valutazione finale.

Gli aspetti da considerare per valutare il rischio legato alla formazione ed innesco delle atmosfere esplosive sono molteplici. La procedura utilizzata risulta meccanica e mirata a considerare tutti gli aspetti in gioco. Si parte infatti dalla raccolta dei dati generali riguardanti l'ambiente in esame e le sostanze presenti in impianto. Si passa dunque a definire quelle che sono le parti d'impianto che possono generare emissioni di sostanze pericolose, così da poter valutare, con considerazioni ingegneristiche legate alle proprietà chimico-fisiche della sostanza e alle caratteristiche dell'impianto, il tipo e l'estensione della zona pericolosa generata. Quest'ultima sarà anche strettamente legata alle condizioni di ventilazione ed all'arredamento o strutture presenti nell'ambiente (in base all'ambiente preso in esame, che sia questo aperto o chiuso).

Una volta valutata la zona pericolosa, questa non è in grado di reagire se non idoneamente innescata. Dunque, andranno valutate le sorgenti d'innescio efficaci per far avvenire la reazione di combustione.

Valutato quindi la probabilità di formazione dell'atmosfera esplosiva, individuate le possibili fonti d'innescio e stimato il danno che la zona formata può causare, si può fare una valutazione che si pensa essere la più veritiera possibile, onde evitare danni a cose e/o persone anche irreversibili.

La tesi sarà dunque stilata su 5 capitoli.

Nel primo capitolo, dopo un breve parentesi sulle esplosioni accadute nella storia più o meno recente, sono elencati alcuni dei parametri chiave, che saranno utili per comprendere la pericolosità che si cela dietro le sostanze esplosive e i parametri che possono influire sul danno da loro prodotto. Viene inoltre fatta la prima distinzione del fenomeno esplosivo legato a gas, vapori o nebbie infiammabili e quello legato alle polveri combustibili. In tal senso non ci si soffermerà alla sola valutazione di atmosfere esplosive generate per presenza di gas, vapori o nebbie infiammabili, ma si considererà anche il rischio legato alla formazione ed esplosione di atmosfere esplosive generate da polveri combustibili. Infatti molto spesso si ignora il fatto che alcune polveri in determinate condizioni possono diventare potenzialmente esplosive, ma talvolta possono creare danni anche più seri delle esplosioni generate da gas di cui si conosce l'indubbio potere esplosivo.

Il secondo capitolo ci permette di capire quali sono gli step che si devono seguire per una corretta valutazione del rischio. Sono presi in esame i parametri che entreranno in gioco e saranno descritti nel dettaglio. In questa fase si farà uso anche delle norme tecniche e delle guide alle norme che forniscono metodi di calcolo per la valutazione finale. Qualora le norme e le guide non risultino di facile impiego, si farà ricorso a dati ottenuti sperimentalmente con prove standardizzate. Saranno inoltre analizzati i provvedimenti che potrebbero modificare la pericolosità delle sostanze prese in esame.

Il terzo capitolo passa in rassegna le possibili fonti d'innescio che potrebbero presentarsi laddove si forma un'atmosfera potenzialmente esplosiva. Verranno valutate la probabilità che siano presenti e, laddove lo fossero, se ne valuterà la loro efficacia. Infatti non sempre una fonte d'innescio risulta essere efficace seppur presente.

Il quarto capitolo entra nel cuore della valutazione vera e propria. Dopo aver reperito tutti i dati utili, aver determinato le caratteristiche delle zone pericolose che si potrebbero generare e aver analizzato le sorgenti d'innescio e la loro efficacia, si passa al calcolo del rischio. Saranno introdotte le formule usate per la valutazione e i provvedimenti presi per ottenere un rischio accettabile.

L'ultimo capitolo presenta il lavoro di tesi svolto. Si tratta di un foglio di calcolo sviluppato su Excel che permette di fare una valutazione evitando errori di calcolo, considerando i vari aspetti in gioco e fornendo risultati immediati. Si è dunque deciso di utilizzare un'impostazione del file e dell'impaginazione che risulti facile da comprendere ed intuitiva da utilizzare.

Il lavoro di tesi è stato rivolto allo sviluppo di un piccolo programmino in grado di fare una valutazione più sicura. Si riduce il fattore di errore legato ai calcoli e si ottengono file da poter estrapolare per la stesura di una relazione finale da consegnare al committente della valutazione. Il foglio è stato affiancato da un piccolo manuale per l'utilizzatore che spiega i vari step utili per la compilazione dello stesso.

## 1. Generalità e definizioni

In gran parte delle industrie di processo sono presenti sostanze che, per loro natura, sono combustibili o esplodibili. In determinate condizioni esse possono dar luogo ad incendi od esplosioni se innescate.

Sono definite così le atmosfere esplosive: *“una miscela con l’aria, a condizioni atmosferiche, di sostanze infiammabili allo stato di gas, vapori, nebbie o polveri in cui, dopo accensione, la combustione si propaga nell’insieme della miscela incombusta.”* [1].

La necessità di uno strumento unificato per la valutazione dei rischi di atmosfere esplosive nasce nel corso degli anni. Nella Tabella 1.1 sono riportate le statistiche sugli incidenti causati da esplosioni in Italia nei primi anni del XXI secolo.

**Tabella 1.1.** Numero di incidenti per esplosioni in Italia dal 2001 al 2007. [2]

Incidenti da esplosioni Italia							
Anno	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007
Temporanei	88	260	338	446	357	396	387
Permanenti	11	33	49	64	32	33	39
Mortali	6	8	4	10	2	10	2

Maggiore interesse suscitano le esplosioni causate da nubi di polveri, poiché più insolite e talvolta trascurate per la convinta innocuità di queste.

Le prime notizie su esplosioni da polveri riportate in letteratura risalgono al 1785. Nel suo libro, il Conte Carlo Ludovico Morozzo di Bianzè narra di un’esplosione avvenuta in una bottega di un fornaio di Torino, causata da polvere di farina accidentalmente dispersa nell’ambiente e innescata da una lampada appesa al muro [3].

Altri incidenti rilevanti per esplosioni di polveri in Italia si sono manifestati nel corso degli anni causando vittime e ingenti danni. Come riportato da un report dell’ARPA Piemonte, gli incidenti significativi sono stati 3 e tutti hanno fatto registrare morti [4]:

- 12 Giugno 1989 - Esplosione del Molino Alimonti di Guardiafrele (CH) (8 morti)

Esplosione di un silo seguita da una pioggia di detriti.

- 9 gennaio 2001 – Esplosione nella Pettinatura Italiana di Vigliano Biellese (BI) (3 morti)

Grande deflagrazione al piano terra dello stabilimento tessile che ha causato morti, feriti e grossi danni alla struttura. L’evento iniziatore è da attribuirsi probabilmente ad un incendio causato da surriscaldamento di un’apparecchiatura o allo scintillio di un componente, l’incendio si è propagato grazie alla presenza di polverino di natura combustibile.

- 16 luglio 2007 – Esplosione del Molino Cordero di Fossano (CN) (5 morti)

Due esplosioni susseguitesi nell’arco di 15 minuti. La prima causata da una carica elettrostatica residua in una tubazione mancante di messa a terra, durante la fase di scarico della farina da una cisterna; causando 5 morti. A questa seguì l’esplosione della cisterna stessa a causa della farina in sospensione; quest’ultima pur non causando altre vittime ha portato ingenti danni su un ampio raggio.

Oltre a queste 3 ve ne sono ancora un paio che hanno causato feriti più o meno gravi e sono:

- 16 giugno 2000 - Esplosione da polveri metalliche presso la Nicomax di Gravelona Toce (VB);
- 19 gennaio 2001 – Esplosione presso lo stabilimento Finelvo di Ochieppo (BI).

Anche se non è usuale pensare che delle polveri possano bruciare, queste se finemente disperse potrebbero causare esplosioni. Si registrano più di 2000 esplosioni di polveri o miscele gassose con aria in Europa ogni

anno [5]. Da statistiche riportate in U.S.A., Inghilterra e Germania, ogni giorno nel mondo si registra un'esplosione nelle industrie che utilizzano materiale solido finemente disperso [5].

## 1.1 Parametri chiave

Un'esplosione si verifica solo se sono verificate certe condizioni ben definite:

- presenza di un combustibile (vapore, gas, nebbia o polvere);
- presenza di un comburente (solitamente l'ossigeno dell'aria);
- presenza di una fonte d'innesco in grado di far partire la reazione di combustione.

Inoltre, perché si formi un'atmosfera esplosiva devono a sua volta essere verificate specifiche condizioni determinate dai seguenti parametri:

- punto d'infiammabilità;
- limiti di esplosione (LEL, UEL);
- concentrazione limite di ossigeno (LOC).

Per essere efficace la sorgente d'innesco, devono essere soddisfatti i seguenti requisiti:

- energia minima di accensione (MIE);
- temperatura minima di accensione (di un'atmosfera esplosiva o di uno strato di polvere).

Nella Tabella 1.2 sono riportati i limiti di esplosività di alcune sostanze infiammabili e polveri combustibili. Per le polveri si ha solamente il LEL poiché molto raramente possono verificarsi concentrazioni elevate di polveri negli impianti industriali.

La Tabella 1.3 riporta invece l'energia minima di accensione di alcune sostanze infiammabili e polveri combustibili.

**Tabella 1.2.** Limiti di esplosione di alcune sostanze. [5]

Limiti di esplosività in aria					
Nome	CAS	LEL % vol.	UEL % vol.	Nome	LEL g/m <sup>3</sup>
Acido acetico	64-19-7	4	17	Acido acetilsalicidico	60
Alcool propilico	71-23-8	2,1	13,5	Alluminio	60
Benzene	71-43-2	1,3	7,9	Carbone (coke di petrolio)	15
Cicloesano	110-82-7	1,2	8,3	Magnesio (28 µm)	30
Cloruro di metile	74-87-3	7,1	18,5	Polietilene	15
Etilene	74-85-1	2,7	36	Segatura di legno	30
GPL	68476-85-7	2	9	Zolfo	30
Propano	74-98-6	2,1	9,5	Zucchero semolato	60

**Tabella 1.3.** Energia minima di accensione di alcune sostanze. [5]

<b>Energia minima di accensione</b>			
<b>Sostanze infiammabili</b>	<b>MIE (mJ)</b>	<b>Polveri combustibili</b>	<b>MIE (mJ)</b>
Acetone (25°C)	1,15	Carbone (coke di petrolio)	600
Benzene	0,2	Latte in polvere	30
Cicloesano	0,22	Metilcellulosa	10
Etilammina (0°C)	2,4	Polimetil-metacrilato	30
Idrogeno	0,016	Vitamina B1	35
Metano	0,21	Zinco	650

Attraverso l'uso di due grandezze fisiche, si possono esprimere gli effetti di un'esplosione:

La prima è la pressione massima di esplosione  $p_{max}$  espressa in bar. Questa grandezza rappresenta la "pressione massima ottenuta in un recipiente chiuso durante l'esplosione di un'atmosfera esplosiva determinata in condizioni di prova specificate" [5]. La pressione generata da un'esplosione è funzione della concentrazione di combustibile in miscela e il valore massimo lo si trova per concentrazioni prossime a quelle stechiometriche.

Per il calcolo della pressione massima di esplosione possono essere utilizzati metodi empirici, utilizzati per la loro semplicità, prove sperimentali, condotte secondo normativa [6] [7] oppure si può far uso di codici CFD (Computational Fluid Dynamics) tramite utilizzo di computer.

Le formule empiriche seppur di facile utilizzo risultano limitate a ben determinati range di applicabilità e ne consegue una inattendibile estrapolazione dei dati al di fuori di questi limiti. Tutte queste sono dipendenti dagli stessi parametri e si presentano nella forma:

$$P = f(P_v, V, W, K, S_L) \quad (1.1)$$

dove:

- P Sovrappressione generata dall'esplosione ed espressa in mbar;
- $P_v$  Sovrappressione di rottura dell'elemento di sfogo (vent) espressa in mbar;
- V Volume del contenitore in cui avviene l'esplosione espresso in  $m^3$ ;
- W Massa per unità di superficie dell'elemento di sfogo espresso in  $Kg/m^2$ ;
- K Coefficiente di sfogo ed è adimensionale e varia con le sostanze;
- $S_L$  è la velocità laminare di combustione espressa in m/s.

Tra le formule empiriche di maggiore interesse sono quelle riportate nella tabella 1.4 e derivanti da lavori sperimentali [8] [9] [10] [11].

**Tabella 1.4.** Formule empiriche per la determinazione della sovrappressione massima di un'esplosione.

Formula	Range applicativo
$P_1 = S_L(4,3KW + 28) / V^{1/3}$ $P_2 = 58S_L K$ [8] [9] $P_m = P_1 + P_2$	$1 < L_{\max} / L_{\min} < 3$ $K < 5$ $W < 24[\text{Kg} / \text{m}^2]$
$P_m = P_v + S_L^2(23KW / V^{1/3})$ [9] [10]	$1 < L_{\max} / L_{\min} < 3$ $K < 4$ $2,4 < W < 24[\text{Kg} / \text{m}^2]$ $P_v < 490[\text{mbar}]$
$P_m = 1,5P_v + 77,7S_L K$ [11]	$1 < L_{\max} / L_{\min} < 3$ $K < 5$ $W < 24[\text{Kg} / \text{m}^2]$ $P_v < 70[\text{mbar}]$
$P_m = 1,5P_v + S_L[(4,3KW + 28)V^{1/3}] + 77,7S_L K$ [9]	$1 < L_{\max} / L_{\min} < 3$ $K < 5$ $W < 24[\text{Kg} / \text{m}^2]$ $P_v < 70[\text{mbar}]$

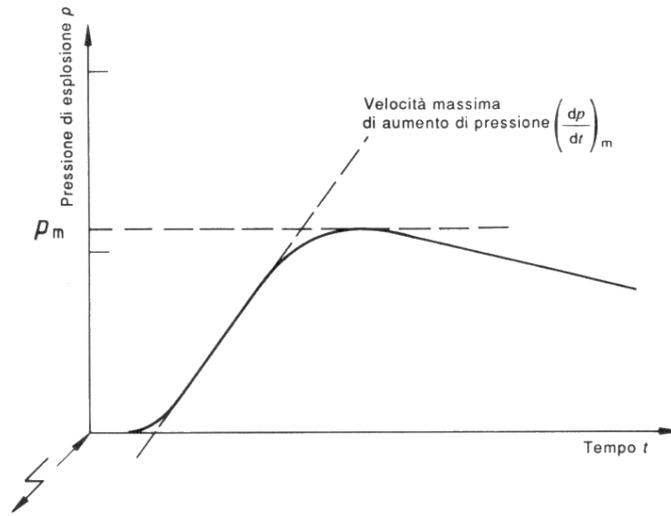
Nella tabella 1.5 sono riportati alcuni esempi di danni provocati da detonazioni, in funzione della pressione di picco.

**Tabella 1.5.** Danni causati dalla pressione di picco in caso di detonazione [5]

Picco di pressione (KPa)	Danno
0,7 ÷ 1	Rottura del 5% dei vetri
0,7 ÷ 4	Lancio a distanza di missili
3 ÷ 6	Rottura del 90% dei vetri
3 ÷ 10	Danni leggeri alle strutture
7	Lesioni irreversibili alle persone
14	Inizio letalità
20 ÷ 30	Cedimento serbatoi per liquidi
35	Rottura dei timpani
60	Elevata letalità

L'altra grandezza fisica è la velocità massima di aumento della pressione  $(dP/dt)_{\max}$  espressa in bar/s. Cioè il "valore massimo di aumento di pressione per unità di tempo, durante le esplosioni che avvengono nel campo di esplosività di una sostanza infiammabile/combustibile, in un recipiente chiuso e in condizioni di prova specificate" [5].

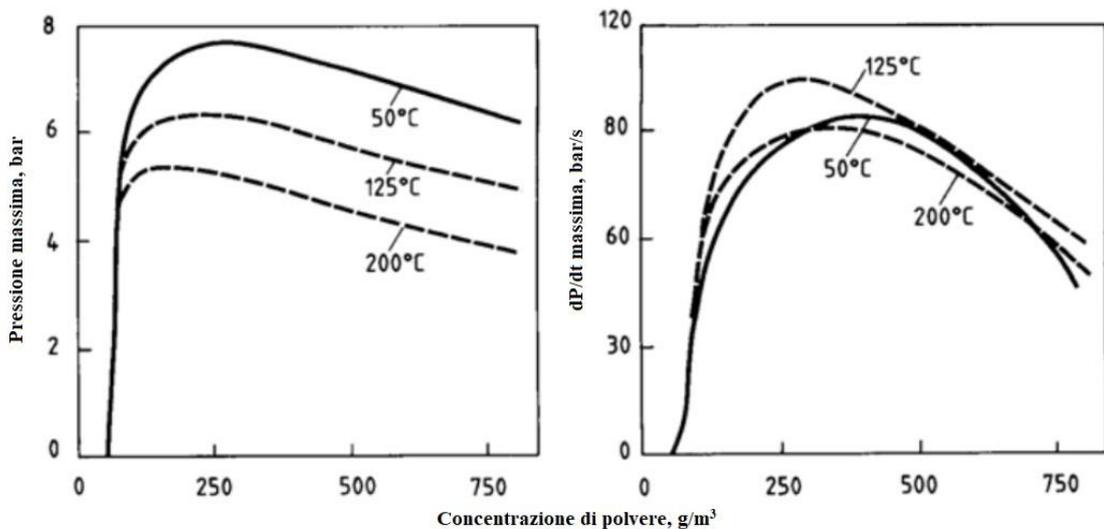
Studiando un grafico pressione/tempo possiamo definire la velocità massima di aumento della pressione come la derivata della pressione rispetto al tempo nel punto con massima pendenza, facile da notare nella figura 1.1 ricavata con prove sperimentali [5].



**Figura 1.1.** Curva caratteristica pressione/tempo, ricavata tramite prove sperimentali.

Come per la pressione massima suddetta, anche la velocità massima di aumento della pressione varia al variare della concentrazione della miscela esplosiva.

Inoltre, entrambe le grandezze precedentemente citate sono dipendenti anche dalla temperatura. La loro dipendenza da concentrazione della miscela e temperatura si possono apprezzare nella figura 1.2.



**Figura 1.2.** Influenza della temperatura iniziale della nube di polvere e della concentrazione di polvere sulla pressione massima e sulla velocità massima di aumento della pressione.

Come per la pressione massima di esplosione, anche la velocità massima di esplosione si ricava tramite prove sperimentali. Le condizioni di prova sono riportate nelle norme tecniche [12] [13] [14].

La velocità di pressione massima è legata ad un indice secondo una legge cubica.

$$K = \left( \frac{dP}{dt} \right)_{\max} \cdot V^{\frac{1}{3}} \tag{1.2}$$

K è una costante caratteristica dell'esplosione ( $K_G$  per i gas e  $K_{St}$  per le polveri) ed è anche detta indice di esplosione, ed espressa in bar·m/s. Nella tabella 1.4 sono indicati i valori di K per alcune sostanze.

Tabella 1.4. Valori di K per alcune sostanze. [5]

Indice di esplosione			
Sostanza	$K_G$ (bar·m/s)	Sostanza	$K_{St}$ (bar·m/s)
Acetilene	1415	Bronzo	31
Ammoniaca	10	Acetato di polivinile	86
Etanolo	78	Resine fenoliche	129
Etilbenzene	96	Polistirolo	12
Idrogeno	550	Cellulosa	66
Metanolo	75	Farina di frumento	87
Propano	100	Grano	112
Toluene	94	Acido tereftalico	260

È facile intuire che prove diverse, ripetute a concentrazioni differenti, forniscono coppie di valori di pressione massima e di massima velocità di aumento della pressione come è possibile notare in figura 1.2. Questo comportamento si ripercuote quindi anche sull'indice di esplosione K.

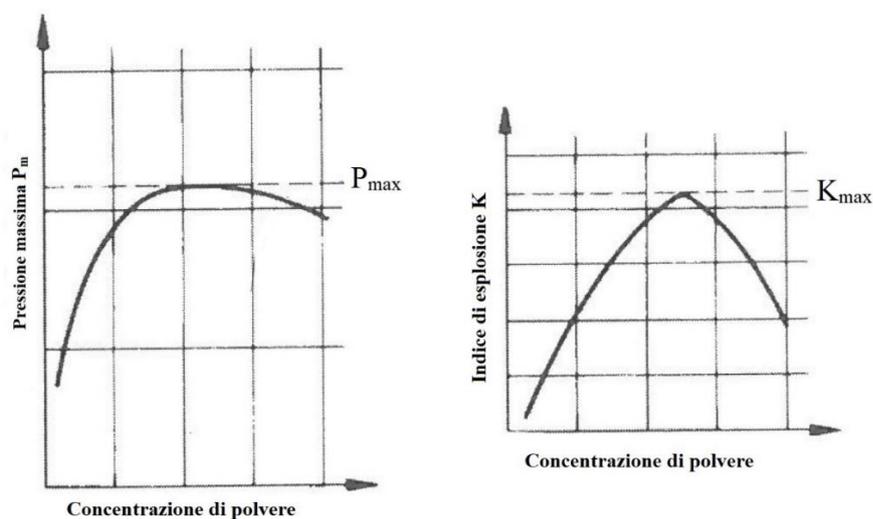


Figura 1.2. Variazione della pressione massima e dell'indice di esplosione in funzione della concentrazione di polvere

## 1.2 Gas, vapori o nebbie infiammabili

Nell'industria chimica le esplosioni possono avvenire per la manipolazione, lavorazione e stoccaggio di gas, liquidi o vapori infiammabili.

Perché avvenga un'esplosione da gas, vapori o nebbie devono essere verificate tutte le seguenti condizioni:

- 1) deve essere presente una sostanza infiammabile;
- 2) la sostanza ha un giusto grado di dispersione;
- 3) se allo stato liquido o solido che sublima, la sostanza deve trovarsi ad una temperatura maggiore della temperatura d'infiammabilità;
- 4) la concentrazione del gas, vapore o nebbia deve rientrare nell'intervallo di esplosività;
- 5) l'atmosfera entro la quale è miscelato il gas o vapore deve contenere la quantità d'ossigeno necessaria per sostenere la combustione;

6) è presente una fonte di energia sufficiente per innescare l'atmosfera esplosiva.

Così come riportato nella norma [15].

Se manca una delle condizioni da 1) a 5) non si ha la formazione di un'atmosfera esplosiva. Se sono verificate le condizioni di cui sopra, ma non è soddisfatta la condizione 6), non avviene l'esplosione pur essendo in presenza di un'atmosfera esplosiva [15].

Risulta facilmente intuibile che i parametri chiave, per la formazione e la reazione di un'atmosfera esplosiva, saranno:

- temperatura d'infiammabilità;
- limiti di esplosività;
- temperatura di accensione.

Tutti e tre i parametri assumono significato solo se riferiti a metodi di prova normalizzati (ad esempio ASTM o IEC) [5].

## *1.3 Polveri combustibili*

### 1.3.1 Nubi di polvere

Talvolta viene sottovalutato il pericolo di esplosione legato ad una polvere. Tuttavia un'esplosione generata da una nube di polvere potrebbe risultare più gravosa di una generata da un'atmosfera esplosiva di gas o vapori.

Nell'industria chimica le esplosioni di questo tipo possono derivare da polveri di plastiche, vernici, prodotti farmaceutici, ecc., ma non vanno trascurate anche le polveri presenti negli impianti alimentari come farine, polveri di grano, amido, zuccheri, ecc..

Come per le esplosioni di gas o vapori, il verificarsi di un'esplosione da polveri è strettamente legata a delle condizioni ben precise e simultaneamente presenti:

- 1) la polvere deve essere combustibile;
- 2) la polvere deve essere dispersa in aria con modalità tali da formare una nube esplosiva;
- 3) la granulometria della polvere deve essere tale da riuscire a propagare la fiamma;
- 4) la concentrazione della nube deve rientrare nei limiti di esplosività;
- 5) l'atmosfera entro la quale è dispersa la polvere contiene la quantità d'ossigeno necessaria per sostenere la combustione;
- 6) è presente una fonte di energia sufficiente per innescare l'atmosfera esplosiva.

Così come riportato nella norma [16].

Se una delle condizioni da 1) a 5) non è verificata, non si ha la presenza di un'atmosfera esplosiva pericolosa. Se non è verificata la condizione 6), pur essendo verificate le precedenti 5, l'esplosione non può avvenire [16].

Contrariamente dalle atmosfere di gas e vapori, una nube di polvere è caratterizzata attraverso parametri differenti. Oltre alla polvere, deve essere caratterizzato anche l'ambiente in cui si trova dispersa questa.

Diventano cruciali i seguenti parametri [5]:

- caratterizzazione chimico-fisica della polvere;
- caratterizzazione del comburente;
- concentrazione della polvere nella nube;
- grado di turbolenza dell'atmosfera esplosiva;
- condizioni ambientali (pressione, temperatura e grado d'umidità) in cui si manifesta l'atmosfera esplosiva;
- tipo, energia e posizione della fonte d'innescio;

- forma del volume nel quale avviene l'esplosione.

Quest'ultima nota determina la violenza dell'esplosione.

### 1.3.2 Strati di polvere

La presenza di superfici orizzontali o piani leggermente inclinati, nonché spigoli e angoli, facilitano la formazione di depositi di polvere con creazione di strati. Lo strato può incendiarsi ma non esplodere, ma se la polvere dello strato viene dispersa casualmente in aria, si può avere la formazione di un'atmosfera esplosiva e dunque un'esplosione.

In questo caso gli strati di polvere possono essere resi innocui se mantenuti a spessori trascurabili o se sono rispettate le temperature minime di accensione. In questo caso si avranno due differenti temperature di accensione:  $T_{cl}$  relativa alla nube (in inglese "cloud") e  $T_l$  relativa allo strato (in inglese "layer") [5].

Queste ultime sono calcolate secondo la norma [17] e si differenziano per spessore:

- strati di polvere fino a 5 mm;
- strati di polvere oltre i 5 mm e fino a 50 mm;
- strati di polvere oltre i 50 mm.

## 2. Classificazione dei luoghi

Come prevede l'articolo 293 del D.Lgs 81/08 il datore di lavoro è obbligato a ripartire in zone le aree in cui possono formarsi atmosfere esplosive. In questa fase bisogna fare una distinzione tra zone pericolose generate da gas, vapori o nebbie esplosive, dalle zone generate da polveri combustibili. Infatti, sebbene la prima parte della classificazione è comune, la seconda parte di questa risulta essere differente a causa del comportamento non analogo delle due classi in esame.

Per questo saranno utilizzati due norme differenti per nubi, vapori o nebbie esplosive (CEI 31-87) e per polveri esplosive (CEI 31-88).

Questo lavoro richiede l'impegno di più persone specializzate in diversi campi, dal progettista elettrico (che spesso è anche il coordinatore) a persone che sono a conoscenza delle proprietà delle sostanze infiammabili, del processo e delle apparecchiature presenti.

La classificazione risulta quindi essere la determinazione della probabilità di formazione di un'atmosfera esplosiva e l'estensione di quest'ultima.

### 2.1 Classificazione dei luoghi per presenza di gas, vapori o nebbie esplosive

#### 2.1.1 Obiettivi e fattori della classificazione

L'allegato XLIX del D.Lgs. 81/08 recita: *“Un'area in cui può formarsi un'atmosfera esplosiva in quantità tali da richiedere particolari provvedimenti di protezione per tutelare la sicurezza e la salute dei lavoratori interessati è considerata area esposta a rischio esplosione ai sensi del Titolo XI. Le aree a rischio esplosione sono ripartite in zone in base alla frequenza e alla durata della presenza di atmosfere esplosive. I provvedimenti da adottare in conformità dell'allegato L, parte A, è determinato da tale classificazione”* [1].

Obiettivi della classificazione sono dunque l'analisi degli ambienti soggetti a rischio esplosione, l'individuazione dei componenti di processo che concorrono ad aumentare il rischio esplosione, ed infine la formulazione dell'analisi del rischio.

Primo step della classificazione è quello di reperire i parametri necessari per la classificazione, sia individuandoli sia calcolandoli quando necessario. I dati vanno reperiti prima dell'inizio della valutazione per il corretto proseguire del lavoro.

Il luogo è da considerarsi pericoloso quando le quantità di sostanza sono tali da generare atmosfere esplosive di estensione non trascurabile. Per questo passaggio vanno dunque definite le zone per ciascuna delle sorgenti di emissione e il grado di emissione di queste, di cui si discuterà in seguito. A questo punto il tipo di zona generata (0, 1 o 2) dipende da: grado di emissione, tipo e grado di ventilazione e dalla disponibilità di quest'ultima e sta ad indicare la probabilità che sia presente l'atmosfera esplosiva.

Sulla classificazione inoltre incide il tipo di ambiente in cui si trova la sorgente di emissione, in particolare sono considerati due tipi di ambiente: aperto o chiuso.

Una volta valutato il tipo di zona bisogna definirne l'estensione, a tal proposito sono utili i seguenti parametri: portata di emissione; ventilazione; LEL; densità relativa di gas e vapori rispetto all'aria. La guida CEI 31-35 propone una soluzione al problema avvalendosi di due parametri che verranno calcolati e che sono: il volume ipotetico di atmosfera esplosiva ( $V_z$ ) e la distanza pericolosa ( $d_z$ ) di cui sarà discusso in seguito.

### 2.2 Procedimento per la classificazione dei luoghi pericolosi per presenza di gas, vapori o nebbie infiammabili

Questa fase si divide in due step come precedentemente menzionato:

- determinazione del tipo di zona;

- definizione della sua estensione.

Questi due step sono a loro volta rappresentativi di una sequenza di step che nel dettaglio sono i seguenti [5]:

per il luogo in esame

1. raccolta dei dati generali di progetto e verifica di applicabilità della norma;
2. individuazione degli ambienti e delle relative condizioni ambientali;
3. identificazione delle sostanze infiammabili e le loro caratteristiche;

per ogni ambiente

4. individuazione delle sorgenti di emissione;

per ciascuna sorgente di emissione

5. determinazione della possibilità di fuoriuscita di sostanza infiammabile (grado di emissione);
6. determinazione delle sorgenti rappresentative di altre;
7. analisi dell'influenza delle varie emissioni sulla classificazione del luogo;
8. verifica del tipo e l'efficacia della ventilazione;

per ciascun grado delle singole sorgenti di emissione o di quelle rappresentative

9. determinazione della portata di emissione in condizioni cautelative;
10. definizione del tipo di zona generata;
11. determinazione della distanza pericolosa ( $d_z$ ) e delle quote "a" e "b";
12. determinazione di forma ed estensione delle zone pericolose;

per l'ambiente in esame

13. involuppo delle zone pericolose;
14. individuazione delle aperture in relazione alle zone pericolose.

I vari step saranno di seguito analizzati nel dettaglio.

### 2.2.1 Dati generali di progetto

Prima di iniziare l'attività di valutazione del rischio devono essere raccolti i dati di progetto necessari per la stessa. Questi devono essere forniti dal committente o dai suoi collaboratori. I dati generali di progetto sono:

- dati del committente (sede legale, recapiti telefonici e di posta elettronica, ecc.);
- ubicazione dell'opera;
- scopo della valutazione;
- descrizione dell'opera oggetto della classificazione, così da consentire l'identificazione per il pericolo esplosione;
- vincoli posti dal committente o da enti (vincoli progettuali o imposti ad esempio dai pompieri);
- schemi di processo o planimetrie.

Prima verifica da effettuare è accertarsi che il caso oggetto della classificazione rientri nel campo di applicazione della norma CEI 31-87 [18] e CEI 31-35 [15]. Se non rientra nel campo applicativo non vorrà dire che il luogo in esame non presenti pericolo di esplosione, ma che non potranno essere utilizzate le suddette norme per una corretta valutazione.

### 2.2.2 Individuazione degli ambienti e delle relative condizioni ambientali

Definendo il luogo pericoloso "*lo spazio in cui è o può essere presente un'atmosfera esplosiva per la presenza di gas, vapori o nebbie*" [5], l'ambiente sarà una parte o tutto il luogo, purché siano presenti condizioni di ventilazione univocamente definibili.

Per ogni ambiente devono essere definiti alcuni parametri che saranno utili per la valutazione, come ad esempio pressione atmosferica, temperatura massima, altitudine sul livello del mare, ecc..

Possiamo suddividere gli ambienti in due macro gruppi: ambienti aperti e ambienti chiusi.

Gli ambienti aperti sono quelli all'esterno di edifici di qualsiasi natura, dove non sono presenti ostacoli al movimento dell'aria per la diluizione di gas, vapori o nebbie. Contrariamente gli ambienti chiusi sono quelli all'interno di edifici di qualsiasi natura, dove sono presenti ostacoli al naturale movimento dell'aria per la diluizione di gas, vapori o nebbie.

### 2.2.3 Identificazione delle sostanze infiammabili e delle loro caratteristiche

Una sostanza infiammabile, per essere tale, deve essere in grado di formare, con l'aria ambiente, una quantità significativa di atmosfera esplosiva. La guida alle norme CEI 31-35 dà indicazioni riguardo al volume di atmosfera esplosiva che può essere considerato non trascurabile, ed in particolare fissa delle condizioni sul volume esplosivo  $V_{ex}$ , definito come volume ipotetico di atmosfera esplosiva a meno del coefficiente di sicurezza  $k$ . Le condizioni imposte dalla guida sono differenti per ambienti aperti ed ambienti chiusi e sono riportati in seguito.

In ambienti aperti il volume  $V_Z$  può essere considerato trascurabile se il corrispondente volume  $V_{ex}$  soddisfa le seguenti condizioni:

- zona 0:  $V_{ex} < 1 \text{ dm}^3$ ;
- zona 1:  $V_{ex} < 10 \text{ dm}^3$ ;
- zona 2:  $V_{ex} < (100 \cdot k) \text{ dm}^3$  o  $V_Z < 100 \text{ dm}^3$ .

In ambienti chiusi il volume  $V_Z$  può essere considerato trascurabile se il corrispondente volume  $V_{ex}$  soddisfa le seguenti condizioni:

- zona 0:  $V_{ex} < 1 \text{ dm}^3$ ;
- zona 1:  $V_{ex} < 10 \text{ dm}^3$ ;
- zona 2:  $V_{ex} < 10 \text{ dm}^3$ .

Inoltre, per tutte le zone in esame, deve essere soddisfatta la condizione  $V_{ex} < 1/10000 \cdot V_a$ , dove  $V_a$  è il volume dell'ambiente in esame.

Una sostanza è infiammabile se miscelata con aria, in determinate proporzioni, è in grado di produrre una reazione esotermica se innescata da una fonte di energia. Per capire se la sostanza generi un'atmosfera esplosiva, bisogna conoscere alcune caratteristiche chiave. Discorso a parte va fatto per le nebbie che, non essendo una dispersione omogenea, hanno un comportamento particolare e differiscono sia da gas e vapori sia dalle polveri.

La norma CEI 31-87 presenta un allegato che tratta in maniera dettagliata le nebbie esplosive. Queste possono formarsi soprattutto in due modi:

- nebbie di tipo fisico, che si creano per condensazione di vapori in aria satura a causa del raffreddamento al di sotto del punto di rugiada della sostanza in esame (diametro medio delle gocce minore ai 10 mm);
- nebbie di tipo meccanico, che si creano per atomizzazione meccanica attraverso un foro o un ugello e che presentano dimensioni maggiori rispetto alle precedenti (diametro medio delle gocce maggiore ai 100 mm).

A loro volta le sospensioni di gocce sono soggette a fenomeni dinamici che tendono a far variare le dimensioni delle stesse, due sono in particolare i fenomeni di maggiore interesse. Il primo è la coalescenza delle gocce che, urtando tra loro, tenderanno ad aumentare la loro dimensione a causa della tensione superficiale. Il secondo invece è l'urto contro pareti solide che causa un duplice effetto. Infatti le gocce che urtano possono essere disperse in gocce di dimensioni maggiori causando un'ulteriore atomizzazione, oppure possono essere inglobate alla fase liquida aderente alla parete causando una rimozione di sostanza esplosiva dalla sospensione. I fenomeni descritti sopra inducono ad una difficile misura di concentrazione e dimensione media delle particelle liquide disperse nonché ad un differente metodo di analisi.

Questi fenomeni sono la chiave che fa sì che sospensioni di liquidi (nebbie) e polveri hanno due comportamenti differenti tra loro e vanno trattati in maniera diversa.

Da studi sperimentali sulle sospensioni liquide sono emerse delle relazioni tra le proprietà del liquido e le condizioni di processo con le dimensioni medie delle particelle sospese [19].

Si è visto che aumentando il diametro dell'orifizio le dimensioni delle particelle diminuiscono, mentre diminuendo la pressione, che influisce sulla velocità di uscita del liquido attraverso il foro, aumentano le dimensioni delle particelle, influenzando l'atomizzazione delle particelle. Inoltre, a temperature più alte, che implicano densità, viscosità e tensione superficiale minori, il diametro medio delle particelle si riduce.

Da tutto ciò si deduce che in determinate condizioni, e grazie al maggior contenuto energetico in fase liquida, le esplosioni di sospensioni liquide possono risultare più violente rispetto alle esplosioni generate da miscele di gas o vapori.

Dunque, si può dedurre che la creazione di nebbie infiammabili si ha solo per pressioni elevate [5] (pressioni relative superiori a 0,7 bar) e a temperature prossime a quella d'infiammabilità del liquido. Se ci si trova in condizioni operative ben distanti dalle suddette, allora si può escludere la formazione di nebbie esplosive.

L'estensione delle zone pericolose generate da nebbie esplosive adotta lo stesso criterio di valutazione utilizzato per le atmosfere esplosive generate da gas e vapori, talvolta però possono essere usati anche altri metodi più validi, purché supportati da validi riferimenti.

Viste le proprietà delle nebbie, le proprietà significative di gas, vapori e nebbie saranno le seguenti:

- Temperatura d'infiammabilità,  $T_i$

Definita come la più bassa temperatura alla quale un liquido, in condizioni normalizzate, emette una quantità di vapori sufficiente a formare una miscela esplosiva con aria. Se la  $T_i$  è maggiore della temperatura alla quale si trova la sostanza, allora quest'ultima non presenta pericolo di formazione di atmosfere esplosive.

Se si parla di miscele di gas o vapori esplosivi, la temperatura d'infiammabilità della miscela talvolta risulta essere minore della temperatura d'infiammabilità delle singole sostanze in miscela. Questo è dovuto alla formazione di azeotropi che potrebbero avere una tensione di vapore maggiore rispetto ai singoli componenti, e quindi una temperatura d'infiammabilità minore.

- Densità relativa dei gas e vapori rispetto all'aria,  $\rho_{gas}$

Definita come la densità di un vapore o gas relativa a quella dell'aria alle stesse condizioni di temperatura e pressione. La norma CEI 31-87 stabilisce che gas o vapori con densità relativa minore a 0,8 sono considerati gas leggeri, mentre se la densità risulta maggiore a 1,2 sono considerati gas pesanti. Sostanze con densità relativa compresa tra 0,8 e 1,2 sono gas intermedi e possono comportarsi come gas leggeri o pesanti in base alle condizioni di emissione e alle condizioni ambientali.

La densità relativa è facilmente ricavabile e la si ottiene con la formula seguente:

$$\rho_{gas} (Kg / m^3) = \frac{Pa \cdot M}{R \cdot T} \quad (2.1)$$

dove:

- Pa Pressione atmosferica dell'ambiente espressa in Pa
- M Massa molare della sostanza espressa in Kg/Kmol
- R Costante universale dei gas espressa in J/(Kmol·K)
- T Temperatura assoluta espressa in K

La densità relativa risulta molto importante per definire forma ed estensione della zona pericolosa.

- Densità del liquido,  $\rho_{liq}$

Massa del liquido per unità di volume espressa in Kg/m<sup>3</sup>.

- Massa molare, M

Definita come la quantità di massa di una mole (o chilomole) di sostanza, espressa in grammi (o chilogrammi).

- Limiti di esplosività in aria, LEL e UEL

Rappresentano le concentrazioni minima e massima della sostanza in miscela con aria, al di sotto (LEL) e al di sopra (UEL) le quali la miscela, anche se innescata, non è esplosiva.

Dei due risulta più importante il LEL per la determinazione delle zone pericolose.

Questi limiti possono essere espressi come percentuale volumetrica in miscela ( $LEL_V$  e  $UEL_V$ ) o in  $Kg/m^3$  di sostanza presente in miscela ( $LEL_m$  e  $UEL_m$ ). La conversione è facilmente ottenibile in condizioni atmosferiche ordinarie usando una delle seguenti formule:

$$LEL_m (Kg / m^3) = 0,416 \cdot 10^{-3} \cdot M \cdot LEL_V \cdot \frac{Pa}{101325} \quad (2.2)$$

$$LEL_m (Kg / m^3) = \frac{LEL_V}{100} \cdot \rho_{gas} \quad (2.3)$$

Mentre per calcolare i limiti di esplosività di miscele di due o più sostanze diverse si può ricorrere al criterio di additività di Le Chatelier:

$$LEL_{Vmix} = \frac{1}{\sum_{i=1}^n \left( \frac{y_i}{LEL_V} \right)} \quad (2.4)$$

Tale criterio però è da utilizzare con prudenza per miscele di liquidi in equilibrio con i propri vapori, infatti le proporzioni di liquidi e di vapori risultano essere differenti al variare della temperatura.

Nei casi in cui l'UEL si spinge oltre il 100% allora ci troviamo in presenza di sostanze instabili, essere tendono a decomporsi con esplosione anche in assenza di ossigeno.

- Temperatura di ebollizione,  $T_b$

Temperatura alla quale il liquido presenta una tensione di vapore uguale alla pressione atmosferica.

- Tensione di vapore,  $P_v$

Rappresenta la pressione esercitata da un vapore saturo in equilibrio con il suo liquido. È un indice della volatilità di una sostanza quindi della sua tendenza a passare alla fase vapore.

- Temperatura di accensione,  $T_{acc}$

Detta anche temperatura di autoaccensione, rappresenta alla minima temperatura di una superficie calda alla quale, in determinate condizioni, avviene l'accensione di una miscela aria gas o vapore infiammabile.

Per una miscela determinare la temperatura di accensione non risulta semplice e in assenza di dati si può considerare l'80% della temperatura di accensione più bassa tra i componenti in miscela, escludendo le sostanze presenti in quantità minori al 5% in volume.

Avendo dato questa definizione, si può facilmente intuire che, le apparecchiature presenti in un processo non devono avere una temperatura superficiale maggiore alla temperatura di accensione delle sostanze presenti. In tal senso, tutti i prodotti con certificazione (Ex) si contraddistinguono con la classe di temperatura. Si suddividono dunque in classi che vanno da T1 a T6 e ad ogni classe è assegnata una temperatura superficiale, le temperature vanno da 450 °C per la classe T1 fino a 85 °C per la classe T6.

- Temperatura di emissione,  $T_0$

Rappresenta la temperatura del sistema di contenimento della sostanza, nel punto di emissione. Nel caso in cui la sorgente di emissione risulta essere una pozza di liquido infiammabile allora sarà la temperatura del liquido stesso. La temperatura di emissione è espressa in K.

- Pressione di emissione,  $P_0$

Rappresenta la pressione assoluta all'interno del sistema di contenimento della sostanza, nel punto della sua emissione. Viene espressa in Pa.

#### 2.2.4 Individuazione delle sorgenti di emissione e del loro grado

Viene definita sorgente di emissione (SE) un punto o parte d'impianto da cui può essere emessa una sostanza infiammabile in atmosfera, in modo tale da generare un'atmosfera esplosiva.

La norma CEI 31-87 stabilisce dei gradi fondamentali di emissione basati sulla probabilità che sia presente un'emissione dalla sorgente in esame, questi sono:

- grado continuo: emissione continua che può avvenire frequentemente o per lunghi periodi;

- grado primo: emissione che può avvenire periodicamente durante il funzionamento normale;
- grado secondo: emissione che non è prevista durante il normale funzionamento e, se avviene, con frequenza bassa e per brevi periodi.

Le emissioni di grado primo e continuo sono emissioni che sono di solito previste durante il normale funzionamento, dunque risulta definibile la loro durata e la frequenza di emissione. Stesso discorso non può essere fatto per le emissioni di grado secondo in quanto non sono previste durante il normale funzionamento, e per definirne durata e frequenza si fa spesso riferimento alle modalità di esercizio e manutenzione dei sistemi di contenimento.

Tra le emissioni di grado continuo vanno anche considerate le emissioni strutturali, queste sono le emissioni non volute e che si hanno in punti di discontinuità come ad esempio flange su tubazioni, giunzioni, ecc.. queste emissioni possono risultare trascurabili, soprattutto se presenti in ambienti aperti, mentre potrebbero risultare significative in ambienti chiusi, ed anche per loro, come per tutte le sorgenti di emissione, va definita la portata di emissione ( $Q_g$ ).

Tra le sorgenti di emissione vanno anche incluse quelle parti di impianto che, pur essendo chiuse, possono essere aperte; inoltre vanno anche considerate le aperture tra luoghi diversi di cui sarà discusso in seguito.

### 2.2.5 Determinazione delle sorgenti rappresentative di altre

Per la classificazione si può ritenere una sorgente di emissione rappresentativa di altre, se questa rappresenta il caso peggiore per:

- caratteristiche della sostanza emessa;
- modalità e portata di emissione;
- caratteristiche della ventilazione intorno alla sorgente di emissione.

Usare la rappresentatività riduce a pochi casi le sorgenti in esame, minimizzando i tempi per i calcoli, e risulta utile se si devono esaminare molte sorgenti di emissione. Talvolta però possono sorgere delle incertezze che escludono la possibilità di ridurre il numero di sorgenti di emissione da esaminare.

Una volta individuate tutte le sorgenti di emissione si verifica se è possibile eliminarne qualcuna, spostarle in luoghi con ventilazione migliore e lontane da sorgenti d'innescò, oppure declassarne il grado di emissione.

### 2.2.6 Influenza della contemporaneità delle emissioni

Per definire il grado di ventilazione e per la classificazione dei luoghi, bisogna considerare la contemporaneità di tutte le emissioni in relazione al loro grado di emissione. Per ambienti aperti la contemporaneità è solitamente trascurabile, mentre per ambienti chiusi bisogna considerare la contemporaneità delle emissioni relativa alla stessa sostanza infiammabile o a quella rappresentativa.

In tal senso la guida CEI 31-35 definisce alcune regole generali per la considerazione della contemporaneità delle emissioni in relazione al grado di emissione. A seguire sono riportati i criteri generali presenti nella suddetta guida:

- emissioni continue: per definire il grado di ventilazione, si considerano le emissioni tutte contemporanee tra loro;
- emissioni di primo grado: per definire il grado di ventilazione, si considerano tutte le emissioni continue, più quelle di primo grado che possono essere contemporanee. Nel caso in cui risulta impossibile definire la contemporaneità delle emissioni di primo grado si fa riferimento alle linee guida proposte dalla norma e riportate in tabella 2.1;
- emissioni di grado secondo: per definire il grado di ventilazione, si considerano tutte le emissioni continue, più quelle di primo grado che possono essere contemporanee, più ciascuna emissione di secondo grado presa singolarmente.

**Tabella 2.1.** Emissioni di primo grado considerabili contemporanee [5]

Numero totale di emissioni di primo grado	Numero di emissioni di primo grado considerabili contemporanee
1	1
2	2
3 a 5	3
6 a 9	4
10 a 13	5
14 a 18	6
19 a 23	7
24 a 27	8
28 a 33	9
34 a 39	10
40 a 45	11
46 a 51	12
> 51	12 + 20% (n - 51)*

"n" è il numero totale di emissioni di primo grado

### 2.2.7 Verifica di tipo e l'efficacia della ventilazione

Viene definita ventilazione il movimento dell'aria che genera il ricambio dell'atmosfera con aria fresca dovuta all'effetto del vento, gradienti di temperatura o per mezzo di strumenti artificiali.

Si distinguono due tipi di ventilazione:

- ventilazione naturale;
- ventilazione artificiale.

La ventilazione naturale è quella attribuibile al movimento dell'aria causato dal vento e/o da gradienti di temperatura.

Valutare la ventilazione in ambienti aperti si basa su una velocità del vento minima pari a 0,5 m/s (valore conservativo in quanto di solito la velocità del vento si aggira attorno a 2 m/s). però in prossimità del suolo, per altezze comprese entro i 3 m di altezza dal suolo, è consigliabile assumere una velocità del vento pari a 0,25 m/s. La ventilazione naturale risulta efficace in ambienti chiusi solo se sono presenti aperture fisse e sono posizionate lungo la direzione di maggiore provenienza del vento. In questi casi, l'effetto della ventilazione esterna può essere apprezzata fino a 10 m dall'apertura di ingresso dell'aria. Se invece sono presenti schermature o protezioni, l'effetto della ventilazione esterna è apprezzabile fino a 3 m dall'apertura con velocità di  $0,05 \div 0,15$  m/s. In qualsiasi struttura industriale inoltre, anche se non sono presenti aperture fisse, si ha un ricambio di aria dovuto ad infiltrazioni naturali. In seguito, saranno discusse le modalità per il calcolo della portata per infiltrazioni naturali.

La ventilazione naturale per effetto camino si ha in ambienti chiusi che presentano una differenza di temperatura tra interno ed esterno di almeno 2 o 3 K.

La ventilazione artificiale è quella in cui il movimento dell'aria è dovuto all'utilizzo di strumenti artificiali come ventilatori od estrattori. Essa può essere di due tipi:

- generale: quando applicata all'intero ambiente chiuso;
- locale: quando applicata a singole sorgenti di emissione o a gruppi compatti di questi, ed è utilizzata principalmente per emissioni di grado continuo e primo.

La ventilazione artificiale generale, per il benessere del personale, deve produrre una velocità dell'aria a valori idonei stabiliti dalle norme. Sarà imposta una velocità massima del vento che va da 0,1 m/s a 15 °C fino a 0,3 m/s a 25 °C.

L'utilizzo della ventilazione artificiale permette di ottenere diversi risultati, tra cui: riduzione dell'estensione delle zone pericolose, riduzione del tempo di permanenza dell'atmosfera esplosiva e prevenzione della formazione dell'atmosfera esplosiva.

Un sistema di ventilazione artificiale inoltre risulta essere idoneo se:

- la sua portata è controllata e sorvegliata;
- viene considerata la classificazione all'interno e all'esterno del sistema di estrazione;
- l'aria utilizzata per la ventilazione è aspirata da un luogo che non presenta pericolo di formazione di atmosfere esplosive;
- dimensionamento e collocazione delle bocchette è fatto considerando qualità, grado, portata e ubicazione della sorgente di emissione;
- sono considerati gli ostacoli al moto dell'aria;
- le bocche di aspirazione e mandata sono posizionate relativamente alla densità relativa dei gas ed alle fluttuazioni di temperatura eventuali.

La portata d'aria ( $Q_a$ ) e le altre caratteristiche della ventilazione artificiale locale, devono essere dimensionate in modo tale da ridurre l'estensione del volume di atmosfera esplosiva pericolosa ad estensioni trascurabili, quindi comprese tra la sorgente di emissione e la bocca di aspirazione. Infine, per considerare l'efficacia della ventilazione artificiale deve essere considerata anche la sua disponibilità, ed essendo dimensionata ad hoc, sono ammessi solo disponibilità buona e adeguata, di cui sarà discusso in seguito.

### 2.2.8 Determinazione della portata di emissione

Si definisce la portata di emissione la quantità di gas, vapore o nebbia infiammabile che viene emessa dalla sorgente di emissione nell'unità di tempo. La norma CEI 31-87 contiene un capitolo contenente una serie di equazioni termodinamiche utili per il calcolo della portata di emissione di liquidi e gas.

La portata di emissione sarà funzione di:

- area del foro di emissione o della superficie della pozza;
- geometria della sorgente di emissione;
- velocità di emissione.
- concentrazione;
- volatilità del liquido infiammabile;
- temperatura del liquido infiammabile.

Per emissioni di grado secondo, si utilizzano criteri di valutazione presenti in letteratura tecnica, per alcuni componenti tipici del processo. Mentre per le emissioni strutturali si ricorre a dati statistici.

### 2.2.9 Definizione del tipo di zona

Viene definita la zona pericolosa come la parte del luogo, di estensione calcolata, in cui potrebbe presentarsi la formazione di un'atmosfera esplosiva. Essa viene determinata in base alla probabilità e alla frequenza che si formi l'atmosfera esplosiva per presenza di gas, vapori o nebbie infiammabili.

Le zone pericolose si distinguono in tre classi in base alla probabilità e alla permanenza delle stesse, e sono:

- zona 0: luogo in cui l'atmosfera esplosiva è presente continuamente o per lunghi periodi o frequentemente;
- zona 1: luogo in cui l'atmosfera esplosiva è probabile che sia presente durante il funzionamento normale;
- zona 2: luogo in cui l'atmosfera esplosiva non è probabile che sia presente durante il funzionamento normale.

Il tipo di zona è univocamente determinato dal grado di emissione, infatti in generale un'emissione di grado continuo genera una zona di tipo 0, emissioni di grado primo generano zone di tipo 1, ed infine, emissioni di grado secondo generano zone di tipo 2. Questa corrispondenza può essere però alterata dalla ventilazione.

Dunque, per la definizione del tipo di zona sono da considerare, oltre al grado di emissione, anche il grado e la disponibilità della ventilazione che potrebbero modificare il tipo di zona in senso della sicurezza.

### 2.2.10 Determinazione della distanza " $d_z$ " e delle quote "a" e "b"

Viene definita la distanza pericolosa " $d_z$ " come la distanza dalla sorgente di emissione, lungo la direzione di emissione e di più probabile dispersione dell'atmosfera esplosiva, dove la concentrazione dei gas o vapori infiammabili risulta essere pari al prodotto  $k_{dz}$ -LEL. Dove  $k_{dz}$  è un coefficiente di sicurezza a cui viene

assegnato un valore compreso tra 0,25 e 0,5 per emissioni di grado continuo e primo, e da 0,5 a 0,75 per le emissioni di grado secondo.

La distanza  $d_z$  risulta essere un'indicazione dell'ordine di grandezza dell'estensione della zona pericolosa, ma non la sua reale estensione. Infatti, per il calcolo della reale estensione della zona pericolosa serve il calcolo di almeno un altro parametro, se l'emissione forma una zona sferica, o due se la zona generata non ha una forma regolare. Vengono così introdotte le quote "a" e "b". La prima delle due rappresenta l'effettiva estensione della zona pericolosa e deve risultare almeno uguale alla quota " $d_z$ ". In assenza di dati specifici è consigliato assumere la quota "a" maggiorata del 20% rispetto la distanza " $d_z$ ".

La quota "a" rappresenta l'estensione della zona pericolosa lungo la direzione di emissione, mentre la quota "b" risulta l'estensione della zona lungo la direzione ortogonale alla direzione di emissione e può risultare minore rispetto ad "a". Solitamente la quota "b" è calcolata dividendo la quota "a" per la densità relativa all'aria del gas o vapore in questione.

Per determinare l'estensione della zona pericolosa bisogna considerare ed esaminare alcuni parametri chiave:

- caratteristiche chimico-fisiche delle sostanze infiammabili (precedentemente discusse);
- caratteristiche del sistema di contenimento di tali sostanze (tipo di contenitore, pressione e temperatura al suo interno, ecc.);
- modalità e portata di emissione (precedentemente discusse);
- condizioni ambientali del luogo in esame (particolare interesse si avrà per le caratteristiche dell'aria che andrà a diluire l'atmosfera esplosiva formata, come velocità e ricambi d'aria, la sua disponibilità, ecc.).

Per poter definire l'estensione delle zone pericolose è necessario considerare alcuni aspetti: [5]

- i gas più pesanti dell'aria potrebbero accumularsi in zone al di sotto del livello del terreno, mentre quelli più leggeri a livelli più alti;
- minore è la temperatura d'infiammabilità, maggiore sarà l'estensione della zona pericolosa;
- per un determinato volume emesso, al diminuire del LEL crescerà l'estensione della zona pericolosa;
- una ventilazione maggiore riduce l'estensione della zona pericolosa;
- le aperture dei luoghi contenenti luoghi pericolosi dovranno essere considerate come se fossero sorgenti di emissione.

Le zone pericolose che si trovano all'interno di un sistema di contenimento di liquidi infiammabili (tubazioni, serbatoi, ecc.) e che sono a contatto con l'atmosfera esterna sono zone 0 e la loro estensione comprende l'intero volume del sistema di contenimento stesso.

Le zone pericolose che si trovano in ambienti aperti hanno un volume di atmosfera esplosiva in prossimità della sorgente di emissione (campo vicino). La distanza pericolosa " $d_z$ " e la quota "a" dipenderanno da: modalità di emissione, caratteristiche della sostanza e ventilazione.

Le zone pericolose che si trovano in ambienti chiusi presentano una o più tipi di zone pericolose nell'intorno della sorgente di emissione. Si può avere un solo tipo di zona (campo vicino) oppure più tipi di zona con interessamento dell'intero volume dell'ambiente in esame ( $V_a$ ), si forma così una seconda zona (campo lontano). Per determinare l'estensione della zona pericolosa si deve verificare la condizione nella formula (2.5) su  $X_m\%$  (concentrazione media di sostanza infiammabile) riportata nella guida CEI 31-35:

$$X_m \% \leq \frac{k \cdot LEL_{vmix}}{f_a} \quad (2.5)$$

Da questa considerazione si deduce che:

- se la condizione nella formula (2.5) è rispettata, si può considerare la formazione di una sola zona nell'intorno della sorgente di emissione (campo vicino);
- se la condizione nella formula (2.5) non è rispettata, si può considerare che la zona o le zone generate si estendono a tutto il volume  $V_a$ .

### 2.3 Calcolo della portata di emissione di una sostanza infiammabile

Per ogni sorgente di emissione deve essere valutata la portata di sostanza emessa in condizioni cautelative.

#### 2.3.1 Gas in singola fase

Prima cosa da fare è stabilire il regime di flusso del gas uscente dal sistema di contenimento (regime subsonico e non turbolento o sonico e turbolento). Il regime di flusso lo si può ricavare con la formula (2.6):

$$\frac{P_a}{P} \leq \left( \frac{2}{\gamma + 1} \right)^{\frac{\gamma}{\gamma - 1}} \quad (2.6)$$

dove:

$P_a$  Pressione atmosferica, espressa in Pa

$P$  Pressione assoluta all'interno del sistema di contenimento, nel punto di emissione, espressa in Pa

$\gamma$  Indice di espansione, rappresenta il rapporto tra calore specifico a pressione costante  $C_p$  e il calore specifico a volume costante  $C_v$ .

Per determinare la portata di emissione nel caso in cui la pressione all'interno del sistema di contenimento non cali sensibilmente per effetto dell'emissione, si usa la formula (2.7):

$$Q_g = \varphi \cdot c \cdot A \cdot \left[ \gamma \cdot \left( \frac{2}{\gamma + 1} \right)^{\beta} \right]^{0.5} \cdot \frac{P}{\left( R \cdot \frac{T}{M} \right)^{0.5}} \quad (2.7)$$

dove:

$Q_g$  Portata di emissione di gas o vapore, espressa in Kg/s

$\varphi$  Rapporto critico di flusso definito come segue:

- per emissione in regime sonico  $\varphi=1$ ;
- per emissione in regime subsonico si usa la formula (2.8):

$$\varphi = \left( \frac{P_a}{P} \right)^{\frac{1}{\gamma}} \cdot \left[ 1 - \left( \frac{P_a}{P} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} \right]^{0.5} \cdot \left[ \left( \frac{2}{\gamma-1} \right) \cdot \left( \frac{\gamma+1}{2} \right)^{\beta} \right]^{0.5} \quad \text{dove: } \beta = \frac{\gamma+1}{\gamma-1} \quad (2.8)$$

$c$  Coefficiente d'efflusso, valore fornito dal costruttore

$A$  Sezione del foro di emissione, espressa in  $m^2$

$R$  Costante universale dei gas, espressa in  $J/(Kmol \cdot K)$

$T$  Temperatura assoluta del sistema di contenimento in prossimità del foro di uscita, espressa in K

$M$  Massa molare della sostanza infiammabile, espressa in  $Kg/Kmol$

#### 2.3.2 Liquido che evapora

Emissione di un liquido che si trova al di sopra della sua temperatura di ebollizione (surriscaldato), o di un gas liquefatto per compressione (come il GPL) o, infine, di un gas liquefatto per refrigerazione (GNL).

Se il gas evapora tutto durante l'emissione, si può considerare  $Q_g = Q_t$  e la si può calcolare con la formula (2.9):

$$Q_t = c \cdot A \cdot \left[ 2 \cdot \rho_{liq} \cdot f(l) \cdot (P_0 - P_a) \right]^{0.5} \quad (2.9)$$

dove:

$Q_t$  Portata massica di emissione di liquido più vapore, espressa in Kg/s

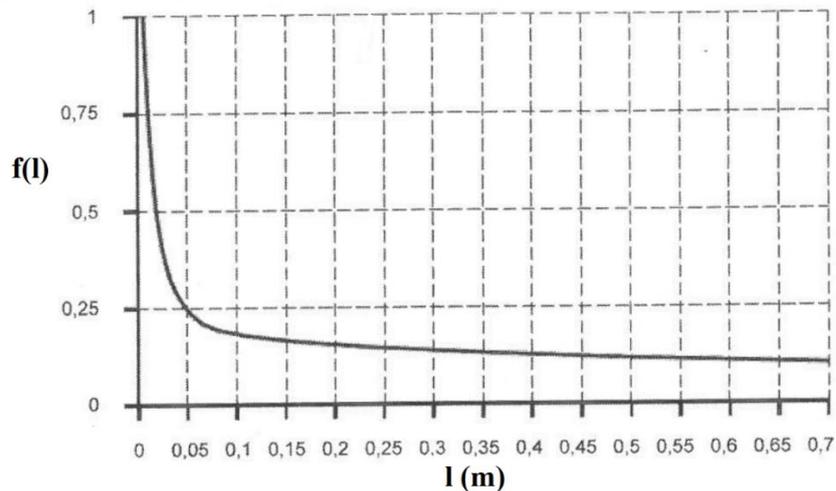
- c Coefficiente d'efflusso, valore fornito dal costruttore
- A Sezione del foro di emissione o area della pozza o della superficie libera di un liquido in un contenitore, espressa in  $m^2$
- $\rho_{liq}$  Densità del liquido, espressa in  $Kg/m^3$
- $f(l)$  Funzione della lunghezza del percorso di fuoriuscita del liquido, dall'interno (in cui la sostanza si trova allo stato liquido) all'esterno (dove la sostanza può essere allo stato vapore + nebbia + liquido). In figura 2.1 è presente il diagramma per ricavare  $f(l)$
- $P_0$  Lo si calcola con la formula (2.10):

$$P_0 = P_m + P_i \quad (2.10)$$

$P_m$  rappresenta l'eventuale pressione esercitata dal battente di liquido e si ricava con la formula (2.11).

$P_i$  è qualsiasi altra pressione imposta sul liquido stesso (pressione atmosferica, pressione esercitata da altri gas o la pressione di pompaggio).

$$P_m = (h_{liq} - h_f) \cdot \rho_{liq} \cdot g \quad (2.11)$$



**Figura 2.1.** Grafico per determinare  $f(l)$  in funzione della lunghezza del percorso di uscita  $l$ ) [5]

Nel caso in cui il liquido non evapora del tutto nell'emissione allora si avrà la formazione di un flusso bifase la cui portata totale, comprensiva delle fasi liquido + vapore + nebbia; può essere calcolata con la formula (2.9).

La frazione di liquido che evapora può essere calcolata con la formula (2.12):

$$\varphi_f = \frac{c_{sl}}{c_{lv}} \cdot (T - T_b) \quad (2.12)$$

dove:

- $\varphi_f$  Frazione massica di vapore nella miscela
- $c_{sl}$  Calore specifico medio del liquido, espresso in  $J/(Kg \cdot K)$
- $c_{lv}$  Calore latente di vaporizzazione, espresso in  $J/Kg$
- $T_b$  Temperatura normale di ebollizione della sostanza, espressa in  $K$

La frazione di liquido che si disperde sotto forma di nebbia può essere calcolata con la formula (2.13):

$$\varphi_s = \varphi_f \rightarrow se \rightarrow \varphi_f \leq 0,5 \quad (2.13)$$

dove:

$\varphi_s$  Frazione massica della nebbia nella miscela

Se  $\varphi_s > 1$  allora si assume valore unitario.

Per determinare dunque l'estensione della zona pericolosa si sommano le portate della frazione vapore e della nebbia e si ricava la portata  $Q_g$  con la formula (2.14):

$$Q_g = Q_t \cdot (\varphi_f + \varphi_s) \quad (2.14)$$

La frazione liquida, che dunque rimane non evaporata e che non forma la nebbia, sarà facilmente ricavabile con la formula (2.15):

$$Q_l = Q_t - Q_g \quad (2.15)$$

Una volta calcolata la portata  $Q_g$  si può ricavare il volume di atmosfera potenzialmente esplosiva ( $V_z$ ) e la distanza pericolosa ( $d_z$ ).

Analogamente vengono riportate nella guida le equazioni e le considerazioni fatte per il calcolo della portata  $Q_g$  per liquidi refrigerati e liquido non refrigerato e non surriscaldato che evapora in atmosfera. Tuttavia, per non appesantire la lettura si è preferito omettere questi calcoli, per approfondimenti consultare la guida CEI 31-35.

## 2.4 Calcolo della portata d'aria di ventilazione

La ventilazione influisce molto sia sulla probabilità di formazione di un'atmosfera esplosiva (tipo di zona), sia sull'estensione di questa (distanza pericolosa "d<sub>z</sub>" e quote "a" ed eventualmente "b").

La guida CEI 31-35 fornisce alcune linee guida per il calcolo della portata di ventilazione nel caso in cui essa sia una ventilazione naturale generata dal moto del vento o da effetto camino.

### 2.4.1 Ventilazione naturale per effetto della spinta del vento in ambiente chiuso

Partiamo dal presupposto che se la ventilazione in un determinato ambiente è dovuto sia alla spinta del vento ( $Q_{aw}$ ) sia all'effetto camino ( $Q_{at}$ ), non si deve considerare la somma delle due ma solamente la maggiore tra le due.

Assumendo una velocità del vento  $\leq 0,5$  m/s, la posizione delle aperture rispetto alla direzione del vento non è rilevante. Dunque, se si hanno più aperture su 3 o 4 lati, si calcola la portata d'aria considerando la portata maggiore fra i lati opposti presi in considerazione. Per il calcolo, le aperture poste su un lato possono essere considerate come un'unica apertura con superficie pari alla somma delle aperture su quel lato.

Per il calcolo della portata bisogna inoltre tenere conto della schermatura dovuta alla presenza di ostacoli per il passaggio dell'aria. La schermatura può essere assente, parziale o totale e la guida CEI 31-35 fornisce un criterio di valutazione della schermatura come segue:

- ambiente chiuso non schermato: si ha se l'ambiente in esame si trova separato da un altro edificio da una distanza superiore a 5 volte l'altezza più grande tra l'ambiente in esame ( $H_1$ ) e quella dell'edificio schermante ( $H_2$ ) come mostrato in figura 2.2;

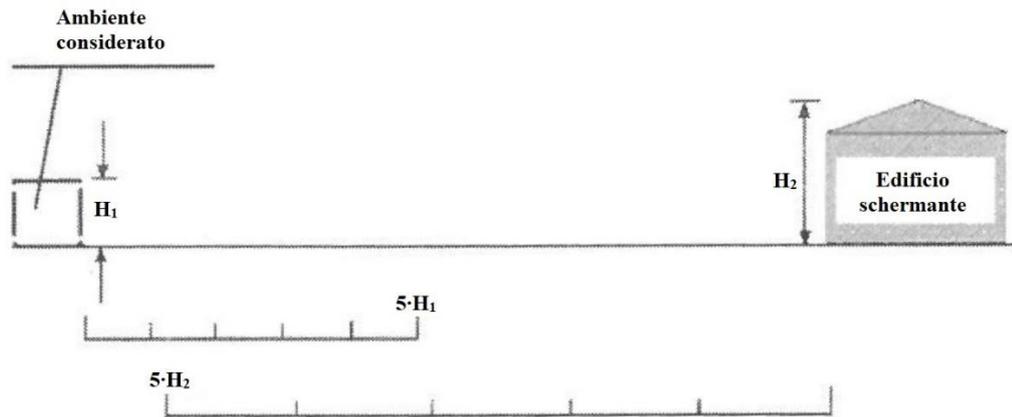


Figura 2.2. Ambiente chiuso non schermato da altro edificio o locale

- ambiente chiuso parzialmente schermato: si ha se l'ambiente in esame si trova ad una distanza compresa tra 2 e 5 volte l'altezza più grande tra l'ambiente in esame ( $H_1$ ) e quella dell'edificio schermante ( $H_2$ ) come mostrato in figura 2.3;

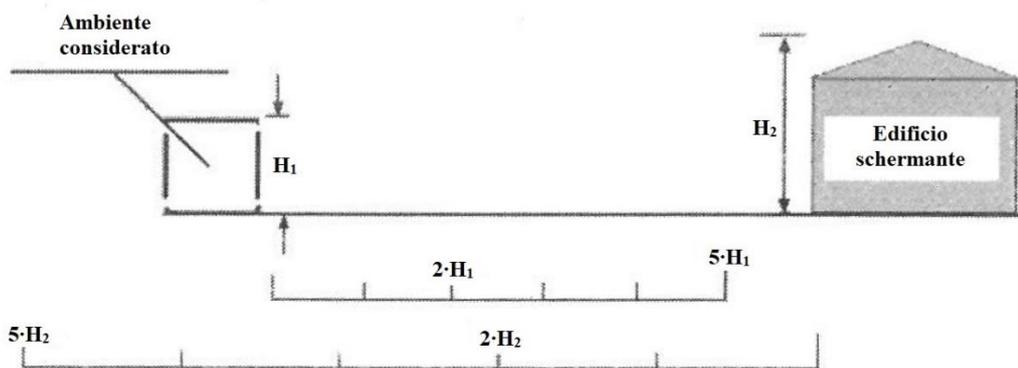


Figura 2.3. Ambiente chiuso parzialmente schermato da altro edificio o locale

- ambiente chiuso schermato: si ha se l'ambiente in esame si trova ad una distanza inferiore a 2 volte l'altezza più grande tra l'ambiente in esame ( $H_1$ ) e quella dell'edificio schermante ( $H_2$ ) come mostrato in figura 2.4;

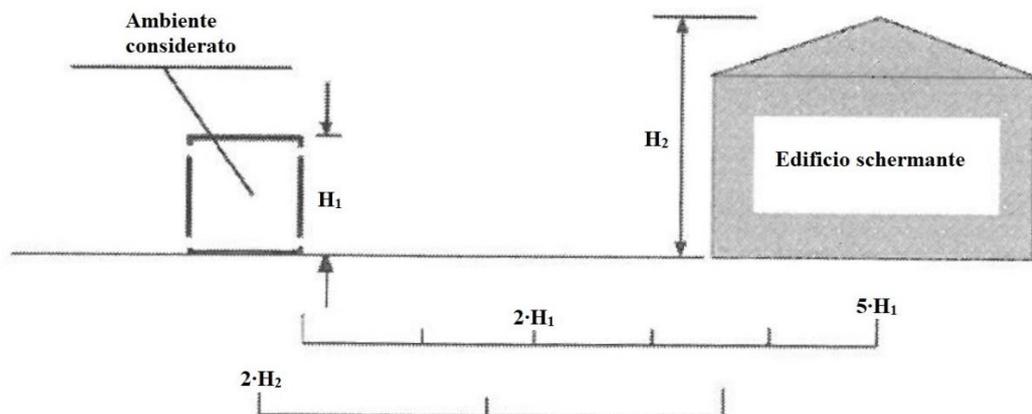


Figura 2.4. Ambiente chiuso schermato da altro edificio o locale

La guida CEI 31-35 riporta le seguenti formule per il calcolo della portata d'aria dipendentemente da ubicazione e numero delle aperture. Per una migliore comprensione sull'ubicazione delle aperture si utilizza la figura 2.5 presente nella guida [15].

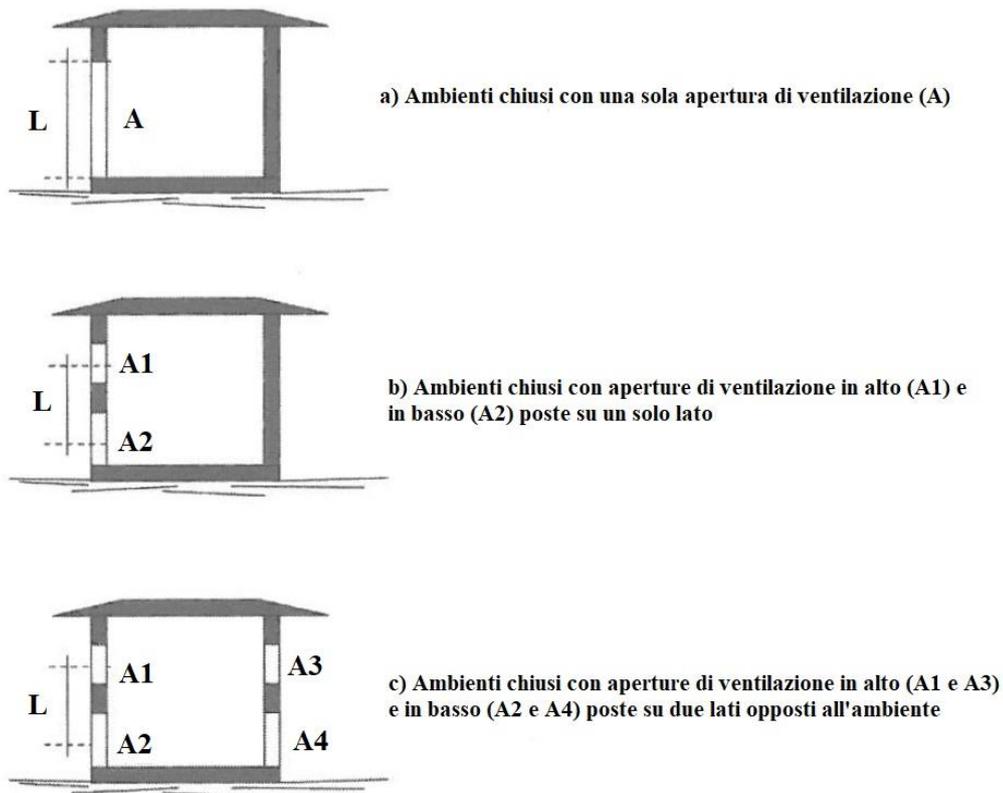


Figura 2.5. Aperture in ambienti chiusi per il calcolo della ventilazione naturale

Portata di ventilazione naturale per spinta del vento in ambienti chiusi, con una sola apertura di ventilazione A posta su un lato (figura 2.5 a), schermati, parzialmente schermati e non schermati, calcolabile con la formula (2.16):

$$Q_{aw} = 0,025 \cdot A \cdot w_a \quad (2.16)$$

dove:

$Q_{aw}$  Portata d'aria per spinta del vento, espressa in  $m^3/s$

A Area dell'apertura di ventilazione, espressa in  $m^2$

$w_a$  Velocità di riferimento dell'aria nell'ambiente considerato, espressa in  $m/s$

Portata di ventilazione naturale per spinta del vento in ambienti chiusi, con aperture di ventilazione poste in un solo lato e presenti in alto ( $A_1$ ) e in basso ( $A_2$ ) ( figura 2.5 b), schermati, parzialmente schermati e non schermati, calcolabile con la formula (2.17):

$$Q_{aw} = 0,025 \cdot (A_1 + A_2) \cdot w_a \quad (2.17)$$

dove:

$A_1$  Reale sezione libera dell'apertura posta in alto, espressa in  $m^2$

$A_2$  Reale sezione libera dell'apertura posta in basso, espressa in  $m^2$

Portata di ventilazione naturale per spinta del vento in ambienti chiusi, con aperture di ventilazione poste su due lati opposti e presenti in alto ( $A_1$  e  $A_3$ ) e in basso ( $A_2$  e  $A_4$ ) (figura 2.5 c), schermati, parzialmente schermati e non schermati, calcolabile con la formula (2.18):

$$Q_{aw} = c_s \cdot A_{aw} \cdot w_a \cdot (\Delta c_p)^{0,5} \quad (2.18)$$

dove:

$A_{aw}$  sarà calcolato con la formula (2.19):

$$\frac{1}{A_{aw}^2} = \frac{1}{(A_1 + A_2)^2} + \frac{1}{(A_3 + A_4)^2} \quad (2.19)$$

$A_1$  e  $A_3$  Reale sezione libera delle aperture poste in alto, espressa in  $m^2$

$A_2$  e  $A_4$  Reale sezione libera delle aperture poste in basso, espressa in  $m^2$

$c_s$  Coefficiente di scarico di un'apertura, posto uguale a 0,65

$\Delta c_p$  Coefficiente di pressione dell'aria in ingresso. Per i valori di velocità del vento assunti si avrà che il coefficiente assumerà i seguenti valori:

- 0,9 per ambiente non schermato
- 0,6 per ambiente parzialmente schermato
- 0,2 per ambiente schermato

Se si assume una velocità del vento  $> 0,5$  m/s, il valore di  $\Delta c_p$  sarà assegnato prendendo in considerazione anche la direzione prevalente del vento.

#### 2.4.2 Ventilazione naturale per effetto camino in ambiente chiuso

Le escursioni termiche tra giorno e notte causano differenze di densità dell'aria che generano moti di aria calda verso l'alto e di aria fredda verso il basso. Al centro esiste un livello neutro. Il livello neutro è di fondamentale importanza in quanto contraddistingue le aperture che stanno in alto (al di sopra del livello neutro) da quelle che si trovano in basso (al di sotto del livello neutro).

La guida CEI 31-35 considera che il livello neutro si trova sulla mezzeria dell'altezza dell'ambiente chiuso e che, se sono presenti aperture poste in alto e in basso di diverse dimensioni, il livello neutro si sposta, proporzionalmente al rapporto tra le aree delle aperture poste in alto e quelle poste in basso, verso l'area di maggiore estensione.

Stesse considerazioni fatte precedentemente sulle aree delle aperture poste in alto e in basso sono fatte anche in questo caso.

Portata di ventilazione naturale per effetto camino in ambienti chiusi, con una sola apertura di ventilazione  $A$  posta su un lato (figura 2.5 a), schermati, parzialmente schermati e non schermati, calcolabile con la formula (2.20):

$$Q_{at} = c_s \cdot \frac{A}{3} \cdot \left( \frac{(T_{ai} - T_{ae}) \cdot g \cdot L}{T_{aie}} \right)^{0,5} \quad (2.20)$$

dove:

$Q_{at}$  Portata d'aria per effetto camino, espressa in  $m^3/s$

$T_{ae}$  Temperatura media dell'aria all'esterno dell'ambiente considerato, espressa in K

$T_{ai}$  Temperatura media dell'aria all'interno dell'ambiente considerato, espressa in K

$T_{aie}$  Temperatura media tra interna ed esterna, espressa in K

$g$  Accelerazione di gravità, espressa in  $m/s^2$

$L$  Distanza verticale tra la mezzeria delle aperture poste in alto e quelle poste in basso, quando l'apertura è una sola  $L$  è l'altezza dell'apertura stessa, espressa in m

Portata di ventilazione naturale per effetto camino in ambienti chiusi, con aperture di ventilazione poste in un solo lato e presenti in alto ( $A_1$ ) e in basso ( $A_2$ ) (figura 2.5 b), schermati, parzialmente schermati e non schermati, calcolabile con la formula (2.21):

$$Q_{at} = c_s \cdot (A_1 + A_2) \cdot \left\{ \frac{\frac{A_1}{A_2} \cdot 2^{0,5}}{\left[ 1 + \frac{A_1}{A_2} \right] \cdot \left[ 1 + \left( \frac{A_1}{A_2} \right)^2 \right]^{0,5}} \right\} \cdot \left[ \frac{(T_{ai} - T_{ae}) \cdot g \cdot L}{T_{aie}} \right]^{0,5} \quad (2.21)$$

Portata di ventilazione naturale per effetto camino in ambienti chiusi, con aperture di ventilazione poste su due lati opposti e presenti in alto ( $A_1$  e  $A_3$ ) e in basso ( $A_2$  e  $A_4$ ) (figura 2.5 c), schermati, parzialmente schermati e non schermati, calcolabile con la formula (2.22):

$$Q_{at} = c_s \cdot A_{av} \cdot \left[ \frac{2 \cdot (T_{ai} - T_{ae}) \cdot g \cdot L}{T_{aie}} \right]^{0,5} \quad (2.22)$$

$Q_{at}$  può essere considerata solo se  $(T_{ai} - T_{ae})$  è costantemente presente durante il funzionamento ordinario dell'impianto. Sono ammesse solo brevi interruzioni poco frequenti.

### 2.4.3 Ventilazione per infiltrazioni naturali in ambiente chiuso

Negli ambienti in cui sono assenti aperture fisse per la ventilazione, si può instaurare una ventilazione dovuta alle infiltrazioni naturali tramite interstizi della struttura, dei serramenti e dei varchi tecnici. Esse sono causate sia dal moto del vento che dall'effetto camino.

Per calcolare la portata d'aria dovuta alle infiltrazioni, si ricorre alla variante V1 della guida CEI 31-35 che riporta la formula (2.23):

$$Q_{ai} = A \cdot k \quad (2.23)$$

dove:

$Q_{ai}$  Portata d'aria di ventilazione per infiltrazione naturale, espressa in  $m^3/h$

$A$  Area totale effettiva di perdita, espressa in  $cm^2$

$k$  Coefficiente calcolato in base all'entità sia dell'effetto camino sia della spinta del vento, espresso in  $m^3/(h \cdot cm^2)$

Per calcolare  $A$  si usa la formula (2.24):

$$A = \sum_{j=1}^{ni} (c_j \cdot a_j) + (ck_1 + ck_2) \cdot l + \sum_{j=1}^{nc} c_j \quad (2.24)$$

dove:

$c_j$  Coefficiente di perdita superficiale per gli infissi presenti, espresso in  $cm^2/m^2$ ; o per gli  $nc$  tubi presenti, espresso in  $cm^2/n.$  di elementi

$ck_1$  Coefficiente di perdita lineare fondamenta – mura, espresso in  $cm^2/m^2$

$ck_2$  Coefficiente di perdita lineare soffitta – mura, espresso in  $cm^2/m^2$

$l$  Perimetro dell'edificio, espresso in  $m$

$a_j$  Area del  $j$ -esimo infisso, espressa in  $m^2$

Alcuni vari dei coefficienti suddetti sono riportati nelle tabelle 2.2 e 2.3:

**Tabella 2.2.** Valori dei coefficienti di perdita per infiltrazioni naturali [5]

Coefficienti di perdita lineare $ck$		Consigliato	Max	Min
$ck_1$ (cm <sup>2</sup> /m <sup>2</sup> )	Sigillato	0,8	1,2	0,4
	Non sigillato	4	4	1
$ck_2$ (cm <sup>2</sup> /m <sup>2</sup> )		1,5	2,5	0,5

**Tabella 2.3.** Valori dei coefficienti di perdita per infiltrazioni naturali [5]

Coefficienti di perdita superficiale $c_j$ (cm <sup>2</sup> /m <sup>2</sup> )		Consigliato	Max	Min
Finestre	A tenuta	1,9	2,7	1,1
	Non a tenuta	3,7	5,4	2,2
Porte	A tenuta	8	15	3
	Non a tenuta	11	17	6
Interstizi finestre - mura	Sigillato	1,3	2,1	1,1
	Non sigillato	6,5	10,3	5,7
Interstizi porte - mura	Sigillato	1	1	0,3
	Non sigillato	5	5	1,7
Tubo	Sigillato	1	2	0
	Non sigillato	6	2	10

È inoltre possibile calcolare il coefficiente  $c_j$  per ogni tipo di infisso se si conosce la permeabilità all'aria  $m_j$  a 100 Pa, utilizzando la formula 2.25:

$$c_j = 0,32 \cdot m_j \quad (2.25)$$

dove:

$m_j$  Massima permeabilità all'aria, espressa in m<sup>3</sup>/(h·m<sup>2</sup>)

Ad ogni classe di permeabilità corrisponde un determinato valore di  $m_j$ , come riportato nella tabella 2.4 e ricavata dalla norma UNI EN 12207 [20].

**Tabella 2.4.** Valori dei coefficienti di perdita superficiale, per ogni classe di permeabilità [5]

Classe	$m_j$ a 100 Pa (m <sup>3</sup> /(h·m <sup>2</sup> ))	$c_j$ (cm <sup>2</sup> /m <sup>2</sup> )
1	50	15,93
2	27	8,6
3	9	2,87
4	3	0,96

Per il calcolo del coefficiente  $k$  si utilizza la formula (2.26):

$$k = \sqrt{q_{ait} + q_{aiw}} \quad (2.26)$$

dove:

$q_{ait}$  Termine per infiltrazioni dovute ad effetto camino e calcolabile con la formula (2.27):

$$q_{ait} = \Delta T \cdot a \quad (2.27)$$

dove:

$\Delta T$   $T_{int} - T_{est}$ , espresso in K

- a Coefficiente che dipende dall'altezza dell'ambiente in esame, espresso in  $m^6/(h^2 \cdot cm^4 \cdot K)$ , i valori sono riportati nella tabella 2.5

**Tabella 2.5.** Valori del coefficiente "a" in dipendenza dell'altezza dell'ambiente [5]

Coefficiente "a"	Altezza dell'ambiente (m)
0,00188	$\leq 3$
0,00376	$> 3$ fino a 6
0,00564	$> 6$

$q_{ait}$  Termine per infiltrazioni dovute alla spinta del vento, questo termine diventa trascurabile se si assume una velocità dell'aria inferiore a 0,5 m/s. In questo caso la formula (2.26) si riduce alla formula (2.28):

$$k = \sqrt{q_{ait}} \quad (2.28)$$

La portata d'aria di ventilazione effettiva ( $Q_a$ ), va calcolata diversamente caso per caso in base alla presenza o meno della portata d'aria per infiltrazioni naturali  $Q_{ai}$ :

- In presenza di  $Q_{ai}$ :
  - $Q_a = Q_{aw} + Q_{ai}$  quando è presente  $Q_{aw}$ ;
  - $Q_a = Q_{at}$  o  $Q_{aw} + Q_{ai}$  quando sono presenti sia  $Q_{aw}$  che  $Q_{at}$ , scegliendo tra le due quella maggiore.
- In assenza di  $Q_{ai}$ :
  - $Q_a = Q_{aw}$  quando è presente solo  $Q_{aw}$ ;
  - $Q_a = Q_{at}$  o  $Q_{aw}$  quando sono presenti sia  $Q_{aw}$  che  $Q_{at}$ , scegliendo tra le due quella maggiore.

Una volta calcolata la portata d'aria di ventilazione  $Q_a$  è possibile ricavare i ricambi dell'intero ambiente ( $C_a$ ) utilizzando la formula (2.29):

$$C_a = \frac{Q_a}{V_a} \quad (2.29)$$

dove:

$Q_a$  Portata d'aria di ventilazione effettiva che interessa il volume  $V_a$ , espressa in  $m^3/s$

$V_a$  Volume libero dell'ambiente considerato, espresso in  $m^3$

## 2.5 Grado e disponibilità della ventilazione

I gas sono più facilmente dispersi in aria al crescere della velocità dell'aria di ventilazione.

Grado della ventilazione e la disponibilità della stessa sono parametri chiave che influiscono sia sul tipo di zona generata, sia sull'estensione della stessa, caratterizzando così l'efficacia della ventilazione.

La guida CEI 31-87 considerano la ventilazione sia in modo quantitativo (grado della ventilazione), sia in modo qualitativo, indicandone l'affidabilità (disponibilità della ventilazione).

### 2.5.1 Grado della ventilazione

Il grado della ventilazione rappresenta il quantitativo di aria di ventilazione che investe la sorgente di emissione rapportata alla quantità di sostanza infiammabile emessa. Di seguito viene data una classificazione generica sui gradi di ventilazione:

- ALTO (VH): la ventilazione riesce a ridurre la concentrazione di sostanza pericolosa al di sotto del LEL, in modo quantomeno istantaneo. L'estensione della zona risulta tanto piccola da poterla considerare trascurabile;

- MEDIO (VM): la ventilazione influisce sulla concentrazione, riducendo così l'estensione della zona pericolosa ma non tanto da essere considerata trascurabile. Riduce inoltre il tempo di permanenza dell'atmosfera esplosiva;
- BASSO (VL): la ventilazione influisce minimamente sulla concentrazione, non riuscendo a ridurre l'estensione della zona pericolosa. Inoltre non riduce il tempo di permanenza dell'atmosfera esplosiva.

Per definire i gradi di ventilazione, vanno considerati il volume ipotetico di atmosfera esplosiva ( $V_Z$ ), il tempo di persistenza ( $t$ ) e la concentrazione percentuale media della sostanza infiammabile presente nell'atmosfera potenzialmente esplosiva ( $X_m\%$ ).

La procedura sarà la seguente e si farà riferimento ai seguenti volumi d'interesse:

- $V_a$  Volume libero dell'ambiente considerato;
- $V_0$  Volume totale da ventilare;
- $V_{ex}$  Volume ipotetico di atmosfera esplosiva a meno del coefficiente di sicurezza  $k$ ;
- $V_Z$  Volume ipotetico di atmosfera esplosiva comprensivo del fattore di sicurezza  $k$ .

Il procedimento è preso dalla guida CEI 31-35 e risulta un metodo approssimativo, perché soggetto a limitazioni, ma tutto ciò va in favore della sicurezza.

Nota la portata di emissione ( $Q_g$ ) si calcola la portata volumetrica minima di ventilazione ( $Q_{amin}$ ) presente come  $(dV/dt)_{min}$  nella formula (2.30), e definita come la portata d'aria necessaria per diluire  $Q_g$ , presente anche come  $(dG/dt)_{max}$  nella formula (2.30) e rappresentante la massima portata di sostanza pericolosa relativa all'emissione considerata, al di sotto di LEL, considerando un margine di sicurezza rappresentato dal coefficiente  $k$  e che cambia al cambiare del grado di ventilazione.

$$\left(\frac{dV}{dt}\right)_{min} = Q_{amin} = \frac{\left(\frac{dG}{dt}\right)_{max}}{k \cdot LEL_m} \cdot \frac{T_a}{293} = \frac{Q_g}{k \cdot LEL_m} \cdot \frac{T_a}{293} \quad (2.30)$$

dove:

$Q_{amin}$  Portata volumetrica minima di ventilazione, espressa in  $m^3/s$

$k$  Coefficiente di sicurezza applicato a LEL e aventi i valori  $k=0,25$  per emissioni di grado continuo e primo,  $k=0,5$  per emissioni di grado secondo

$LEL_m$  Limite inferiore di esplosività massico in aria della sostanza in esame, espresso in  $Kg/m^3$

$T_a$  Temperatura dell'ambiente in esame, espressa in K

$Q_g$  Portata massima massica di emissione di gas o vapore, espressa in  $Kg/s$

Da qui si passa al calcolo del volume  $V_Z$  utilizzando la formula (2.31):

$$V_Z = \frac{f_{SE} \cdot \left(\frac{dV}{dt}\right)_{min}}{C_0} = \frac{f_{SE} \cdot Q_{amin}}{C_0} \quad (2.31)$$

dove:

$f_{SE}$  Fattore di efficacia della ventilazione intorno alla SE, varia da 1 (situazione ideale) a 5 (flusso totalmente impedito)

$C_0$  Numero di ricambi d'aria fresca per unità di tempo e riferito al volume  $V_0$ , espresso in  $s^{-1}$  e ricavabile dalla formula (2.32):

$$C_0 = \frac{dV_0/dt}{V_0} = \frac{Q_0}{V_0} \quad (2.32)$$

Altro parametro molto importante è il tempo di persistenza dell'atmosfera potenzialmente pericolosa dopo essere cessata l'emissione ( $t$ ), fornisce solamente un'informazione aggiuntiva che deve essere comparata con la scala dei tempi del processo in esame. Questo parametro può essere calcolato utilizzando la formula (2.33):

$$t = \frac{-f_{SE}}{C_0} \cdot \ln \left( \frac{k \cdot LEL}{X_0} \right) \quad (2.33)$$

dove:

- t      Tempo di persistenza dell'atmosfera esplosiva al cessare dell'emissione, espressa in s
- X<sub>0</sub>    Concentrazione iniziale media della sostanza infiammabile all'interno del volume pericoloso al cessare dell'emissione, espressa nella stessa unità di misura di LEL (vol% o Kg/m<sup>3</sup>)

### 2.5.2 Disponibilità della ventilazione

Nella guida [15] sono considerati tre livelli di disponibilità:

- BUONA: ventilazione presente con continuità quando la sorgente di emissione è attiva;
- ADEGUATA: ventilazione presente durante il funzionamento normale quando la sorgente di emissione è attiva;
- SCARSA: ventilazione che non corrisponde alle definizioni di Buona o Adeguata.

Ogni qualvolta si è in presenza di ventilazione adeguata bisogna definire due tipi di ventilazione:

- ventilazione primaria con disponibilità adeguata;
- ventilazione residua con disponibilità buona.

In caso di ventilazione artificiale la disponibilità si considera buona se:

- è presente un estrattore o ventilatore di riserva con avviamento automatico;
- l'estrattore o ventilatore in funzione è sottoposto a manutenzione regolare, ha una linea di alimentazione preferenziale e in caso di guasto si aziona un allarme;
- l'estrattore o ventilatore è dotato di un alimentatore di emergenza e in caso di guasto si aziona un allarme.

## 2.6 Determinazione del tipo di zona pericolosa

La procedura è la seguente:

- 1) individuare tutte le sorgenti di emissione;
- 2) determinare il grado di emissione di ogni sorgente di emissione;
- 3) individuare grado e disponibilità della ventilazione in cui si trovano le sorgenti di emissione;
- 4) per ogni sorgente e grado di emissione si determina la zona con l'aiuto della tabella 2.6 ricavata dalla guida CEI 31-35.

**Tabella 2.6.** Tipi di zone in base alla ventilazione e al grado di emissione [5]

Grado della emissione	Grado della ventilazione						
	Alto			Medio			Basso
	Disponibilità della ventilazione						
	Buona	Adeguata	Scarsa	Buona	Adeguata	Scarsa	Buona, adeguata o scarsa
<b>Continuo</b>	Zona 0 NE	Zona 0 NE + Zona 2	Zona 0 NE + Zona 1	Zona 0	Zona 0 + Zona 2	Zona 0 + Zona 1	Zona 0
<b>Primo</b>	Zona 1 NE	Zona 1 NE + Zona 2	Zona 1 NE + Zona 2	Zona 1	Zona 1 + Zona 2	Zona 1 + Zona 2	Zona 1 o Zona 0
<b>Secondo</b>	Zona 2 NE	Zona 2 NE	Zona 2 NE + Zona 2	Zona 2	Zona 2	Zona 2	Zona 1 e anche Zona 0

## 2.7 Calcolo della distanza pericolosa “d<sub>Z</sub>”

La guida CEI 31-35 racchiude una serie di formule per il calcolo della distanza pericolosa “d<sub>Z</sub>”, con l’ausilio di considerazioni cautelative a favore della sicurezza. Le formule sono applicabili a tutti gli ambienti sia aperti che chiusi.

La distanza pericolosa “d<sub>Z</sub>” è funzione della concentrazione del gas o vapore nel campo lontano e risulta dunque cautelativo considerare l’utilizzo di un fattore correttivo k<sub>Z</sub>, che risulta direttamente proporzionale alla concentrazione media X<sub>m</sub>%, e che assumerà i seguenti valori:

- per ambienti aperti k<sub>Z</sub>=1;
- per ambienti chiusi si utilizza la formula (2.34) e qualora il valore restituito dalla formula risulta minore di 1 allora si assume k<sub>Z</sub>=1:

$$k_Z = 0,9 \cdot e^{\frac{76 \cdot X_m \%}{M \cdot LEL_v}} \quad (2.34)$$

La formula (2.34) però fornisce dei valori non attendibili per sostanze come l’idrogeno e quelle che hanno un basso peso molecolare. Per questi casi si utilizzano dei valori di k<sub>Z</sub> compresi tra 1 e 5 e riportati in tabella 2.7:

**Tabella 2.7.** Coefficiente k<sub>Z</sub> per emissioni di idrogeno in ambienti chiusi

$(X_m \% \cdot f_{SE}) / (k \cdot LEL_v)$	k <sub>Z</sub>
< 0,1	1
da 0,1 a 0,4	2
da 0,41 a 0,75	3
da 0,76 a 0,9	4
da 0,9 a 1	5

Le formule per il calcolo di d<sub>Z</sub> variano al variare della velocità di efflusso del gas infiammabile (u<sub>0</sub>), con valore discriminante pari a 10 m/s. Se la velocità di emissione supera tale soglia allora avremo un’emissione ad alta velocità, viceversa si parla di emissione a bassa velocità.

Per il calcolo di u<sub>0</sub> si deve conoscere la temperatura assoluta subito dopo l’uscita dal sistema di contenimento e calcolabile con la formula (2.35):

$$T_0 = T \cdot \left( \frac{P_a}{P} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} \quad (2.35)$$

dove:

T<sub>0</sub> Temperatura assoluta subito dopo l’uscita dal sistema di contenimento, espressa in K

T Temperatura assoluta all’interno del sistema di contenimento nel punto di emissione, espressa in K

P<sub>a</sub> Pressione atmosferica dell’ambiente in analisi, espressa in Pa

P Pressione assoluta all’interno del sistema di contenimento nel punto di emissione, espressa in Pa

Trovato T<sub>0</sub> si calcola il volume specifico all’uscita del sistema di contenimento con la formula (2.36):

$$v_0 = \frac{R \cdot T_0}{M \cdot P_a} \quad (2.36)$$

dove:

v<sub>0</sub> Volume specifico subito dopo l’uscita dal sistema di contenimento, espresso in m<sup>3</sup>/Kg

R Costante dei gas, espressa in J/(Kmol·K)

M Massa molare della sostanza infiammabile, espresso in Kg/Kmol

Ricavato  $v_0$  è possibile calcolare la velocità di emissione  $u_0$  subito dopo l'uscita dal sistema di contenimento, utilizzando la formula (2.37):

$$u_0 = \frac{Q_g \cdot v_0}{c \cdot A} \quad (2.37)$$

dove:

- $u_0$  Velocità di emissione subito dopo l'uscita dal sistema di contenimento, espressa in m/s
- $Q_g$  Portata massica massima di emissione di gas o vapore, espressa in Kg/s
- $A$  Area o sezione della sorgente di emissione, espressa in  $m^2$
- $c$  Coefficiente di efflusso, valore solitamente fornito dal costruttore oppure si possono assumere i seguenti valori:
  - $c=0,97$  per valvole di sfioro e di sicurezza;
  - $c=0,8$  negli altri casi.

### 2.7.1 Gas o vapori emessi a bassa velocità

Per gas o vapori emessi con  $u_0 < 10$  m/s, il calcolo di  $d_z$  lo si ottiene utilizzando la formula (2.38):

$$d_z = k_z \cdot \left( \frac{42300 \cdot Q_g \cdot f_{SE}}{M \cdot k_{dz} \cdot LEL_v \cdot w_a} \right) \quad (2.38)$$

dove:

- $d_z$  Distanza pericolosa, espressa in m;
- $LEL_v$  Limite inferiore di esplosività in aria, espresso in percentuale volumetrica
- $w_a$  Velocità dell'aria nell'ambiente in esame, espressa in m/s

La formula (2.38) funziona molto bene per gas e vapori che hanno una densità relativa all'aria compresa 0,5 e 2, e una portata di emissione inferiore a 1 Kg/s. Per gas o vapori con densità relativa maggiore di 2 si ottengono risultati a favore della sicurezza.

### 2.7.2 Gas o vapori emessi ad alta velocità

In questo caso, se è nota la portata  $Q_g$ , si usa la formula (2.39):

$$d_z = k_z \cdot 50 \cdot \frac{M^{-0,65}}{k_{dz} \cdot LEL_v} \cdot \left( \frac{Q_g}{\varphi \cdot c} \right)^{0,5} \cdot \left( \gamma \cdot \left( \frac{2}{\gamma + 1} \right)^\beta \right)^{-0,25} \quad (2.39)$$

dove:

- $\varphi$  Rapporto critico del flusso
- $\gamma$  Indice di espansione
- $\beta$  Esponente pari a  $(\gamma+1)/(\gamma-1)$

In alternativa può essere utilizzata la formula (2.40):

$$d_z = \frac{1650}{k_{dz} \cdot LEL_v} \cdot k_z \cdot (P \cdot 10^{-5})^{0,5} \cdot M^{-0,4} \cdot A^{0,5} \quad (2.40)$$

### 2.7.3 Evaporazione da una pozza liquida lambita da dall'aria di ventilazione dell'ambiente

In questo caso la formula per il calcolo di  $d_z$  è la (2.41), ed è valida per  $w_a < 2,5$  m/s:

$$d_z = k_z \cdot (P_v \cdot 10^{-5})^a \cdot M^b \cdot (k_{dz} \cdot LEL_v)^c \cdot A^d \cdot (4 - w_a) \quad (2.41)$$

dove:

$P_v$  Tensione di vapore alla massima temperatura dell'ambiente in esame o alla temperatura di emissione se questa risulta maggiore, espressa in Pa

Gli esponenti presenti nella formula (2.41) sono riportati in tabella 2.8, e sono riferiti ad una velocità del vento inferiore a 0,5 m/s.

**Tabella 2.8.** Valori dei coefficienti a, b, c e d per  $w_a < 0,5$  m/s [5]

Tensione di vapore (Pa)	a	b	c	d
$P_v < 2 \cdot 10^4$	0,26	-0,2	-0,25	0,67
$P_v \geq 2 \cdot 10^4$	0,1	-0,1	-0,26	0,7

Il calcolo di  $d_z$  fornisce l'ordine di grandezza della zona pericolosa generata e non la sua reale estensione.

## 2.8 Classificazione dei luoghi per presenza di polveri combustibili

### 2.8.1 Fattori della classificazione

Come già descritto per gas o polveri, anche per le polveri combustibili, prima di iniziare la classificazione, bisogna reperire tutti i dati che serviranno per una corretta valutazione.

Anche qua parliamo di zone generate la cui classificazione si basa sui seguenti parametri chiave:

- grado dell'emissione;
- tipo, grado e disponibilità della ventilazione.

Oltre a questi due parametri, si deve fare una distinzione tra ambienti aperti e ambienti chiusi.

La difficoltà di predizione del comportamento delle polveri fa sì che non è possibile utilizzare una procedura basata su algoritmi, ci si avvale dunque di metodi empirici per il calcolo dell'estensione delle zone pericolose. Si farà dunque uso di coefficienti cautelativi per far sì di ottenere calcoli in favore della sicurezza, e che sono correlati alle caratteristiche della polvere, al sistema di contenimento e al tipo di ambiente in esame

I dati rilevanti che influiscono sull'estensione della zona pericolosa sono i seguenti:

- grandezza media delle particelle di polvere combustibile;
- contenuto di umidità ed inerti nell'atmosfera esplosiva;
- LEL;
- densità;
- pressione nel punto di emissione;
- portata di polvere emessa;
- tipo di ambiente;
- velocità dell'aria nell'intorno della sorgente di emissione;
- presenza di sistemi di bonifica;
- altezza della SE rispetto alla superficie di deposito della polvere emessa.

## 2.9 Procedimento per la classificazione dei luoghi pericolosi per presenza di polveri combustibili

Come già accennato, per la classificazione dei luoghi pericolosi dovuti alla presenza di polveri combustibili, bisogna considerare i fattori precedentemente elencati in maniera qualitativa.

Il punto di partenza della classificazione parte dal tipo di polvere in esame, che sia essa combustibile o meno.

La procedura è anche in questo caso schematica e viene fatta per step [5]:

per il luogo in esame

1. raccolta dei dati generali di progetto e verifica di applicabilità della norma;
2. individuazione degli ambienti e delle relative condizioni ambientali;
3. identificazione delle polveri combustibili e le loro caratteristiche;

per ogni ambiente

4. individuazione delle sorgenti di emissione;

per ciascuna sorgente di emissione

5. determinazione della possibilità di fuoriuscita di sostanza infiammabile (grado di emissione);
6. determinazione delle sorgenti rappresentative di altre;
7. analisi dell'influenza delle varie emissioni sulla classificazione del luogo;
8. verifica della presenza di sistemi di bonifica (ad esempio bocchette di aspirazione artificiale);

per ciascun grado delle singole sorgenti di emissione o di quelle rappresentative

9. definizione del tipo di zona generata;
10. determinazione dell'estensione della zona pericolosa all'interno ed all'esterno del sistema di contenimento in esame;
11. valutazione di formazione di strati di polvere fuori del sistema di contenimento, e definizione del tipo di zona generata;
12. determinazione dell'estensione delle zone pericolose generate da depositi di strati di polvere;

per l'ambiente in esame

13. inviluppo delle zone pericolose;
14. individuazione delle aperture in relazione alle zone pericolose.

I vari step saranno di seguito analizzati nel dettaglio.

### 2.9.1 Dati generali di progetto

Prima di iniziare l'attività di valutazione del rischio devono essere raccolti i dati di progetto necessari per la stessa. Questi devono essere forniti dal committente o dai suoi collaboratori. I dati generali di progetto sono:

- dati del committente (sede legale, recapiti telefonici e di posta elettronica, ecc.);
- dati del datore di lavoro;
- denominazione dell'opera in esame (stabilimento, impianto, ecc.) e suo utilizzo (zuccherificio, produzione paste, ecc.);
- ubicazione dell'opera;
- scopo della valutazione;
- descrizione dell'opera oggetto della classificazione, così da consentire l'identificazione per il pericolo esplosione;
- vincoli posti dal committente o da enti (vincoli progettuali o imposti ad esempio dai pompieri).

Prima verifica da effettuare è accertarsi che il caso oggetto della classificazione rientri nel campo di applicazione della norma CEI 31-88 [21] e della guida CEI 31-56 [16]. Se non rientra nel campo applicativo non vorrà dire che il luogo in esame non presenti pericolo di esplosione, ma che non potranno essere utilizzate le suddette norme per una corretta valutazione.

### 2.9.2 Individuazione degli ambienti e delle relative condizioni ambientali

Per ogni ambiente devono essere definiti alcuni parametri che saranno utili per la valutazione, come ad esempio pressione atmosferica, temperatura massima, disturbi e turbolenze dell'aria, ecc..

Possiamo suddividere gli ambienti in due macro gruppi: ambienti aperti e ambienti chiusi, come visto per gas, vapori o nebbie infiammabili.

Contrariamente ai gas, polveri o nebbie infiammabili, le polveri sono poco sensibili alle variazioni di temperatura e pressione. Inoltre, seppur importanti per la dispersione della nube esplosiva, le turbolenze e i disturbi d'aria possono essere nocive. Infatti, potrebbero sollevare strati di polvere depositata andando a formare una nube potenzialmente esplosiva.

In ambienti aperti prevalgono fenomeni di accensione senza esplosione (fiamma) con lievi sovrappressioni.

In ambienti chiusi invece si hanno effetti esplosivi disastrosi e massimi, e si avranno soprattutto per le seguenti condizioni:

- nei contenitori sferici, con innesco posto al centro di simmetria;
- nei contenitori cilindrici, con innesco posto ad un'estremità.

Gli ambienti con provvedimenti di bonifica sono quei luoghi dove sono state prese misure preventive per la formazione di atmosfere esplosive come asportazione continua delle polveri combustibili, sistemi di contenimento in depressione delle polveri, rimozione degli strati di polvere depositati, inertizzazione dell'ambiente in cui è presente l'atmosfera esplosiva, inertizzazione delle stesse polveri o pressurizzazione dei luoghi con rischio esplosione.

### 2.9.3 Identificazione delle polveri combustibili e delle loro caratteristiche

Di seguito è riportata la definizione di "polvere" presente nella guida CEI 31-56: "*piccole particelle solide, comprendenti, fibre e residui volatili di filatura nell'atmosfera, che si depositano a causa della loro massa, ma che possono rimanere sospese in aria per un certo tempo*" [16].

Inoltre, la norma CEI 31-88 introduce la definizione di "particelle solide combustibili" come segue: "*particelle solide, comprese le fibre, di dimensioni nominali superiori a 500  $\mu\text{m}$ , che possono essere sospese nell'aria, possono depositarsi nell'atmosfera a causa del proprio peso, possono bruciare o divenire incandescenti e possono formare miscele esplosive con l'aria a pressione e temperature normali*" [21].

Una polvere seppur non crea un'atmosfera esplosiva potrebbe comunque risultare infiammabile e quindi va valutato il pericolo di incendio dello strato.

Per determinare se la polvere è combustibile si conducono delle prove in laboratorio, in cui viene misurata l'attitudine che ha la polvere a bruciare in strato. Da queste prove si ricava la temperatura minima di accensione dello strato ( $T_1$ ), e il metodo più utilizzato per la valutazione delle polveri combustibili è quello della classe di combustibilità BZ. I valori del metodo in esame sono riportati in tabella 2.9.

**Tabella 2.9.** Classe di combustibilità BZ delle polveri [5]

<b>Classe di combustibilità</b>	<b>Valutazione</b>
BZ1	La polvere non prende fuoco
BZ2	La polvere prende fuoco brevemente e poi si estingue rapidamente
BZ3	La polvere diventa incandescente (arde) localmente senza propagazione
BZ4	La polvere diventa incandescente (arde) con propagazione
BZ5	La polvere produce fuoco vivo che si propaga
BZ6	La polvere produce una combustione molto rapida

Sono da valutare con prove sperimentali anche l'esplosività di una polvere, devono dunque essere misurati, in un contenitore chiuso, la sovrappressione massima di esplosione  $p_{\text{emax}}$  e la massima velocità di aumento della pressione  $(dp/dt)_{\text{max}}$ , di cui si è discusso già nel primo capitolo. Vengono in genere considerate esplodibili

quelle polveri che, nelle prove di laboratorio, restituiscono un valore di pressione di esplosione superiore a 666 Pa, mentre pressioni inferiori sono ritenute non pericolose.

Inoltre, dalla velocità massima di aumento della pressione si ricava un parametro chiave (una costante tipica per la polvere in esame) per la futura valutazione del rischio esplosione,  $K_{st}$ . Al variare del valore della suddetta variabile, si assegna una classe di esplosione St come riportato in tabella 2.10.

**Tabella 2.10.** Classe di esplosione St delle polveri [5]

Classe di esplosione	$K_{st}$ (bar·m·s <sup>-1</sup> )	Valutazione
St 0	0	Esplosione debole, senza percezione visiva della propagazione della fiamma
St 1	> 0 fino a 200	Esplosione moderata
St 2	> 200 fino a 300	Esplosione forte
St 3	> 300	Esplosione severa (grave)

Le caratteristiche chimico-fisiche delle polveri da prendere in considerazione per la loro esplosività sono le seguenti:

- combustibilità;
- esplosività;
- grandezza media delle particelle e granulometria;
- contenuto di umidità e di inertizzanti;
- campo di esplosività (LEL – UEL);
- temperatura di accensione della nube e dello strato di polvere;
- energia minima di accensione;
- resistività elettrica della polvere;
- densità e densità apparente;
- concentrazione limite di ossigeno in atmosfera;
- pressione nel punto di emissione.

Di seguito saranno approfondite alcune di queste che risultano essere le grandezze principali.

- Grandezza media delle particelle di polvere e granulometria

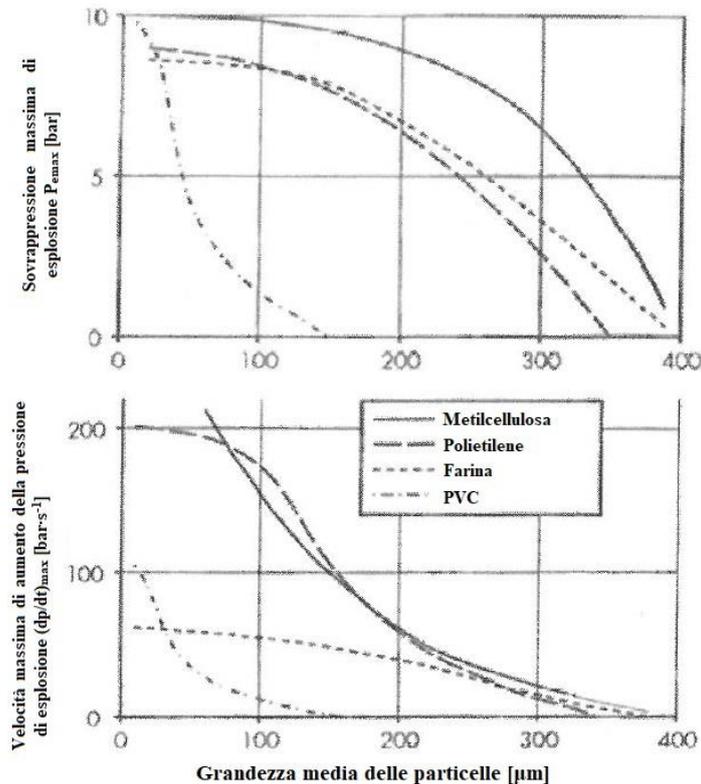
La grandezza media delle particelle è definita come la grandezza nominale delle particelle ottenuta che viene assegnata ad una polvere per caratterizzarla. Viene assegnata in seguito ad una prova pratica (setacciatura).

La granulometria è definita come la distribuzione percentuale statistica della grandezza delle particelle della polvere in esame.

La dipendenza delle caratteristiche di esplosività di una polvere è particolarmente marcata, ed in tal senso si può affermare che al diminuire della grandezza media delle particelle si avrà:

- aumento della sovrappressione massima di esplosione,  $p_{emax}$ ;
- aumento della velocità massima di aumento della pressione,  $(dp/dt)_{max}$ ;
- riduzione dell'energia minima di accensione, MIE;
- riduzione del limite inferiore di esplosività. LEL.

In seguito a prove in laboratorio si può inoltre affermare che nubi con particelle di dimensione superiore ai 500  $\mu\text{m}$  non risultano essere esplosive. In figura 2.6 si può infatti notare che al crescere della dimensione media delle particelle diminuisce la severità dell'esplosione, ed in particolare, superata la soglia dei 500  $\mu\text{m}$  la polvere non presenta più proprietà esplosive [5].



**Figura 2.6.** Sovrappressione massima di esplosione e velocità massima di aumento della pressione in funzione della grandezza media delle particelle di polvere

Per concludere si può inoltre affermare che: un insieme di grani (grandezza media  $> 0,5$  mm) e polvere (grandezza media  $< 0,5$  mm) non risulta in genere pericoloso per la formazione di nubi esplosive, se la percentuale della polvere risulta inferiore al 15% della miscela grani + polvere + aria.

- Contenuto di umidità e di altre sostanze inertizzanti

È espressa come la quantità d'acqua per unità di massa della polvere. L'acqua contenuta in una polvere tende a creare degli agglomerati di particelle che risultano di difficile dispersione in aria, riducendo così la possibilità di formazione di una nube esplosiva. Inoltre, l'acqua aumenta la temperatura di accensione della nube stessa. Infine, l'umidità presente nella nube, fa aumentare il LEL, anche se, in genere, percentuali di umidità inferiori al 12% non influiscono sul comportamento delle nubi. Mentre quantità di umidità superiori al 30% - 50% rendono le polveri del tutto inerti. Ultima proprietà che varia col crescere dell'umidità è la resistività volumetrica delle polveri, infatti al crescere dell'umidità presente diminuisce la resistività poiché le cariche elettrostatiche vengono disperse con maggiore velocità.

Altre sostanze potrebbero avere potere inertizzante come ad esempio altre polveri. La presenza di polveri inerti nella polvere esplosiva viene considerato come un provvedimento di inertizzazione e in tal senso agiscono in uno dei seguenti modi:

- inibiscono l'esplosione;
- sottraggono calore di combustione;
- interferiscono con i processi di accensione e di propagazione della fiamma.

Tra le più comuni polveri inerti troviamo: carbonato di calcio, cloruro di sodio, solfato di calcio, bicarbonato di sodio e le polveri di roccia in generale.

- Campo di esplosività (LEL – UEL)

Per le polveri questi limiti risultano di non immediata utilizzazione, infatti la concentrazione delle polveri nell'ambiente in esame può variare molto e localmente. In genere tali limiti sono espressi in termini di massa di polvere per unità di volume di ambiente pericoloso, cioè  $\text{g}/\text{m}^3$ .

Solitamente risulta molto difficile avere una concentrazione di polveri molto elevata all'interno degli ambienti in esame, questo, unito alla difficoltà nel calcolo sperimentale di UEL, consente di trascurare quest'ultimo e quindi risulta utile per la valutazione solamente il LEL.

Il LEL rappresenta la quantità minima di polvere per unità di volume considerato, che è in grado, se innescata, di accendersi e di propagare la fiamma. Se si è in presenza di miscele gas – polvere, risulta molto complesso il calcolo del LEL e bisogna considerare un valore più basso rispetto a quello che si ricava da valutazioni sperimentali puntuali.

- Temperatura di accensione della nube,  $T_{cl}$ ; e dello strato di polvere,  $T_1$

È definita temperatura minima di accensione della nube ( $T_{cl}$ ), la minima temperatura della parete interna calda di un forno, in cui si verifica l'innescò (accensione spontanea) di una nube di polvere presente nell'aria in esso contenuta.

È definita temperatura minima di accensione dello strato di polvere ( $T_1$ ), la minima temperatura di una superficie calda, alla quale si ha l'innescò di uno strato di polvere di spessore specificato e depositato sulla superficie in esame.

Generalmente risulta che  $T_{cl} > T_1$ . Inoltre, la presenza di inquinanti e/o additivi tende a far diminuire la temperatura minima di accensione dello strato, rispetto a quella del componente puro.

- Energia minima di accensione, MIE

È definita come la minima energia necessaria per far partire la reazione di combustione di una nube esplosiva. Questa dipende da molti fattori (natura della polvere, granulometria, ventilazione, ecc.) ed è espressa in mJ.

- Resistività elettrica

Le polveri hanno una conducibilità elettrica intrinseca che influisce sulle caratteristiche dielettriche dell'atmosfera in cui è dispersa. Solitamente le polveri sono suddivise in due classi:

- polveri conduttrici, con resistività minore o uguale a  $10^3 \Omega m$ ;
- polveri non conduttrici, con resistività maggiore di  $10^3 \Omega m$ .

La polvere potrebbe risultare pericolosa se conducibile qualora dovesse accumularsi all'interno di custodie di prodotti elettrici.

- Concentrazione limite di ossigeno in atmosfera, LOC

È definita come la concentrazione di ossigeno massima ammessa in una miscela di aria, gas inerte e polvere combustibile, entro la quale non può avvenire l'esplosione in determinate condizioni di prova. Espressa in vol%. Al crescere di questo parametro si osserva: diminuzione delle temperature minime di accensione, aumento della sovrappressione massima di esplosione, maggiore velocità di propagazione della fiamma, maggiore facilità di autoaccensione, passaggio verso fenomeni di detonazione.

- Polveri rappresentative di altre

La polvere rappresentativa sarà quella che genera le zone più estese e che restituisce la temperatura superficiale massima dei prodotti.

- Gruppo della polvere

La norma CEI 31-88 riporta la seguente classificazione:

- Gruppo III A, per particolato combustibile;
- Gruppo III B, per polvere non conduttrice;
- Gruppo III C, per polvere conduttrice.

#### 2.9.4 Individuazione delle sorgenti di emissione e del loro grado

Viene definita sorgente di emissione (SE) un punto o una parte d'impianto dalla quale può essere emessa in atmosfera una polvere combustibile, così da generare un'atmosfera esplosiva. Anche gli strati di polvere possono essere delle sorgenti di emissione.

Come già detto per i gas, anche per le polveri combustibili si hanno tre gradi di emissione:

- grado continuo: emissione continua che può avvenire frequentemente o per lunghi periodi;

- grado primo: emissione che può avvenire periodicamente durante il funzionamento normale;
- grado secondo: emissione che non è prevista durante il normale funzionamento e, se avviene, con frequenza bassa e per brevi periodi.

Tra le emissioni di grado continuo vanno considerate anche le eventuali emissioni strutturali. Infatti, queste seppur non aumentano la concentrazione della polvere in atmosfera, potrebbero causare depositi di polvere con formazione di strati.

Le emissioni di grado continuo e primo sono definibili sia come durata che come frequenza di emissione, cosa non fattibile per le emissioni di grado secondo.

Le sorgenti di emissioni per polveri combustibili sono inoltre divisibili in due gruppi, in base alla modalità di emissione della polvere stessa:

- SE per emissione di una nube di polvere;
- SE per emissione di polvere che genera uno strato.

Come già accennato anche lo strato di polvere può essere considerato come una sorgente di emissione, lo si può fare se lo strato viene sollevato dalla corrente d'aria presente nell'ambiente in esame.

Per la maggior parte delle polveri, uno strato di 0,3 mm depositato uniformemente, se disturbato da turbolenze di aria, può generare un'atmosfera esplosiva per presenza di polveri combustibili. In questo caso lo strato di polvere è da considerarsi una sorgente di emissione e il suo grado di emissione dipenderà dalla frequenza del disturbo, dal livello di mantenimento della pulizia e dal grado di emissione della SE che ha generato lo strato. In tabella 2.11 sono riportate le regole generali fornite dalla norma [16] per la determinazione del grado di emissione di uno strato di polvere.

**Tabella 2.11.** Determinazione del grado di emissione di uno strato di polvere in funzione del disturbo e dell'emissione che genera lo strato [5]

Livello della pulizia ↓	Grado della sorgente di emissione del contenitore →	Continuo o Primo	Secondo
	Disturbo dello strato	Grado di emissione dello strato	Grado di emissione dello strato
Adeguate	Frequente	Primo	Secondo
	Poco frequente	Secondo	Non è una SE
Scarso	Frequente	Continuo	Primo
	Poco frequente	Primo	Secondo

### 2.9.5 Determinazione delle sorgenti rappresentative di altre

Per la classificazione una SE risulta essere rappresentativa di altre se rappresenta il caso peggiore per:

- caratteristiche delle polveri emesse;
- caratteristiche costruttive della sorgente di emissione;
- modalità e portata di emissione;
- caratteristiche dell'ambiente nell'intorno della sorgente di emissione.

Usare la rappresentatività riduce a pochi casi le sorgenti in esame, minimizzando i tempi per i calcoli, e risulta utile se si devono esaminare molte sorgenti di emissione. Talvolta però possono sorgere delle incertezze che escludono la possibilità di ridurre il numero di sorgenti di emissione da esaminare.

### 2.9.6 Influenza della contemporaneità delle emissioni

A tal proposito si considerano le indicazioni riportate nella guida CEI 31-56:

In ambienti aperti solitamente la contemporaneità delle emissioni è trascurabile a meno che non si abbia un eccessivo raggruppamento di SE in uno spazio ristretto. La situazione cambia per gli ambienti chiusi, dove la contemporaneità va considerata e deve essere interpretata nel modo seguente:

- emissioni di grado continuo: si considerano tutte le emissioni di grado continuo, considerando tra esse anche le emissioni strutturali;
- emissioni di primo grado: per definire il grado di ventilazione, si considerano tutte le emissioni continue, più quelle di primo grado che possono essere contemporanee. Nel caso in cui risulta impossibile definire la contemporaneità delle emissioni di primo grado si fa riferimento alle linee guida proposte dalla norma e riportate in tabella 2.1;
- emissioni di grado secondo: per definire il grado di ventilazione, si considerano tutte le emissioni continue, più quelle di primo grado che possono essere contemporanee, più ciascuna emissione di secondo grado presa singolarmente.

### 2.9.7 Verifica di tipo e idoneità dei sistemi di bonifica

Un ambiente viene considerato bonificato se la concentrazione della polvere nell'atmosfera dell'ambiente in esame risulta inferiore del LEL, e inoltre lo strato di polvere che si forma risulta essere trascurabile.

Per qualsiasi provvedimento di bonifica va valutata la disponibilità che dipende da come sono realizzati e dalla loro manutenzione.

Sono attuabili diversi provvedimenti di bonifica e ognuno di questi influisce sul tipo di zona pericolosa generata.

I sistemi di bonifica saranno i seguenti:

- sistemi di asportazione delle polveri combustibili;
- sistemi di contenimento in depressione delle polveri combustibili;
- sistema di rimozione delle polveri combustibili (provvedimenti di pulizia);
- sistema di inertizzazione dell'atmosfera dell'ambiente;
- sistema di pressurizzazione del locale o dell'edificio.

### 2.9.8 Definizione del tipo di zona

Le zone pericolose dovute per presenza di polveri combustibili sono determinate da parametri differenti rispetto alle zone generate per presenza di gas, polveri o nebbie infiammabili. Infatti, per la definizione delle zone generate per presenza di polveri combustibili vanno considerati: sorgente di emissione, strato di polvere che è anch'essa una potenziale sorgente di emissione e la presenza di provvedimenti di bonifica.

La norma CEI 31-88 riporta la seguente suddivisione in zone:

- zona 20: luogo in cui l'atmosfera esplosiva è presente continuamente o per lunghi periodi o frequentemente;
- zona 21: luogo in cui l'atmosfera esplosiva è probabile che sia presente durante il funzionamento normale;
- zona 22: luogo in cui l'atmosfera esplosiva non è probabile che sia presente durante il funzionamento normale.

Il tipo di zona è univocamente determinato dal grado di emissione, infatti in generale un'emissione di grado continuo genera una zona di tipo 20, emissioni di grado primo generano zone di tipo 21, ed infine, emissioni di grado secondo generano zone di tipo 22. Questa corrispondenza può essere però alterata dalla presenza di provvedimenti di bonifica.

Il tipo di zona pericolosa è dunque determinato tenendo in considerazione: grado di emissione, grado del sistema di bonifica, e la sua disponibilità.

### 2.9.9 Determinazione dell'estensione della zona pericolosa

Rappresenta la distanza in tutte le direzioni, a partire dal bordo della sorgente di emissione, oltre la quale la concentrazione della polvere nell'atmosfera risulta essere inferiore del LEL.

Come per i gas, polveri e nebbie infiammabili, anche per le polveri combustibili questa grandezza ( $d_z$ ) fornisce un'idea sull'ordine di grandezza dell'estensione della zona pericolosa. Mentre la reale estensione è rappresentata dalla quota "a".

- Estensione della zona pericolosa all'interno di sistemi di contenimento

La zona generata sarà una zona 20 di estensione pari a tutto il volume del sistema di contenimento.

- Estensione della zona pericolosa all'esterno di sistemi di contenimento

In questo caso si ha una forte dipendenza da alcuni parametri: caratteristiche della polvere combustibile, caratteristiche del sistema di contenimento, caratteristiche e disposizione della sorgente di emissione, ed infine caratteristiche dell'ambiente in esame.

Generalmente le zone pericolose si estendono verso il basso, a partire dall'intorno della sorgente di emissione fino ad arrivare alla superficie di deposito.

- Estensione della zona pericolosa in ambienti aperti ed all'esterno di sistemi di contenimento

In questi casi "dz" ed "a" risultano essere inferiori a quelli che si avrebbero in ambienti chiusi. Inoltre se sono verificate le seguenti condizioni: portata di emissione ( $Q_d$ ) piccola, emissione ad altezza molto alta rispetto la superficie di deposito (in genere per altezze maggiori o uguali ai 10 m) e turbolenze del vento in grado di diluire la nube in caduta; allora si può considerare che la zona pericolosa si estende verso la direzione verticale, verso il basso, per una distanza inferiore a 5 volte la quota "a".

- Estensione della zona pericolosa in ambienti chiusi ed all'esterno di sistemi di contenimento

In questi casi vanno considerate una o più zone pericolose generate, che possono interessare o solamente una parte di ambiente in prossimità della sorgente di emissione (campo vicino) o l'intero volume dell'ambiente in esame ( $V_a$ ) (campo lontano).

Il calcolo dettagliato della loro estensione verrà analizzato in seguito.

- Zone pericolose di estensione trascurabile

In tal senso la guida CEI 31-56 fornisce alcune linee guida per la valutazione delle zone di estensione trascurabile in relazione al volume di atmosfera potenzialmente esplosiva generato.

Per ambiente aperto:

- zona 20 se  $< 1 \text{ dm}^3$ ;
- zona 21 se  $< 10 \text{ dm}^3$ ;
- zona 22 se  $< 100 \text{ dm}^3$ .

Per ambiente chiuso:

- zona 20 se  $< 1 \text{ dm}^3$ ;
- zona 21 se  $< 10 \text{ dm}^3$ ;
- zona 22 se  $< 100 \text{ dm}^3$ ;
- deve inoltre essere verificata la condizione, valida per tutte le zone, per cui il volume pericoloso di atmosfera esplosiva deve risultare  $< 1/10000$  del volume dell'ambiente in esame.

### 2.9.10 Valutazione della formazione di strati di polvere fuori del sistema di contenimento e definizione del tipo di zona pericolosa generata

Lo strato di polvere, essendo una potenziale sorgente di emissione, deve essere definito per estensione e tipo di zona pericolosa generata.

Se la polvere si deposita su superfici calde formando lo strato, questo tenderà a far crescere la temperatura dello stesso fino ad arrivare alla temperatura minima di accensione dello strato causando una combustione che, dipendentemente dalla granulometria della polvere, può sollevare parte dello strato generando una nube potenzialmente esplosiva.

L'estensione della zona pericolosa generata dalla formazione di uno strato di polvere avrà un'estensione in pianta almeno pari alla sezione in pianta del sistema di contenimento in cui si trova la polvere.

Il tipo di zona generata sarà una funzione di: frequenza con cui viene disturbato lo strato, livello di mantenimento della pulizia, ed infine grado della SE che genera lo strato.

- Se la pulizia dello strato ha livello di mantenimento buono, allora la zona pericolosa dovuta allo strato di polvere ha estensione trascurabile e lo strato di polvere risulta essere irrilevante.

- Se la pulizia dello strato ha livello di mantenimento adeguato, allora si determina il tipo di zona pericolosa generata dipendentemente da disturbo dello strato e grado di emissione della SE, come riportato in tabella 2.12.

**Tabella 2.12.** Zone pericolose determinate da uno strato, in base al disturbo dello stesso, al grado di emissione della SE e al livello di pulizia imposto adeguato [5]

Disturbo dello strato	Grado di emissione della SE del contenitore	
	Continuo o Primo	Secondo
Poco frequente	Zona 22	Zona non pericolosa
Frequente	Zona 21	Zona 22

- Se la pulizia dello strato ha livello di mantenimento scarso, allora si determina il tipo di zona pericolosa generata dipendentemente da disturbo dello strato e grado di emissione della SE, come riportato in tabella 2.13.

**Tabella 2.13.** Zone pericolose determinate da uno strato, in base al disturbo dello stesso, al grado di emissione della SE e al livello di pulizia imposto scarso [5]

Disturbo dello strato	Grado di emissione della SE del contenitore	
	Continuo o Primo	Secondo
Poco frequente	Zona 21	Zona 22
Frequente	Zona 20	Zona 21

### 2.9.11 Determinazione dell'estensione della zona pericolosa generata da strati di polvere

Si deve ancora fare distinzione tra ambiente aperto ed ambiente chiuso.

In ambienti aperti parleremo solo di estensione in campo vicino con la relativa distanza pericolosa “ $d_{zs}$ ” e la quota “ $a_s$ ”. Quest’ultima è calcolabile con la formula 2.42:

$$a_s \geq k \cdot d_{zs} = k \cdot (d_0 + d_h) \cdot k_d \cdot k_u \cdot k_{ta} \cdot k_w \quad (2.42)$$

dove:

- $a_s$  Effettiva estensione della zona pericolosa generata dallo strato di polvere, espressa in m
- $k$  Costante con valore assegnato a discrezione del tecnico incaricato per la valutazione (1,1 valore consigliato)
- $d_{zs}$  Distanza pericolosa dalla sorgente di emissione, espressa in m
- $d_0$  Distanza di riferimento, espressa in m
- $d_h$  Distanza aggiuntiva dipendente dall’altezza della SE, espressa in m
- $k_d$  Coefficiente che dipende dal rapporto tra  $Q_d$  della SE e il LEL della polvere considerata
- $k_u$  Coefficiente relativo all’umidità presente nella polvere
- $k_{ta}$  Coefficiente relativo all’ambiente considerato
- $k_w$  Coefficiente che dipende da velocità dell’aria attorno alla SE “ $w$ ” e dalla velocità di sedimentazione “ $u_t$ ”

La formula (2.42) è valida per qualsiasi sorgente di emissione e per lo strato di polvere assumendo che:

- $d_0=1$  m strato a pressione atmosferica;
- $d_h=0$  m altezza tra strato e superficie di deposito risulta minore di 3 m;
- $k_d=1$  per essere a vantaggio della sicurezza.

La formula (2.42) possiamo ridurla alla (2.43):

$$a_s \geq k \cdot (k_u \cdot k_{ta} \cdot k_w) \quad (2.43)$$

In ambienti chiusi bisogna prima valutare la concentrazione della polvere combustibile per poter stabilire se la zona pericolosa si estende per un volume dell'ambiente nell'intorno dello strato o se si estende a tutto il volume dell'ambiente considerato. Si ottiene che:

- se la concentrazione della nube supera il 50% di LEL, la zona pericolosa si considera estesa a tutto il volume;
- se la concentrazione della nube non supera la suddetta soglia, la zona pericolosa può essere considerata solo in un intorno dello strato di polvere; in caso di dubbia determinazione allora si considera il volume pericoloso l'intero volume dell'ambiente in esame e favore della sicurezza.

La concentrazione della nube la si può ricavare con l'utilizzo della formula (2.44):

$$C = \rho_{apparente} \cdot \frac{s}{H} \quad (2.44)$$

dove:

C	Concentrazione della polvere nella nube, espressa in g/m <sup>3</sup>
P <sub>apparente</sub>	Densità apparente dello strato, espressa in Kg/m <sup>3</sup>
s	Spessore dello strato, espresso in mm
H	Altezza dell'ambiente in esame, espressa in m

## 2.10 Calcolo della portata di emissione di una polvere combustibile

Come accennato, il calcolo della portata di emissione di polveri Q<sub>d</sub> non è di facile definizione analitica, dunque per il calcolo bisogna utilizzare analisi pratiche per i casi specifici se si tratta di emissioni di grado primo o continuo. Per emissioni di grado secondo invece la valutazione avviene con considerazioni di tipo ingegneristico, e l'esperienza dell'addetto designato alla valutazione diventa un punto chiave per una corretta valutazione.

Nella guida CEI 31-56 viene però riportato un metodo per la valutazione della portata di emissione per emissioni di secondo grado. In questo caso si fanno delle valutazioni sulla portata totale di processo in prossimità della sorgente di emissione (P<sub>p</sub>). Nella tabella 2.14 è possibile apprezzare le suddette valutazioni.

**Tabella 2.14.** Stima di Q<sub>d</sub> in funzione di P<sub>p</sub>, in corrispondenza della SE [5]

Valutazione della portata di emissione Q <sub>d</sub>	Valore della portata di emissione Q <sub>d</sub> da assumere
Grande	30% di P <sub>p</sub>
Media	5% di P <sub>p</sub>
Piccola	1% di P <sub>p</sub>

## 2.11 Grado e disponibilità di un sistema di asportazione delle polveri

Si tratta di sistemi in grado di asportare automaticamente le polveri emesse in prossimità delle sorgenti di emissione generalmente di grado continuo o primo. Questi possono essere considerati provvedimenti di bonifica.

Questi sistemi di asportazione sono principalmente dimensionati per limitare l'estensione della zona pericolosa a volumi di estensione trascurabile (volume compreso tra la SE e la bocca di aspirazione).

Per il calcolo della portata di aspirazione minima richiesta bisogna dimensionare il sistema di asportazione in modo tale che riesca a catturare interamente la polvere combustibile emessa dalla sorgente di emissione.

La portata di aspirazione dipende da:

- grado e portata di emissione della sorgente di emissione;
- proprietà della polvere;
- dimensioni della sorgente di emissione;
- caratteristiche della bocca di aspirazione (dimensione e forma);
- distanza massima di aspirazione delle polveri;
- velocità di aspirazione;
- portata minima di aspirazione che consente di catturare la totalità della polvere emessa.

Per questi sistemi di bonifica, si misura la loro efficacia in base alla loro disponibilità e al loro grado di efficacia.

### 2.11.1 Grado di efficacia del sistema di asportazione delle polveri

Nella guida CEI 31-56 sono riportati i seguenti livelli di grado di efficacia:

- ALTO: il sistema riesce a ridurre la concentrazione di polvere in aria in modo praticamente istantaneo al di sotto del LEL;
- MEDIO: il sistema non riesce a ridurre la concentrazione di polvere in aria al di sotto del LEL nell'intorno della SE, ma è in grado di asportare l'intera polvere che viene emessa da questa, in dipendenza del grado di emissione della SE per il quale è stato dimensionato il sistema e quando l'atmosfera esplosiva non persiste per molto tempo dopo il termine dell'emissione;
- BASSO: il sistema non riesce a ridurre la concentrazione di polvere in aria al di sotto del LEL nell'intorno della SE, non è inoltre in grado di asportare l'intera polvere emessa dalla SE considerando il grado di emissione per cui è stato dimensionato il sistema e/o quando l'atmosfera esplosiva persiste per lungo tempo dopo il termine dell'emissione.

### 2.11.2 Disponibilità del sistema di asportazione delle polveri

Nella guida CEI 31-56 vengono considerati tre livelli di disponibilità:

- Buona: asportazione continua in pratica con continuità;
- Adeguata: asportazione presente durante il normale funzionamento;
- Scarsa: asportazione che non risponde ai requisiti di buona o adeguata.

## *2.12 Efficacia di un sistema di contenimento in depressione delle polveri*

Il sistema è dimensionato per mantenere l'interno dei contenitori delle polveri in leggera depressione rispetto all'ambiente esterno.

La depressione minima da mantenere deve essere di almeno 5 Pa rispetto all'atmosfera dell'ambiente esterno.

Tale sistema va progettato tenendo presente stato e tipo di sostanza contenuta al suo interno, e tipo di apparecchi installati all'interno del sistema di contenimento in depressione e dell'eventuale fabbisogno di aria a loro necessario.

### 2.12.1 Disponibilità del sistema di contenimento in depressione delle polveri

Nella guida CEI 31-56 vengono considerati tre livelli di disponibilità:

- Buona: depressione presente con continuità;
- Adeguata: depressione presente durante il funzionamento normale;
- Scarsa: depressione che non risponde ai requisiti di buona o adeguata.

## *2.13 Efficacia di un sistema di rimozione degli strati di polvere*

La pulizia delle superfici risulta valida quando ne viene definito il livello di efficacia. Un provvedimento del genere risulta efficace se questa fa parte di procedure di lavoro presenti nelle disposizioni aziendali.

Essendo quindi una disposizione aziendale, gli addetti alle pulizie devono essere a conoscenza dello scopo di tale provvedimento.

La pulizia riguarda tutte le superfici di deposito che vanno dal pavimento, alle superfici potenziali di deposito ma anche, in particolar modo, tutte quelle superfici, difficili da vedere o non facilmente accessibili, nelle quali possono depositarsi considerevoli quantità di polveri nel tempo.

È inoltre necessario redigere un piano di mantenimento della pulizia degli ambienti nel quale dovranno essere indicati i luoghi soggetti a pulizia ordinaria, deve essere scelto preferenzialmente un livello di mantenimento Buono, e dovranno essere illustrate tutte le modalità di pulizia, mezzi, attrezzature e sostanze che saranno utilizzati, in dipendenza della pericolosità dei singoli ambienti.

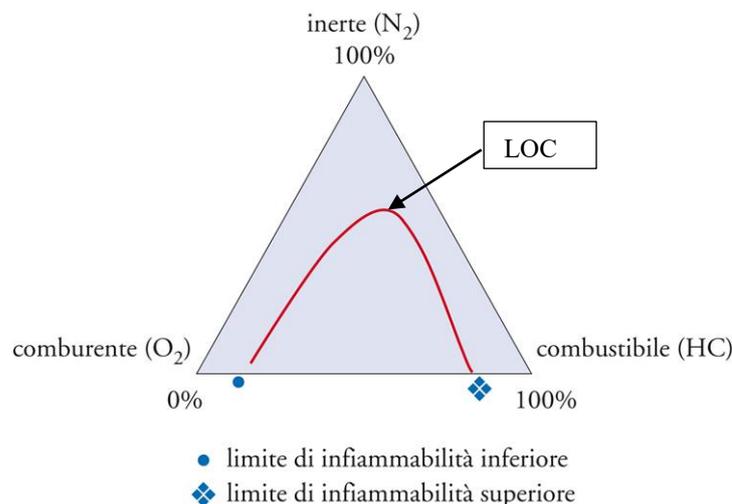
### 2.13.1 Livelli di efficacia del sistema di rimozione delle polveri

Nella guida CEI 31-56 vengono considerati tre livelli di efficacia:

- Buono: strati di polvere mantenuti a spessori trascurabili indipendentemente dal grado di emissione della SE, oppure sono rimossi rapidamente se si formano con poca frequenza;
- Adeguato: strati di polvere di spessore non trascurabile ma persistono per poco tempo (tempo di stazionamento inferiore ad un turno di lavoro di 8h circa);
- Scarso: strati di polvere di spessore non trascurabile e che stazionano per più di un turno di lavoro di 8h.

## 2.14 Efficacia di un sistema di inertizzazione dell'atmosfera dell'ambiente

L'atmosfera viene definita inerte quando la concentrazione della polvere esplosiva esce fuori dai limiti di esplosività della polvere in esame. Questo provvedimento può essere fatto riducendo la presenza di ossigeno presente nell'atmosfera esplosiva. Infatti, al calare della quantità di ossigeno il LEL si alza (anche se la sua variazione risulta poco marcata) e il UEL si abbassa (con dipendenza più marcata rispetto al LEL) fino ad incontrare il limite superiore del LEL ad un valore di concentrazione di combustibile al di sotto del quale non può in alcun modo avvenire la reazione di combustione. Questo effetto lo si può apprezzare nella figura 2.7.



**Figura 2.7.** Campo di esplosività di una sostanza in funzione della concentrazione di ossigeno a T e P fissate.

La concentrazione limite di ossigeno cambia da polvere a polvere e dipende anche dall'inerte utilizzato. Nella tabella 2.15 sono riportati i valori di LOC per alcune polveri, utilizzando l'azoto come inerte.

L'inertizzazione è solitamente fatta inviando un flusso continuo di gas inerte nell'ambiente da inertizzare. Di solito la quantità di gas inerte necessaria (in volume) è pari a 4 – 5 volte il volume libero interno.

**Tabella 2.15.** Concentrazione volumetrica massima di ossigeno per prevenire l'innesco di nubi esplosive per presenza di polveri combustibili, con utilizzo di azoto come inerte

<b>Polvere</b>	<b>Dimensione media delle particelle <math>\mu\text{m}</math></b>	<b>Percentuale di ossigeno</b>
Alluminio	22	5
Carbone	17	14
Farina di grano	60	11
Gomma sintetica	95	11
Polietilene	26	10
Segatura	27	10
Zolfo	30	7

#### 2.14.1 Affidabilità e disponibilità del sistema di inertizzazione dell'atmosfera dell'ambiente

Sono dei sistemi di protezione contro le esplosioni e devo possedere dei requisiti:

- efficacia controllata e sorvegliata;
- manutenzione rivolta a mantenere le condizioni di inertizzazione;
- provvedimenti immediati in caso di interruzione dell'inertizzazione.

L'affidabilità di questi sistemi è direttamente collegata alla disponibilità e alle sue caratteristiche costruttive, tra le quali avrà particolare attenzioni il sistema di controllo di concentrazione di ossigeno.

Nella guida CEI 31-56 vengono considerati tre livelli di disponibilità, analoghi a quelli utilizzati per i sistemi in depressione:

- Buona: inertizzazione presente con continuità;
- Adeguata: inertizzazione presente durante il funzionamento normale;
- Scarsa: inertizzazione che non risponde ai requisiti di buona o adeguata.

La presenza del sistema di inertizzazione deve essere adeguatamente indicata.

### 2.15 Efficacia di un sistema di pressurizzazione per locale o edificio

Il provvedimento di pressurizzazione può essere attuato in due modi:

- pressurizzazione con compensazione delle perdite: pressurizzazione attuata tramite l'introduzione di una quantità di aria sufficiente alla sola compensazione delle fughe dal locale (o dai condotti), in condizioni in cui tutte le aperture risultino chiuse;
- pressurizzazione con circolazione continua di aria di protezione (pressoventilazione): la pressione all'interno del locale viene mantenuta ad un valore leggermente superiore alla pressione esterna, ottenuta introducendo aria nel locale

La pressurizzazione così creata deve assicurare una pressione interna del locale di almeno 5 Pa superiore alla pressione dell'ambiente esterno, considerando che tutte le porte e le finestre siano chiuse.

Nella progettazione del sistema di pressurizzazione bisogna tener conto del numero di persone che in media risulta presente nel locale per poter assicurare un corretto ricambio d'aria, e inoltre si devono considerare tutti gli apparecchi e gli strumenti presenti nel locale e che necessitano di aria di raffreddamento.

Tutte le uscite del locale pressurizzato devono indicare la presenza di questo tipo di locale in modo adeguato.

#### 2.15.1 Disponibilità del sistema di pressurizzazione per locale o edificio

Nella guida CEI 31-56 vengono considerati tre livelli di efficacia:

- Buona: pressurizzazione attiva con continuità;
- Adeguata: pressurizzazione attiva durante il funzionamento normale
- Scarsa: pressurizzazione che non risponde ai requisiti di buona o adeguata.

## 2.16 Determinazione del tipo di zona pericolosa in base a grado di emissione e presenza di un sistema di bonifica

Come per le zone pericolose generate da gas, vapori o nebbie infiammabili, anche in questo caso si ha una dipendenza biunivoca tra grado dell'emissione e tipo di zona generata. Dunque, se non è presente alcun provvedimento di bonifica allora il tipo di zona dipende solamente dal tipo di ambiente in esame e dal grado di emissione della SE come schematizzato nella tabella 2.16.

**Tabella 2.16.** Zone pericolose senza provvedimenti di bonifica [5]

Ambiente	Grado di emissione della SE		
	Continuo	Primo	Secondo
Aperto	Zona 20	Zona 21	Zona 22
Chiuso	Zona 20 + Zona 22	Zona 21 + Zona 22	Zona 22

Se sono presenti dei provvedimenti di bonifica la situazione cambia in base al tipo di provvedimento preso

### 2.16.1 Zone pericolose in presenza di un sistema di asportazione delle polveri

In questo caso per la valutazione della zona pericolosa si devono considerare:

- grado dell'asportazione, cioè la portata minima di aspirazione richiesta per prevenire la formazione di un'atmosfera esplosiva;
- disponibilità del sistema;
- grado dell'emissione dalla SE.

Le zone valutate all'esterno del volume di atmosfera compresa tra il sistema di asportazione e la sorgente di emissione (cono di aspirazione), secondo la guida CEI 31-56 appendice C, si ricavano dalla tabella 2.17.

**Tabella 2.17.** Zone pericolose esterne al cono di aspirazione, determinate in presenza di un sistema di aspirazione delle polveri

Grado della emissione	Grado di asportazione della polvere						
	Alto			Medio			Basso
	Disponibilità di asportazione della polvere						
	Buona	Adeguate	Scarsa	Buona	Adeguate	Scarsa	Buona, Adeguata o Scarsa
Continuo	Zona 20 NE	Zona 20 NE + Zona 22 <sup>(1)</sup>	Zona 20 NE + Zona 21 <sup>(2)</sup>	Zona 20	Zona 20 + Zona 22 <sup>(1)</sup>	Zona 20 + Zona 21 <sup>(2)</sup>	Non considerato
Primo	Zona 21 NE	Zona 21 NE + Zona 22 <sup>(1)</sup>	Zona 21 NE + Zona 22 <sup>(2)</sup>	Zona 21	Zona 21 + Zona 22 <sup>(1)</sup>	Zona 21 + Zona 22 <sup>(2)</sup>	Non considerato
Secondo	Zona 22 NE	Zona 22 NE	Zona 22 <sup>(2)</sup>	Zona 22	Zona 22 <sup>(1)</sup>	Zona 22 <sup>(2)</sup>	Non considerato

(1) è prevista la formazione di strati di polvere di spessore in genere inferiore a 5 mm

(2) è prevista la formazione di strati di polvere di spessore in genere maggiore a 5 mm, da valutare caso per caso

Le zone all'interno del cono di aspirazione saranno invece determinate con l'aiuto della tabella 2.18, anch'essa ricavata dalla guida CEI 31-56 appendice C. Queste dipendono dalla disponibilità del sistema e dal grado di emissione della SE.

**Tabella 2.18.** Zone pericolose interne al cono di aspirazione, determinate in presenza di un sistema di aspirazione delle polveri

Disponibilità del sistema	Grado di emissione della SE		
	Continuo	Primo	Secondo
Buona	Zona 20	Zona 21	Zona 22
Adeguata	Zona 20	Zona 21	Zona 22

Se il sistema presenta un livello di disponibilità scarso, allora si procede alla determinazione della zona pericolosa considerando il sistema in esame come se non fosse presente.

### 2.16.2 Zone pericolose in presenza di un sistema di contenimento in depressione delle polveri

Le zone generate dipendono da disponibilità del sistema e dal grado di emissione della SE. In questo caso non serve fare una distinzione tra ambiente aperto o chiuso. La valutazione è presente in tabella 2.19

**Tabella 2.19.** Zone pericolose determinate in presenza di un sistema di contenimento in depressione delle polveri

Grado della emissione	Disponibilità del sistema di contenimento in depressione		
	Buona	Adeguata	Scarsa
Continuo	Zona 20 NE	Zona 20 NE + Zona 22 <sup>(1)</sup>	Zona 20 NE + Zona 21 <sup>(2)</sup>
Primo	Zona 21 NE	Zona 21 NE + Zona 22 <sup>(1)</sup>	Zona 21 NE + Zona 22 <sup>(2)</sup>
Secondo	Zona 22 NE	Zona 22 NE	Zona 22 <sup>(2)</sup>

(1) è prevista la formazione di strati di polvere di spessore in genere inferiore a 5 mm

(2) è prevista la formazione di strati di polvere di spessore in genere maggiore a 5 mm, da valutare caso per caso

### 2.16.3 Zone pericolose in presenza di un sistema di pressurizzazione di un locale o di un edificio

Le zone generate dipendono da disponibilità del sistema e dalla zona presente all'esterno del locale o edificio in esame. La valutazione è presente in tabella 2.20.

**Tabella 2.20.** Zone pericolose determinate in presenza di un sistema di pressurizzazione di un locale o di un edificio

Zona pericolosa all'esterno del locale o edificio	Disponibilità del sistema di pressurizzazione del locale o edificio		
	Buona	Adeguata	Scarsa
Zona 20	Zona 22	Zona 21 <sup>(1)</sup>	Zona 20 <sup>(2)</sup>
Zona 21	Zona non pericolosa	Zona 22 <sup>(1)</sup>	Zona 21 <sup>(2)</sup>
Zona 22	Zona non pericolosa	Zona non pericolosa <sup>(1)</sup>	Zona 22 <sup>(2)</sup>

(1) è prevista la formazione di strati di polvere di spessore in genere inferiore a 5 mm

(2) è prevista la formazione di strati di polvere di spessore in genere maggiore a 5 mm, da valutare caso per caso

## 2.17 Calcolo della distanza pericolosa “d<sub>z</sub>” e della quota “a”

La guida CEI 31-56 propone un metodo per il calcolo di d<sub>z</sub> ma sarà il tecnico incaricato alla classificazione che deciderà se tale metodo risulta applicabile o meno.

Quando la distanza pericolosa “d<sub>z</sub>” risulta essere inferiore al metro allora la quota “a” sarà opportunamente assunta pari a 1 m.

La quota “a”, come già accennato, dovrà risultare maggiore o uguale alla distanza pericolosa “d<sub>z</sub>”, pertanto per il calcolo di “a” si utilizza la formula (2.45):

$$a \geq k \cdot d_z \quad (2.45)$$

dove:

- a Effettiva estensione della zona pericolosa originata da una SE, espressa in m
- k Costante con valore > 1 a discrezione del tecnico incaricato, solitamente uguale a 1,1
- d<sub>z</sub> Distanza pericolosa dalla sorgente di emissione, espressa in m

La distanza pericolosa “d<sub>z</sub>” sarà calcolata con la formula (2.46):

$$d_z = (d_0 + d_h) \cdot k_d \cdot k_u \cdot k_{ta} \cdot k_w \quad (2.46)$$

dove:

- d<sub>0</sub> Distanza di riferimento, espressa in m
- d<sub>h</sub> Distanza aggiuntiva dipendente dall'altezza della SE, espressa in m
- k<sub>d</sub> Coefficiente che dipende dal rapporto tra Q<sub>d</sub> della SE e il LEL della polvere considerata
- k<sub>u</sub> Coefficiente relativo all'umidità presente nella polvere
- k<sub>ta</sub> Coefficiente relativo all'ambiente considerato
- k<sub>w</sub> Coefficiente che dipende da velocità dell'aria attorno alla SE “w” e dalla velocità di sedimentazione “u<sub>t</sub>”

### 2.17.1 Distanza di riferimento d<sub>0</sub>

La distanza di riferimento d<sub>0</sub> dipende da alcuni fattori, riassunti nel grafico in figura 2.8 per il calcolo di d<sub>0</sub>:

- velocità di emissione della polvere dal sistema di contenimento (se la velocità di emissione è bassa, cioè per emissioni a pressione atmosferica, allora d<sub>0</sub> = 1 m);
- velocità dell'aria (due curve: una per w ≤ 0,5 m/s e la seconda per w = 2 m/s);
- grandezza media delle particelle.

Le curve ricavate sono considerate per distanze della sorgente di emissione rispetto alla superficie di deposito inferiori ai 3 m.

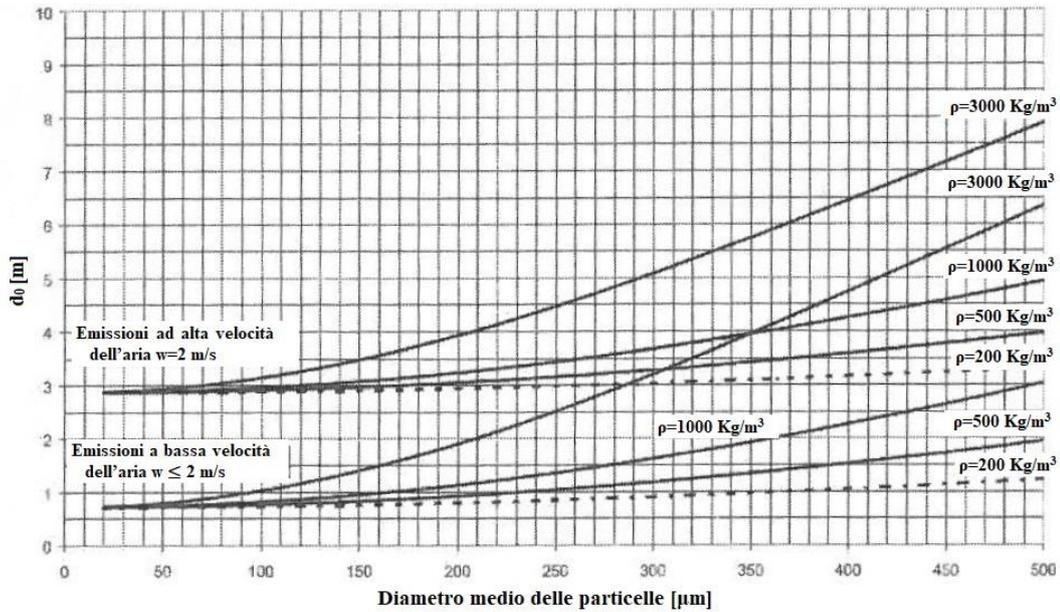


Figura 2.8. Distanza di riferimento  $d_0$  per sistemi in pressione

### 2.17.2 Distanza addizionale $d_h$

Distanza che va aggiunta a  $d_0$  qualora la sorgente di emissione non si trova ad una distanza, rispetto alla superficie di deposito, inferiore o uguale ai 3 m.

I valori di  $d_h$  sono forniti dalla guida CEI 31-56 e si trovano tabellati in tabella 2.21.

Tabella 2.21. Distanza addizionale  $d_h$

$d_h$ (m)	Condizione
1	se $h \geq 20$ m
0,5	se $20 \text{ m} > h > 3 \text{ m}$
0	se $h \leq 3 \text{ m}$

### 2.17.3 Coefficiente $k_d$

Questo coefficiente è funzione di:

- LEL della sostanza in esame, espresso in  $\text{g/m}^3$ ;
- portata di emissione  $Q_d$ , espressa in  $\text{Kg/s}$ ;
- velocità di sedimentazione  $u_t$ , espressa in  $\text{m/s}$ ;
- distanza di riferimento  $d_0$ , espressa in m.

Si ricava con la tabella 2.22.

Tabella 2.22. Valori del coefficiente  $k_d$

$k_d$	Condizione
0,5	Se $\frac{LEL \cdot 10^{-3} \cdot u_t \cdot d_0^2}{2 \cdot Q_d} > 10$
1	Se $\frac{LEL \cdot 10^{-3} \cdot u_t \cdot d_0^2}{2 \cdot Q_d} \leq 10$

La velocità di sedimentazione la si può invece ricavare con la formula (2.47):

$$u_t = \frac{\rho \cdot (d_m \cdot 10^{-6})^2 \cdot g}{18 \cdot \mu} \quad (2.47)$$

dove:

- $u_t$  Velocità di sedimentazione della polvere, espressa in m/s
- $\rho$  Densità assoluta della polvere, espressa in Kg/m<sup>3</sup>
- $d_m$  Grandezza media delle particelle, espressa in  $\mu\text{m}$
- $g$  Accelerazione di gravità, espressa in m/s<sup>2</sup>
- $\mu$  Coefficiente di viscosità dinamica dell'aria, espresso in Ns/m<sup>2</sup>

#### 2.17.4 Coefficiente $k_u$

È funzione solamente della percentuale di umidità contenuta nella polvere. Lo si ricava con la tabella 2.23.

**Tabella 2.23.** Valori del coefficiente  $k_u$

Contenuto di umidità della polvere	Campo di variazione di $k_u$	Valore di $k_u$ consigliato
Dal 40% al 50%	da 0,3 a 0,5	0,3
Dal 12% al 40%	da 0,5 a 1	0,8
Inferiore al 12%	da 1 a 1,2	1

#### 2.17.5 Coefficiente $k_{ta}$

È funzione solamente del tipo di ambiente in cui si disperde la polvere. Lo si ricava con la tabella 2.24.

**Tabella 2.24.** Valori del coefficiente  $k_{ta}$

Tipo di ambiente	Campo di variazione di $k_{ta}$	Valore di $k_{ta}$ consigliato
Aperto	da 0,5 a 0,7	0,5
Aperto con ostacoli	da 0,7 a 1	0,8
Chiuso	da 1 a 1,2	1

#### 2.17.6 Coefficiente $k_w$

È funzione della velocità dell'aria nell'intorno della SE  $w$  e della velocità di sedimentazione  $u_t$ . Lo si ricava con la tabella 2.25.

**Tabella 2.25.** Valori del coefficiente  $k_w$

$k_w$	Condizione
3	Se $\frac{w}{u_t} > 5$
2	Se $5 > \frac{w}{u_t} > 3$
1	Se $\frac{w}{u_t} \leq 3$



### 3. Sorgenti d'innescio

Per fare avvenire la reazione di combustione non basta solamente che la sostanza infiammabile sia dispersa omogeneamente nell'atmosfera e che rientri nei limiti di infiammabilità, infatti oltre a questa condizione la reazione per andare avanti necessita di una fonte di energia che scalda un volume critico di miscela e faccia iniziare così una reazione a catena. La fonte d'innescio dunque deve possedere una determinata temperatura e deve essere in grado di sprigionare una quantità di energia sufficiente.

Le sorgenti d'innescio possono avere origine diversa: meccanica, elettrica, chimica, termica, ottica, fisica, biologica. Queste possono essere in genere suddivise in categorie:

- innescio per accensione diretta: quando si ha contatto diretto tra sorgente d'innescio e la miscela esplosiva (lampade a resistenza, scintille generate da tagli o saldature, scariche elettrostatiche, ecc.);
- innescio per accensione indiretta: quando il calore necessario per l'innescio si trasmette tramite fenomeni di trasporto quali convezione, conduzione e irraggiamento;
- innescio per attrito: quando il calore è prodotto dall'attrito generato dallo sfregamento di due materiali (rottura violenta di materiali metallici, sfregamento di materiali ferrosi, ecc.);
- innescio per autocombustione: quando il combustibile in sé, producendo calore, surriscalda la sostanza infiammabile fino all'accensione spontanea di questa (fermentazione di vegetali, cumuli di carbone, ecc.).

La scarsa quantità di casi studiati e dati raccolti che nasce dalla necessità delle aziende a riprendere la produzione, ha fatto sì che le cause che generano gli inneschi delle miscele esplosive non sono sempre noti e ben definiti. Dunque, le poche statistiche a disposizione sono utili solo per analizzare un gran numero di fonti d'innescio "possibili".

#### 3.1 Innesco di gas e vapori infiammabili

Devono essere considerate due caratteristiche fondamentali del gas o vapore che, con l'aiuto della classificazione fatta dalla norma [18], permettono di definire il gruppo dei componenti elettrici che potranno essere installati in impianto. Queste caratteristiche sono:

- energia di accensione; da cui si ricava il gruppo del gas;
- temperatura di accensione, da cui si ricava la classe di temperatura.

Come già accennato, l'energia di accensione varia al variare della concentrazione di gas o vapore infiammabile nell'atmosfera, raggiungendo il suo valore minimo in corrispondenza della concentrazione stechiometrica tra aria e sostanza infiammabile. Si ottiene così l'energia minima di accensione (MIE).

Per molti gas i valori di MIE si aggirano intorno a 0,25 mJ, solitamente però siamo nel range 0,1 – 0,2 mJ. Però si hanno valori decisamente minori per gas altamente reattivi come l'idrogeno e l'acetilene che hanno energia minima di attivazione di circa 0,01 – 0,02 mJ.

Ogni sostanza infiammabile esplosa con comportamento differente, da questa particolarità delle sostanze nasce la classificazione in gruppi dei gas da cui verranno poi scelte le costruzioni elettriche a sicurezza più idonee per l'installazione. Queste costruzioni elettriche facenti parte del gruppo II, sono suddivise in 3 sottogruppi (II A, II B, II C) relativi al tipo di sostanza che è presente nell'ambiente in esame. Le sostanze rappresentative del gruppo II C risultano essere le più gravose.

Per le miscele di gas o vapori il gruppo deve essere riferito alla miscela in questione; in mancanza di dati sulla miscela si considera il gruppo più severo tra tutte le sostanze presenti nella miscela, verranno però esclusi i gas o vapori presenti in quantità minime (solitamente inferiori al 5% in volume).

A loro volta le costruzioni elettriche sono classificate con classi di temperatura che sta ad indicare la temperatura superficiale massima che può raggiungere quella costruzione e che non deve essere superiore alla temperatura di accensione del gas o vapore infiammabile presente nell'atmosfera esplosiva. Le classi di temperatura sono riportate nella tabella 3.1 e i valori sono presi dalla norma [18].

**Tabella 3.1.** Relazione tra temperatura di accensione di gas o vapori e classe di temperatura dell'apparecchiatura

Classe di temperatura richiesta dalla classificazione dei luoghi	Massima temperatura superficiale della costruzione elettrica (°C)	Temperatura di accensione del gas o vapore (°C)
T1	450	> 450
T2	300	> 300
T3	200	> 200
T4	135	> 135
T5	100	> 100
T6	85	> 85

Per le miscele di gas o vapori la temperatura di accensione da considerare è quella della miscela stessa; in mancanza di dati si considera l'80% della temperatura di accensione più bassa tra i componenti in miscela, vengono però escluse le sostanze presenti in quantità minime (solitamente inferiori al 5% in volume).

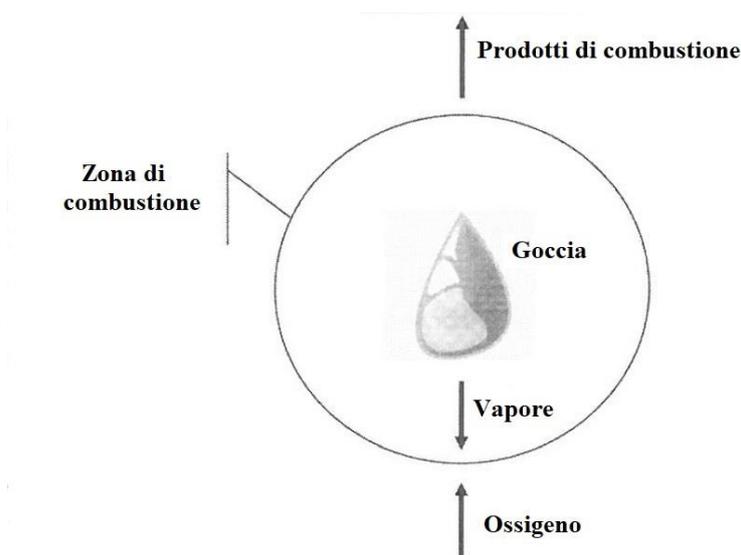
### 3.2 Innesco di nebbie infiammabili

L'energia minima di accensione per innescare la nebbia esplosiva contiene in sé due contributi:

- energia necessaria per fare evaporare parte del liquido;
- energia necessaria per l'accensione dell'atmosfera esplosiva una volta formatasi.

L'energia minima di accensione della nebbia è strettamente legata alle dimensioni della goccia dispersa nella nebbia. Infatti, gocce con diametro minore offrono una maggiore superficie di scambio che facilita il trasporto di calore e di materia (fenomeni entrambi presenti nell'evaporazione della goccia).

Il modello utilizzato per descrivere come una goccia si accende è il seguente: la goccia evaporando fornisce combustibile in fase gassosa per la combustione. L'ossigeno che sarà il comburente della reazione si trova inizialmente separato dal combustibile e ciò crea una fiamma di diffusione che avvolge la goccia e che idealmente avrà forma sferica, come raffigurato in figura 3.1. La forma sferica però nella realtà è di difficile presenza a causa delle forti alterazioni che si verificano.



**Figura 3.1.** Rappresentazione grafica della combustione di una goccia presente nella nebbia esplosiva

Importanza cruciale ha la dimensione delle gocce presenti nella nebbia. Le gocce più finemente disperse (con dimensioni minori di 10  $\mu\text{m}$ ), avendo un'area superficiale maggiore, sono più facilmente volatilizzate dal fronte di fiamma, permettendo così alla fiamma di continuare a propagarsi.

Le gocce più grosse (con diametro maggiore a 40  $\mu\text{m}$ ) bruciano singolarmente e tendono ad accendere le gocce a loro vicine. Si ricava dunque la distanza media critica tra le particelle oltre la quale due gocce vicine tra loro non riescono ad accendersi a vicenda. Questa distanza viene presa tra i centri delle due gocce e il valore limite sarà:

- per particelle con diametro < 10  $\mu\text{m}$ , è circa 22 volte il diametro della goccia;
- per particelle con diametro > 40  $\mu\text{m}$ , è circa 31 volte il diametro della goccia.

Le nebbie si formano solitamente per la presenza di liquidi con alta temperatura d'infiammabilità, come ad esempio i fluidi diatermici. Quando il liquido viene emesso ad alta pressione questo si disperde finemente facendo aumentare la superficie specifica del liquido e favorendo il trasporto di materia e calore.

Tramite studi sperimentali fatti su dispersioni di liquidi con temperatura di infiammabilità compresa tra i 45 e i 240  $^{\circ}\text{C}$  si sono dedotte le seguenti affermazioni [5]:

- non esiste alcuna relazione tra temperatura d'infiammabilità del liquido e pressione di esplosione generata;
- liquidi che hanno temperatura d'infiammabilità < 100  $^{\circ}\text{C}$  si accendono tutti con energia di accensione pari a 1,1 J;
- liquidi che hanno temperatura d'infiammabilità > 100  $^{\circ}\text{C}$  si accendono tutti con energia di accensione pari a 10 J;
- per miscele "ferme" di nebbie (con dimensione delle gocce < 10  $\mu\text{m}$ ) non si è mai verificata accensione, anche con energie di attivazione molto alte.

### 3.3 Innesco di polveri combustibili

La reattività di una sostanza polverosa è funzione della granulometria della polvere stessa. Questo è legato al fatto che una polvere più finemente dispersa presenta un'area superficiale maggiore che entrando a contatto con l'ossigeno genera l'esplosione. Tra l'altro una polvere più sottile rimane sospesa in aria con più facilità. Dunque, possiamo dedurre che al diminuire delle dimensioni delle particelle nella polvere:

- aumento della pressione massima di esplosione;
- aumento della velocità massima di aumento della pressione;
- riduzione dell'energia minima di accensione;
- riduzione del limite inferiore di esplosività.

Ogni polvere ha un meccanismo di esplosione a sé, questo comporta che non si ha un valore limite di dimensione delle particelle al di sopra della quale la polvere non risulta più pericolosa. Però a spanne si è osservato che particelle con diametro superiore a 500  $\mu\text{m}$  non sono più esplodibili. Se si considera una miscela di polveri, questa risulta non pericolosa se la frazione di particelle con granulometria inferiore a 500  $\mu\text{m}$  è minore o uguale al 15% della miscela.

L'energia minima di accensione (MIE) di una polvere, come per gas o vapori, si ha per una concentrazione stechiometrica della miscela. Inoltre, anche la quantità di comburente presente influisce molto sulla MIE delle polveri. Ed infine la MIE è legata in generale con il cubo della dimensione delle particelle che compongono la polvere. Per una polvere di polietilene ad esempio, al variare della granulometria, si riscontrano valori di energia minima di accensione che variano da 10 mJ fino ad oltre 1000 mJ. Questo comporta una sensibilità minore delle nubi di polveri all'accensione per scintilla. La MIE delle polveri risulta essere maggiore rispetto a quella dei gas, e i valori spaziano su un range molto ampio: MIE < 10 mJ è considerata bassa, MIE  $\approx$  100 mJ sono considerate normali, MIE > 1000 mJ possono anche essere riscontrati per alcune polveri. Gli inneschi per una polvere risultano dunque essere inefficaci per energie inferiori al millijoule.

Seppure le polveri presentano una MIE maggiore dei gas, queste però possiedono anche una minore temperatura minima di accensione (attorno ai 500  $^{\circ}\text{C}$  per i gas, circa 400  $^{\circ}\text{C}$  per le polveri). Le polveri dunque riescono ad innescarsi per energie maggiori ma con temperature superficiali inferiori.

Altro fattore che influenza la tendenza di una polvere ad innescarsi è la presenza di umidità della polvere che, come già detto, rende più difficile la dispersione delle particelle nell'aria creando agglomerati grossolani. Un aumento della percentuale di umidità causa: aumento della temperatura di accensione, aumento dell'energia di accensione e aumento del limite di esplosività.

Parametro chiave per gli inneschi dovuti a carica elettrostatica è la resistività di volume, cioè la resistenza che possiede un corpo di lunghezza e sezione trasversale unitaria. Si hanno tre gruppi di polveri al variare della resistività di volume:

- bassa resistività, con valore inferiore a  $10^6 \Omega\text{m}$  circa;
- media resistività, con valore compreso tra  $10^6 \Omega\text{m}$  e  $10^{10} \Omega\text{m}$ ;
- alta resistività, con valore maggiore di  $10^{10} \Omega\text{m}$ .

Altra causa d'innescò delle polveri è l'autocombustione generata da lenti processi di ossidazione e/o decomposizione che generano calore, difficilmente disperso a causa dell'accumulo della polvere su sé stessa. Il calore prodotto risulta essere maggiore di quello che viene disperso dalla polvere, facendone aumentare la temperatura fino all'autoaccensione. Il parametro che descrive meglio la propensione di una polvere all'autoriscaldamento per decomposizione è la stabilità termica. Due fenomeni di esplosione da instabilità sono la combustione lenta e spontanea in atmosfera (combustione iniziale spontaneamente avvenuta che può causare l'esplosione di possibili nubi che si formano) e la fermentazione (produzione di calore e gas combustibili che si accumulano e possono generare esplosioni).

### 3.4 Innesco di miscele ibride

Sono definite miscele ibride quelle miscele formate da sostanze infiammabili e polveri combustibili. Le interazioni fra le sostanze in miscela rende di difficile comprensione e valutazione le proprietà esplosive della miscela stessa. Dunque, talvolta risulta inutilizzabile un metodo di proporzionalità per il calcolo delle proprietà della miscela.

Altro effetto è la riduzione della MIE della miscela rispetto a quella delle singole sostanze. Infatti, le polveri prese singolarmente hanno una MIE maggiore delle stesse polveri in miscela con gas o vapori infiammabili, ed in particolare la MIE della polveri in presenza di gas infiammabili decresce fino alla MIE del gas in miscela.

Come gas o vapori infiammabili hanno un effetto in senso di una maggiore propensione all'esplosione, così sostanze non infiammabili (ad esempio l'acqua) hanno effetto inibente. La presenza di acqua infatti tende a ridurre il range di infiammabilità della sostanza esplosiva e ne aumenta pure la temperatura d'infiammabilità (come è possibile notare in tabella 3.2).

**Tabella 3.2.** Variazione della temperatura d'infiammabilità dell'alcool etilico al variare della frazione in peso di acqua nella miscela

Alcool etilico %	Acqua %	Temperatura d'infiammabilità °C
100	0	12
95	5	17
80	20	20
70	30	21
60	40	22
50	50	20
40	60	26
30	70	29
20	80	36
10	90	49
5	95	62

### 3.5 Sorgenti d'innescò di atmosfere esplosive

Le sorgenti d'innescò sono entità che possiedono energia tale da accendere un'atmosfera esplosiva. Possono essere di natura differente e differiscono tra loro per quantità di energia che riescono a fornire, durata dell'energia emessa e temperatura raggiunta. La norma [22] considera diverse fonti d'innescò, ognuna delle quali presenta delle caratteristiche e modalità di formazione differente.

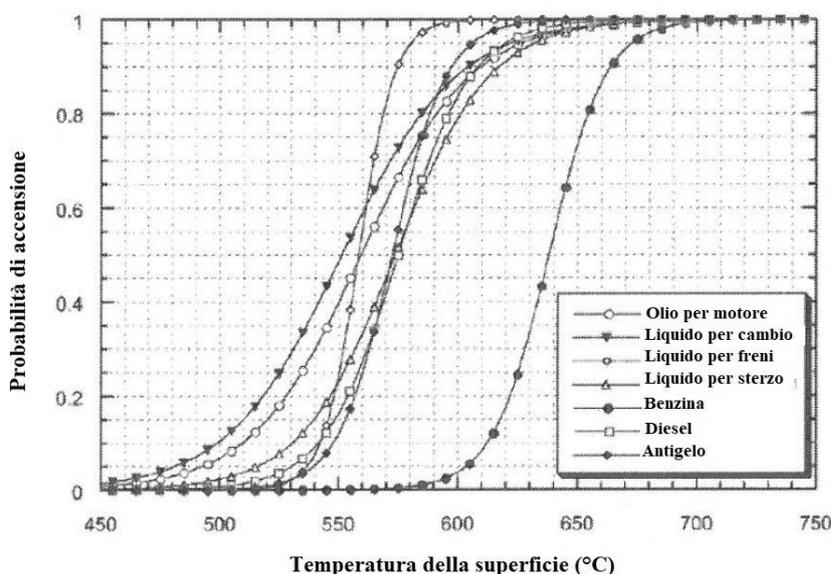
### 3.5.1 Superfici calde

Sono definite superfici calde quelle superfici che presentano una temperatura superiore o uguale alla temperatura di accensione dell'atmosfera esplosiva in cui si trovano. La temperatura della superficie che genera l'accensione è funzione di: forma della superficie, gradiente di concentrazione dell'atmosfera esplosiva nell'intorno della superficie calda, in piccola parte dal materiale di cui è fatta la superficie calda.

Un esempio della dipendenza dalla forma è data dalle superfici concave e convesse. Infatti, queste ultime necessitano una maggiore temperatura superficiale per generare l'accensione dell'atmosfera esplosiva. In particolare, si può affermare che per superfici di forma sferica o cilindrica, la temperatura minima di accensione cresce al decrescere del diametro.

Altro parametro chiave per queste sorgenti d'innesco è il tempo di contatto tra superficie calda ed atmosfera esplosiva. Se il tempo di contatto risulta basso allora potrebbe essere necessaria una temperatura superficiale maggiore per l'accensione.

Un test fatto su fluidi per automazione ed aviazione ha dimostrato che la benzina, seppur presenta un'energia minima di accensione bassa, risulta la meno pericolosa se accesa a causa di superfici calde [23]. Nella figura 3.2 si può apprezzare il comportamento di diversi fluidi infiammabili a contatto con superfici calde.



**Figura 3.1.** Probabilità di accensione di fluidi infiammabili, in funzione della temperatura di una superficie

### 3.5.2 Fiamme e gas caldi

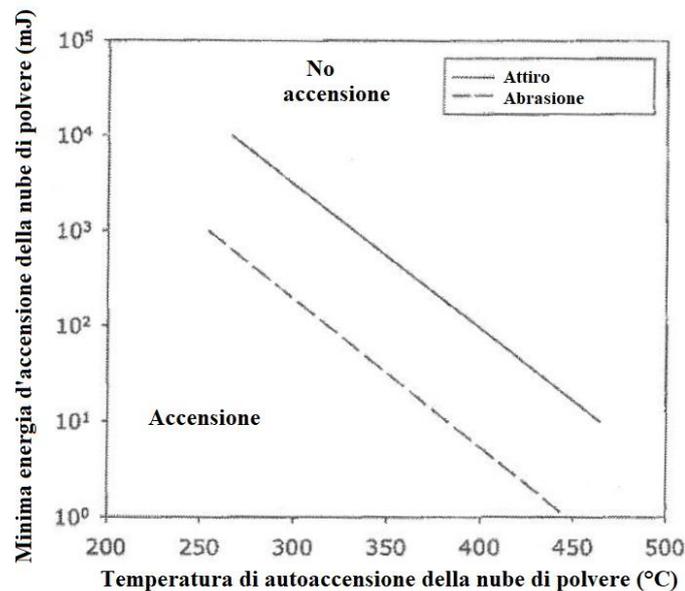
Fiamme e gas caldi sono prodotti di reazioni di combustione che avvengono con temperature superiori ai 1000 °C. Talvolta le fiamme possono contenere particelle solide che, essendo incandescenti, possono anch'esse considerarsi fonti d'innesco. Gas, fiamme e prodotti di reazione di combustione possono sempre accendere un'atmosfera esplosiva, dunque le fiamme sono tra le sorgenti d'innesco più attive e pericolose.

Questi inneschi risultano particolarmente efficaci per una serie di motivi tra i quali l'alta temperatura, la lunga durata e l'estensione di volume che può essere scaldato nello stesso istante. Anche le particelle calde sono molto efficaci grazie ad una superficie di contatto ampia, alla grande distanza alla quale possono essere gettate e al fatto che possono rimbalzare fino ad arrivare a distanze veramente elevate.

### 3.5.3 Scintille di origine meccanica

Queste sono causate dalla frizione dovuta a processi meccanici, l'energia meccanica, trasmessa per frizione tra superfici solide, causa il distacco di particelle e il loro surriscaldamento. Queste particelle possono essere efficaci fonti d'innesco per gas e vapori infiammabili ma anche per alcuni tipi di polvere combustibile (come polveri metalliche disperse in aria). Negli strati di polvere invece, questi corpi possono creare fiamme che potrebbero in seguito fungere da sorgenti d'innesco.

Vi è una relazione tra energia minima d'accensione (MIE) e temperatura di autoaccensione di nubi di polveri che possono essere accesi da attrito o da urto/abrasione di nubi di polveri [24] come mostrato in figura 3.3.



**Figura 3.3.** Limiti di accensione per superfici in acciaio dovuti a scintille meccaniche causate da attrito o da abrasione di nubi di polveri

I valori di temperatura di autoaccensione sono stati ricavati con forno BAM secondo standard ASTM E1 491.

Inoltre, gli urti che coinvolgono ruggine e metalli leggeri possono causare una reazione alluminotermica (reazione di ossidazione dell'alluminio con ossido ferrico) che può risultare efficace per l'innesco di atmosfere esplosive.

#### 3.5.4 Materiale elettrico

Possono crearsi fenomeni che producono scintille elettriche o superfici calde, che sono fonti d'innesco attive, dovute al funzionamento ordinario o anomalo di alcuni componenti elettrici. Si possono creare per cortocircuiti, per sovraccarico di conduttori, per apertura e chiusura di circuiti elettrici o per connessioni allentate durante l'utilizzo.

Le basse tensioni dei componenti elettrici possono risultare efficaci. Infatti, tensioni di 24 V ad esempio, sono progettate per la protezione di persone contro scosse elettriche. Tensioni inferiori ai 50 V possono risultare sorgenti efficaci per l'accensione di molte atmosfere esplosive, per questo motivo bisogna considerare tutti i componenti elettrici come potenziali sorgenti d'innesco.

#### 3.5.5 Correnti vaganti e di protezione catodica

Si definisce corrente vagante quella che transita attraverso un percorso non previsto. Queste possono attraversare sistemi conduttori o parti di questi, durante il normale funzionamento o per guasti. Le modalità di trasferimento di carica sono dovute a:

- correnti di ritorno nei generatori di potenza, ad esempio i componenti conduttori interrati offrono una resistenza minore al passaggio della carica;
- cortocircuito o guasti agli impianti elettrici che creano dispersioni a terra;
- induzione magnetica;
- fulmini (causa che verrà approfondita in seguito);

Le correnti vaganti possono generare, sul sistema dove vengono trasmesse, delle differenze di potenziale in grado di generare scariche che possono innescare un'atmosfera esplosiva. Inoltre, il flusso di corrente potrebbe innalzare la temperatura della superficie del sistema conduttore, generando una fonte d'innescio.

I rischi descritti finora sono anche presenti se si utilizza la protezione contro corrosione catodica con utilizzo di una corrente applicata. In questo caso però, si utilizzano i cosiddetti anodi sacrificali che offrono una resistenza minore al passaggio di corrente ed evitano la formazione di scintille perché adeguatamente dimensionati e posizionati.

### 3.5.6 Eletticità statica

Sono cariche generate dal contatto tra due superfici di natura diversa. La carica si separa al contatto, i protoni andranno ad accumularsi su una delle due superfici mentre gli elettroni si accumuleranno nella seconda. Se uno dei due corpi presenta caratteristiche isolanti allora la carica non ha il tempo di fluire e il corpo rimane carico elettrostaticamente. Se il contatto e distacco avviene numerose volte si ha un sempre maggiore accumulo di carica elettrica, l'accumulo di carica genera un campo elettrico che, una volta superata la rigidità dielettrica dell'aria, genera una scossa in grado di innescare un'atmosfera esplosiva.

Questa fonte d'innescio risulta essere la più difficile da prevedere e capire.

### 3.5.7 Fulmini

La corrente generata da un fulmine risulta essere di migliaia di Ampere e ciò fa sì che la sua energia è sufficiente per l'innescio di una qualsiasi atmosfera esplosiva. D'altronde la probabilità che si abbia la presenza simultanea di un fulmine e la formazione di un'atmosfera esplosiva, risulta essere veramente troppo bassa. Unico caso preso in esame riguarda le zone 0 e 20 che per definizione sono presenti continuamente o per lunghi periodi, quindi la probabilità della formazione di un'atmosfera esplosiva non risulta essere più trascurabile. Però queste zone, essendo molto pericolose, si trovano spesso confinate in sistemi di contenimento, risulta così molto difficile che la corrente prodotta da un fulmine possa interessare queste zone.

### 3.5.8 Onde elettromagnetiche

Sono radiazioni aventi un campo elettrico e un campo elettromagnetico, in possesso di un'energia tale da non riuscire a ionizzare gli atomi o le molecole. Sono suddivise in due grandi gruppi in base a frequenza e lunghezza d'onda:

- campi elettromagnetici con frequenza  $[f] < 300$  GHz e lunghezze d'onda  $[\lambda] > 1$  mm; come ad esempio le microonde, le radiofrequenze, fino ai campi elettrici e magnetici stabili o quasi;
- radiazioni ottiche con frequenza  $[f]$  compresa tra  $3 \times 10^5$  Hz fino a 300 GHz e lunghezze d'onda  $[\lambda]$  comprese tra 100 nm e 1 mm; come gli ultravioletti, gli infrarossi, fino alle radiazioni laser.

Le onde elettromagnetiche sono in grado di propagarsi nello spazio e risultano un ottimo mezzo di trasporto di energia e possono anche propagarsi nel vuoto. Sono caratterizzate da un campo elettrico (E) e un campo magnetico (B) che oscillano in direzione perpendicolare al moto dell'onda. Maggiore è la frequenza dell'onda e maggiore sarà la quantità di energia che trasporta con sé.

La forza elettromagnetica viene trasportata dai fotoni e sono loro che quantificano l'energia posseduta dall'onda stessa, infatti l'energia totale dell'onda risulta dalla somma delle energie dei singoli fotoni. Questa energia viene ceduta alla materia attraversata che, assorbendola, aumenta la sua temperatura localmente. Fotoni più energetici dunque causano un riscaldamento maggiore e più rapido.

L'intera gamma delle onde elettromagnetiche costituisce lo spettro elettromagnetico.

- Onde elettromagnetiche a radiofrequenza da  $10^4$  Hz a  $3 \times 10^{12}$  Hz

Tutti i sistemi che generano e usano energia elettrica a radiofrequenza appartengono a questo range di frequenza. Le parti dei sistemi conduttrici con dimensioni paragonabili alla lunghezza d'onda della radiazione in esame, si comportano come antenne in grado di ricevere l'onda, e se questa genera un campo abbastanza potente (sorgente di emissione del campo vicina), le parti conduttrici ricevono energia a sufficienza per poter innescare un'atmosfera esplosiva.

- Onde elettromagnetiche da  $3 \times 10^{11}$  Hz a  $3 \times 10^{15}$  Hz

La sorgente naturale per eccellenza di questa gamma di razioni è il sole che emette in tutto lo spettro elettromagnetico. Sorgenti artificiali invece possono essere tutti i tipi di lampade, e vengono distinte dal tipo di fascio emesso, che sia esso coerente o meno.

I laser risultano avere fascio di emissione ad alta densità energetica, fortemente direzionali e coerenti, dunque anche a grandi distanze questi fasci energetici possono essere tali da causare l'accensione di atmosfere esplosive.

### 3.5.9 Radiazioni ionizzanti

Sono quelle radiazioni in cui i fotoni sono capaci di scomporre e modificare la struttura di un atomo cioè sono in grado di ionizzare gli atomi o le molecole.

Il metodo di accensione delle atmosfere esplosive causate da queste radiazioni è quello per assorbimento di energia. Sono considerate ionizzanti le radiazioni con frequenze maggiori a  $3 \times 10^{15}$  Hz e sono prodotte con vari meccanismi: decadimento radioattivo, fissione e/o fusione nucleare, emissione da corpi estremamente caldi, da cariche accelerate.

### 3.5.10 Ultrasuoni

Vibrazioni meccaniche con frequenza superiore a 16 kHz. Gli ultrasuoni per applicazioni industriali producono vibrazioni con frequenze di 18÷45 kHz.

Le onde ultrasoniche emesse tendono a cedere energia a sostanze solide e liquide. Queste sostanze che vengono esposte agli ultrasuoni tendono ad aumentare la loro temperatura fino ad arrivare alla temperatura di autoaccensione.

### 3.5.11 Compressioni adiabatiche

Una reazione adiabatica è quella nella quale il calore scambiato con l'ambiente esterno risulta essere nullo ( $Q = 0$ ). Questa condizione è verificata se:

- la reazione avviene con velocità tale che il calore non è in grado di disperdersi nell'ambiente esterno;
- la reazione avviene lentamente ma in un luogo isolato.

Per i gas può essere usata la legge di Poisson che lega il volume e la pressione del gas in compressione, come è possibile notare nella formula (3.1.):

$$P_i \cdot V_i^\gamma = P_f \cdot V_f^\gamma \quad (3.1)$$

dove:

$P_i$  Pressione iniziale

$P_f$  Pressione finale

$V_i$  Volume iniziale

$V_f$  Volume finale

$\gamma$  Coefficiente di espansione

Inoltre, utilizzando la legge dei gas perfetti si può relazione la temperatura T al volume V o la temperatura T alla pressione P tramite le formule (3.2) e (3.3):

$$T_i \cdot V_i^{\gamma-1} = T_f \cdot V_f^{\gamma-1} \quad (3.2)$$

$$T_i \cdot P_i^{\frac{1-\gamma}{\gamma}} = T_f \cdot P_f^{\frac{1-\gamma}{\gamma}} \quad (3.3)$$

Nelle compressioni adiabatiche si possono verificare innalzamenti di temperatura talmente elevati da causare l'accensione di atmosfere esplosive. L'aumento della temperatura è legato non alla differenza di pressione ma al rapporto tra le pressioni.

### 3.5.12 Reazioni esotermiche

Sono reazioni che generano calore. La velocità di generazione di calore è direttamente proporzionale alla velocità con cui va avanti la reazione. Se la velocità di reazione è molto alta allora le reazioni esotermiche possono fungere da sorgenti d'innesco per le atmosfere esplosive.

Tra le reazioni esotermiche sono racchiuse anche quelle che comprendono le sostanze piroforiche. Queste sostanze sono sostanze solide che a contatto con l'ossigeno atmosferico si ossidano spontaneamente con elevata produzione di calore, finché la sostanza non si incendia.

Molti materiali piroforici sono anche igroscopici e, in presenza di umidità o di vapor d'acqua, tendono a produrre molto calore e risultano sorgenti d'innesco efficaci.

## 3.6 Sorgenti d'innesco efficaci

L'articolo 289 comma 2 del D. Lgs. 81/08 dice che il datore di lavoro, nel prevenire le esplosioni, deve evitare in ogni modo l'accensione dell'atmosfera esplosiva se questa si forma inevitabilmente.

Inoltre, l'articolo 290 stabilisce che il datore di lavoro, durante la valutazione dei rischi, deve considerare anche la *“probabilità che le fonti che le fonti di accensione, comprese le scariche elettrostatiche, siano presenti e divengano attive”* [1].

Le caratteristiche chiave da considerare per l'accensione di un'atmosfera esplosiva sono:

- energia minima di accensione (MIE);
- temperatura minima di accensione di una miscela esplosiva in aria;
- temperatura minima di accensione di uno strato di polvere.

Se la sorgente d'accensione possiede caratteristiche e proprietà compatibili con quelle dell'atmosfera esplosiva in esame, allora questa sorgente sarà detta *“potenziale”*. Se la sorgente d'accensione possiede caratteristiche e proprietà tali da poter accendere l'atmosfera esplosiva in esame, allora questa sorgente sarà detta *“efficace”*.

Se la sorgente, che sia essa potenziale o efficace, non ha più energia sufficiente per generare l'innesco o se viene allontanata dall'atmosfera esplosiva, allora questa sorgente può essere considerata *“disattivata”*.

Le sorgenti d'innesco possono essere classificate in gruppi secondo la loro probabilità che insorgano, la classificazione è la seguente:

- sorgente che può essere presente continuamente o frequentemente;
- sorgente che può essere presente raramente;
- sorgente che può essere presente molto raramente.

A loro volta anche le apparecchiature e i vari sistemi utilizzati, sono potenziali sorgenti d'accensione, e in quanto tali hanno una loro classificazione come segue:

- sorgente che può essere presente durante il funzionamento normale;
- sorgente che può essere presente solamente in seguito a disfunzioni;
- sorgente che può essere presente solamente in seguito a disfunzioni rare.

La sorgente d'innesco è strettamente legata ad un parametro chiave per la valutazione del rischio, che vedremo nel capitolo successivo. Il fattore in questione è il fattore di contatto *“C”*, che considera la probabilità di esistenza di sorgenti d'innesco efficaci, assegnando un valore al fattore di contatto da 0 a 3 come vedremo in seguito.

Nel considerare le sorgenti d'accensione per le zone 2 e 22 vanno prese in considerazione solo quelle che si hanno durante il funzionamento normale, poiché può essere considerata improbabile la concomitanza del doppio evento emissione - accensione.

Qualora non sia possibile valutare la presenza o meno di una sorgente d'innesco efficace, in favore della sicurezza va considerata la sorgente essere presente.



## 4. La valutazione dei rischi ATEX

Prima di definire cosa è la valutazione dei rischi, è bene definire due concetti chiave: il pericolo e il rischio in luoghi di lavoro con atmosfera potenzialmente esplosiva.

Il D. Lgs. 81/08 definisce rischio e pericolo nel modo seguente:

- Pericolo: proprietà o qualità intrinseca di un determinato fattore avente il potenziale di causare danni.
- Rischio: probabilità che sia raggiunto il livello potenziale di danno nelle condizioni di impiego e/o di esposizione, nonché dimensioni possibili del danno stesso.

Per avere un danno deve necessariamente esistere un pericolo in un certo luogo e per un certo tempo. Questo pericolo a sua volta potrebbe causare un danno, possiamo dunque dire che il pericolo è una potenziale sorgente di danno. Mentre il rischio risulta essere la combinazione tra la probabilità di accadimento di un danno e della gravità legata a quel danno.

Possiamo dunque affermare che il rischio risulta dalla combinazione di due fattori che sono la frequenza di accadimento  $F$  e la magnitudo del danno provocato  $M$ , riassumibile con la formula (4.1):

$$R = F \times M \quad (4.1)$$

La formula (4.1) può essere a sua volta ulteriormente scomposta. Infatti, nel caso specifico di valutazioni di rischio per presenza di atmosfere esplosive, il rischio può essere valutato con il prodotto di 3 termini. Dunque, il fattore di frequenza  $F$  può essere scomposto nei due fattori  $P$  e  $C$ , mentre il fattore  $M$  può essere sostituito col fattore  $D$ , ottenendo così la formula (4.2):

$$R = P \times C \times D \quad (4.2)$$

dove:

- R Rischio
- P Fattore di pericolo, rappresenta la probabilità che il pericolo esista
- C Fattore di contatto, rappresenta la probabilità che il pericolo  $P$  causi un danno  $D$
- D Fattore di danno, rappresenta l'entità del danno provocato dal pericolo  $P$

Possiamo dunque dire che:

- il pericolo è un concetto deterministico, legato alle proprietà della sostanza in esame e alle situazioni in cui si può trovare la sostanza all'interno di una realtà industriale;
- il rischio è invece un concetto probabilistico, legato al fatto che un certo evento pericoloso avvenga e provochi un determinato danno.

Per ridurre il rischio bisogna prendere dei provvedimenti precauzionali che ne riducano il valore di partenza. Il rischio così risultante sarà chiamato rischio residuo e l'analisi ha come obiettivo quello di ridurre il valore del rischio residuo a livelli accettabili. Questa procedura seppur facile da capire non risulta però di immediata applicazione in quanto i fattori in gioco che dovranno essere considerati sono parecchi, e per riuscire in una valutazione il più possibile affidabile servono doti analitiche e grande esperienza maturata nel settore.

Va inoltre sottolineato che avere valori di rischio nulli è impossibile, quindi avere dei livelli di rischio accettabili significa che è stato fatto tutto ciò che viene riportato nelle norme. Anche se l'applicazione delle norme nel migliore dei modi possibili non riesce ugualmente a ridurre il rischio a valori nulli, dunque possiamo affermare che è impossibile garantire un livello di sicurezza assoluto.

### 4.1 Valutazione dei fattori $P$ , $C$ e $D$

Nel caso di valutazione per rischio di esplosione si deve considerare la contemporaneità di accadimento di diversi eventi. Infatti, per ogni sorgente di emissione si dovrà individuare la probabilità che si formi

l'atmosfera esplosiva, la possibilità che sia presente o meno una fonte d'innesco efficace, ed infine l'entità del danno che può celarsi dietro questo evento.

Partendo dalla probabilità che si formi un'atmosfera esplosiva questa dipenderà da:

- presenza di una sostanza infiammabile;
- grado di dispersione della sostanza infiammabile;
- concentrazione della sostanza all'interno della zona pericolosa generata;
- estensione dell'atmosfera esplosiva che potrebbe causare danni.

Dipendentemente dal tipo di zona generata si ottiene il valore corrispondente del fattore di pericolo P come riassunto nella tabella 4.1.

**Tabella 4.1.** Valore del fattore P in dipendenza del tipo di zona generata

<b>Tipo di zona pericolosa</b>	<b>Definizione qualitativa del fattore P</b>	<b>Grado del fattore P</b>
Zona 0/20	Il pericolo è presente sempre o frequentemente. Luogo in cui l'atmosfera esplosiva è presente continuamente o per lunghi periodi o frequentemente.	3
Zona 1/21	Il pericolo è presente talvolta, ogni tanto. Luogo in cui è probabile che un'atmosfera esplosiva si presenti occasionalmente durante il funzionamento normale.	2
Zona 2/22	Il pericolo è presente raramente o quasi mai. Luogo in cui è improbabile che un'atmosfera esplosiva si presenti durante il normale funzionamento, ma che, se si presenta, persiste solo per un breve periodo.	1
Zona NE	Il pericolo non c'è mai. Luogo in cui è impossibile che si formi un'atmosfera esplosiva.	0

Come si può facilmente notare il fattore di pericolo P dipende solamente dal tipo di zona pericolosa generata.

Il fattore di contatto C invece dipende dal fatto che esista e sia efficace una sorgente d'innesco. A tale fattore verrà attribuito un valore come per il fattore P e la valutazione è riportata in tabella 4.2.

**Tabella 4.2.** Valore del fattore C

<b>Definizione qualitativa del fattore C</b>	<b>Grado del fattore C</b>
Contatto presente perennemente o frequentemente nella zona (luogo) considerata. Le sorgenti di accensione sono efficaci e sempre presenti durante il normale funzionamento.	3
Contatto presente talvolta ovvero ogni tanto nella zona (luogo) considerata. Le sorgenti di accensione efficaci possono manifestarsi in circostanze rare e unicamente a seguito di disfunzioni.	2
Contatto presente talvolta ovvero quasi mai nella zona (luogo) considerata. Le sorgenti di accensione efficaci possono manifestarsi in circostanze molto rare e unicamente a seguito di rare disfunzioni.	1
Contatto mai presente nella zona (luogo) considerata. Le sorgenti di accensione non sono efficaci e/o non si manifestano mai.	0

Tabella del tutto analoga può essere utilizzata per il fattore di danno D. La tabella in questione sarà la tabella 4.3.

**Tabella 4.3.** Valore del fattore D

Definizione qualitativa del fattore D	Grado del fattore D
L'entità del danno è gravissima. Un singolo individuo o un gruppo di individui, è presente continuamente o frequentemente nella zona (luogo) considerata. La gravità delle lesioni e dei danni alla salute è mortale. Un determinato bene materiale o comparto ambientale subisce danni molto gravi o di estensione generale.	3
L'entità del danno è media o grave. Un singolo individuo o un gruppo di individui, è presente saltuariamente, ovvero ogni tanto nella zona (luogo) considerata. La gravità delle lesioni e dei danni alla salute è grave (lesioni o danni normalmente irreversibili). Un determinato bene materiale o comparto ambientale subisce danni gravi o di estensione ampia.	2
L'entità del danno è lieve. Un singolo individuo o un gruppo di individui, è presente occasionalmente ovvero quasi mai nella zona (luogo) considerata. La gravità delle lesioni e dei danni alla salute è lieve (lesioni o danni normalmente reversibili). Un determinato bene materiale o comparto ambientale subisce danni lievi o di estensione limitata.	1
L'entità del danno è trascurabile o nulla. Un singolo individuo o un gruppo di individui, non è mai presente nella zona (luogo) considerata. Un determinato bene materiale o comparto ambientale non subisce danni.	0

Inoltre, il valore del fattore D lo si può calcolare con l'utilizzo della tabella 4.4, dove vengono assegnati degli indici a determinati fattori che implicano la maggiore o minore severità del fattore di danno.

**Tabella 4.4.** Indici per il calcolo del fattore D

Elementi del fattore di danno	Indici			
	0	0,2	0,4	0,6
Tipo di zona	Zona NE	Zona 2/22	Zona 1/21	Zona 0/20
Presenza di lavoratori (P <sub>L</sub> )	Assenti	Occasionale	Saltuaria	Continua
K <sub>ST</sub> Indice esplosione polveri (bar*m/s)	< 10	10 ÷ 50	51 ÷ 100	> 100
K <sub>G</sub> Indice esplosione gas (bar*m/s)	< 10	10 ÷ 50	50 ÷ 100	> 100
Volume ipotetico ATEX V <sub>Z</sub> o V <sub>DZ</sub> (dm <sup>3</sup> )	0	≤ 1	1 ≤ 10	>10
Spessore strato polvere (mm) (SS)	Assente	≤ 5	5 ≤ 50	>50
Ostruzione/Confinamento nube (CN)	Non prevista	Non confinata	Parzialmente confinata	Completamente confinata

La somma dei vari contributi restituisce il valore del fattore di danno che sarà utilizzato per la valutazione dei rischi. Da notare che per le polveri deve essere considerato l'indice K<sub>ST</sub> mentre per i gas K<sub>G</sub>. Inoltre, se non si è in presenza di gas non va considerato l'indice relativo allo spessore della polvere che, ovviamente, non si verrà a formare. Infine, il valore del fattore D risulterà massimo pari a 3 per i gas mentre per le polveri il suo valore massimo arriva a 3,6.

## 4.2 Calcolo del rischio e barriere di protezione

Per una valutazione analitica del rischio si usa la formula (4.2) i cui fattori sono stati appena discussi. Dalla formula si ricava un valore numerico che indica una stima dell'entità del rischio a cui si può incorrere, se si verificasse il pericolo P.

Ad ogni valore del rischio R corrisponde una valutazione che ci permette di valutare se l'evento in esame ha una probabilità più o meno elevata di accadimento. In tabella 4.5 è riportata una valutazione qualitativa e quantitativa del rischio, e gli eventuali interventi che andranno considerati.

**Tabella 4.5.** Valutazione del rischio R ed interventi da applicare

Valore R	Rischio	Descrizione	Interventi
$R \geq 18$	Alto	Si intendono a rischio di esplosione alto i luoghi di lavoro o parte di essi in cui la probabilità di atmosfera esplosiva è elevata (es. aree classificate come Zona 0 o Zona 20); in tali aree le condizioni locali e/o di esercizio presentano inneschi efficaci. In tali zone, in caso di esplosione, il livello di esposizione risulta elevato (persone esposte direttamente al pericolo, danni ingenti alle strutture e all'ambiente) e la probabilità di propagazione dell'esplosione è da ritenersi notevole.	Vanno immediatamente intraprese delle misure per ridurre il rischio
$9 \leq R < 18$	Medio	Si intendono a rischio di esplosione medio i luoghi di lavoro o parte di essi in cui la probabilità di atmosfera esplosiva è limitata (es. aree classificate come Zona 1 o Zona 21); in tali aree le condizioni locali e/o di esercizio possono favorire la presenza di inneschi efficaci. In tali zone, in caso di esplosione, il livello di esposizione risulta moderato (persone non esposte direttamente al pericolo, danni moderati alle strutture e all'ambiente) e la probabilità di propagazione dell'esplosione è da ritenersi limitata.	Vanno previste delle misure di miglioramento nel breve termine
$1 \leq R < 9$	Basso	Si intendono a rischio di esplosione basso i luoghi di lavoro o parte di essi in cui la probabilità di atmosfera esplosiva è estremamente limitata (es. aree classificate come Zona 2 o Zona 22); in tali aree le condizioni locali e/o di esercizio offrono scarse possibilità di presenza di inneschi efficaci. In tali zone, in caso di esplosione, il livello di esposizione risulta basso (persone non esposte al pericolo, danni limitati alle strutture e all'ambiente) e la probabilità di propagazione dell'esplosione è da ritenersi estremamente limitata.	Saranno prese in considerazione delle misure di riduzione del rischio in base ad una valutazione ALARP (As Low As Reasonably Practicable)
$R < 1$	Trascurabile	Si intendono a rischio di esplosione trascurabile i luoghi di lavoro o parte di essi in cui la probabilità di atmosfera esplosiva è quasi impossibile (es. aree classificate come Zona NE); in tali aree le condizioni locali e/o di esercizio non offrono possibilità di presenza di inneschi efficaci. In tali zone, in caso di esplosione, il livello di esposizione è quasi nullo (persone non esposte al pericolo, non ci sono danni alle strutture e all'ambiente) e la probabilità di propagazione dell'esplosione è da ritenersi quasi nulla.	Vanno mantenute le attuali condizioni operative al fine di non fare aumentare il rischio

Una volta valutato il rischio proveniente da un dato pericolo P, si può decidere se e come intervenire per ridurlo a valori accettabili.

Le zone con rischio nullo sono quelle in cui non si hanno zone pericolose, o il volume della zona pericolosa risulta trascurabile o, ancora, zone in cui tutte le fonti d'innescio risultano inefficaci. In questi casi basta solamente continuare ad applicare le condizioni operative e di sicurezza già messe in pratica.

Qualora il rischio non dovesse risultare trascurabile, bisogna pianificare degli interventi di tipo preventivo e/o protettivo atti a mitigare il rischio. Dunque, le barriere di tipo preventivo agiranno in senso di ridurre il pericolo (fattore P), incidendo sul tipo di zona generata, o il fattore di contatto C, incidendo sulla presenza e/o efficacia degli inneschi. Mentre le barriere di tipo protettivo andranno ad influire il fattore di danno D, riducendone la gravità.

#### 4.2.1 Interventi che agiscono sul fattore P

Gli interventi atti a ridurre il fattore di pericolo P sono di due tipi:

- di tipo impiantistico, come ad esempio l'installazione di sistemi di aspirazione;
- di tipo organizzativo/procedurale, come ad esempio l'adozione d'istruzioni operative ad hoc.

Le barriere annullano o riducono a valori tollerabili il fattore di pericolo P, e tra esse vi sono:

- barriere di contenimento o riduzione del pericolo: il principio di funzionamento è basato sul contenimento del pericolo o in una sua riduzione. Esempi di tali barriere sono: la ventilazione artificiale in presenza di atmosfera esplosiva, una tubazione di trasporto pneumatico di polvere combustibile;
- barriere di sostituzione: consistono nel sostituire un elemento rischioso (macchina, metodo di lavorazione, sostanza) con una meno rischiosa. Esempio: sostituzione di vernici a base di solventi con quelle ad acqua, sostituzione di sostanza in polvere combustibile con una in grani;
- barriere di allarme o di segnalazione: sono costituite da avvisi e/o messaggi che possono essere percepiti e compresi. Ad esempio: allarme ottico/acustico di esplosività dell'atmosfera, cartelli di avvertimento per aree con atmosfere potenzialmente esplosive;
- barriere composite: contenenti almeno una barriera di contenimento o riduzione del pericolo.

Ogni barriera che viene utilizzata tende a ridurre il fattore P, in tal senso viene assegnato un valore numerico alla barriera BP, che verrà sottratto al fattore di pericolo P. Nella tabella 4.6 sono valutate in maniera qualitativa e quantitativa le barriere che agiscono sul fattore P.

**Tabella 4.6.** Grado di efficacia e definizione qualitativa di BP

<b>Grado di sicurezza della barriera sul pericolo (BP)</b>	<b>Definizione qualitativa della barriera</b>
0	Non è in grado di assicurare alcun livello di protezione (non resiste ad alcuna sollecitazione, anche ordinaria). È come se non ci fosse. Va bene in zona NE.
1	È in grado di assicurare il livello di protezione in presenza delle sollecitazioni del funzionamento normale e per le situazioni ordinarie di progetto. Serve per evitare zone 2 o 22. È una barriera che può fallire.
2	È in grado di assicurare il livello di protezione in presenza di un'anomalia del funzionamento. Pertanto, mai o quasi mai può rendersi inefficiente. Serve per evitare zone 1 o 21. È una barriera che può fallire raramente o quasi mai.
3	È in grado di assicurare il livello di protezione in presenza di due anomalie indipendenti tra loro: cioè, in caso di guasto di un elemento, almeno un secondo elemento indipendente assicura il livello di protezione richiesto. Serve per evitare zone 0 o 20. È una barriera considerata infallibile in specifiche condizioni.

#### 4.2.2 Interventi che agiscono sul fattore C

Gli interventi atti a ridurre il fattore di contatto C sono di due tipi:

- di tipo impiantistico, come ad esempio equipotenzialità delle parti conduttive per elettricità statica;
- di tipo organizzativo/procedurale, come ad esempio la manutenzione periodica delle parti in movimento, permessi per lavori a caldo, ecc..

Le barriere tendono a ridurre la contemporaneità dell'instaurarsi del pericolo P in presenza della sorgente d'innesco, in particolare tendono a rendere inefficace la sorgente d'accensione. Tra questi vi sono:

- barriere di riduzione dell'efficacia e della contemporaneità del contatto: evitano che due eventi avvengano contemporaneamente, agendo in particolare sul fattore di contatto (sorgenti di accensione efficaci). Esempi di tali barriere sono: apparecchiature elettriche in esecuzione a sicurezza, isolamenti termici di superfici calde, impianti di protezione da scariche atmosferiche;
- barriere comportamentali: si riferiscono ad un determinato comportamento che si attende in una certa situazione. Ad esempio: comportamento atteso da un operatore edotto in materia (formazione), istruzioni operative, autorizzazione al lavoro (permesso di lavoro);

- barriere di allarme o di segnalazione;
- barriere composite, contenenti almeno una barriera di riduzione del contatto o comportamentale.

Ogni barriera che viene utilizzata tende a ridurre il fattore C, in tal senso viene assegnato un valore numerico alla barriera BC, che verrà sottratto al fattore di contatto C. Nella tabella 4.7 sono valutate in maniera qualitativa e quantitativa le barriere che agiscono sul fattore C.

**Tabella 4.7.** Grado di efficacia e definizione qualitativa di BC

<b>Grado di sicurezza della Barriera sul Contatto (BC)</b>	<b>Definizione qualitativa della barriera</b>
0	Non è mai in grado di impedire che il pericolo P sia causa di danno.
1	È in grado di impedire che il pericolo P sia causa di danno nel funzionamento ordinario. Apparecchi di categoria 3 (3G o 3D) o con EPL Gc o Dc.
2	È in grado di impedire che il pericolo P sia causa di danno anche in presenza di sollecitazione dovuta al funzionamento anormale. Apparecchi di categoria 2 (2G o 2D) o con EPL Gb o Db.
3	È in grado di impedire che il pericolo P sia causa di danno anche in presenza contemporanea di due sollecitazioni dovute al funzionamento anormale. Apparecchi di categoria 1 (1G o 1D) o con EPL Ga o Da.

#### 4.2.3 Interventi che agiscono sul fattore D

Gli interventi atti a ridurre il fattore di danno D sono di due tipi:

- di tipo impiantistico, come ad esempio sistemi di rilevazione e soppressione;
- di tipo organizzativo/procedurale, come ad esempio evitare la presenza dei lavoratori nei luoghi di lavoro per lunghi periodi, ecc..

Le barriere intervengono dopo che l'evento negativo è accaduto e tendono a mitigarne gli effetti. Tra questi vi sono:

- barriere di contenimento o riduzione del danno: limitano il danno, sono le classiche barriere usate per fare prevenzione in caso d'incendio o esplosione. Ad esempio: mezzi di estinzione degli incendi, dispositivi di scarico dell'esplosione, contenitori resistenti all'esplosione;
- barriere di sostituzione che riducono il danno;
- barriere composite, contenenti almeno una barriera di contenimento o riduzione del danno.

Ogni barriera che viene utilizzata tende a ridurre il fattore D, in tal senso viene assegnato un valore numerico alla barriera BD, che verrà sottratto al fattore di danno D. Nella tabella 4.8 sono valutate in maniera qualitativa e quantitativa le barriere che agiscono sul fattore D.

**Tabella 4.8.** Grado di efficacia e definizione qualitativa di BD

<b>Grado di sicurezza della Barriera sul Contatto (BD)</b>	<b>Definizione qualitativa della barriera</b>
0	Non è in grado di contenere alcun danno.
1	È in grado di contenere un danno lieve che si può manifestare in condizioni ordinarie.
2	È in grado di contenere un danno medio o grave che si può manifestare in condizioni non ordinarie.
3	È in grado di contenere un danno gravissimo che si può manifestare in condizioni anomale.

#### 4.2.4 Valutazione del rischio

Una volta applicate le barriere ai vari fattori, la formula utilizzata per il calcolo del fattore di rischio “compensato” è la formula (4.3):

$$R' = P' \cdot D' \cdot C' = (P - BP) \cdot (D - BD) \cdot (C - BC) \quad (4.3)$$

Questa formula è però stata sostituita alle formule (4.4a, 4.4b). Infatti, quest'ultime risultavano essere troppo severe nella valutazione, a causa delle ridondanze presenti in esse, e restituivano valori di rischio troppo elevati.

$$R' = [(P - BP) \cdot (D - BD) \cdot (C - BC)] + P_L + K_{ST} + V_{DZ} + SS + CN \text{ (polveri)} \quad (4.4a)$$

$$R' = [(P - BP) \cdot (D - BD) \cdot (C - BC)] + P_L + K_G + V_Z + CN \text{ (gas)} \quad (4.4b)$$

Le barriere intervengono solo in senso di ridurre i fattori chiave della valutazione del rischio, riducendoli a valori che comunque saranno maggiori o uguali a zero. Fattori con valore nullo daranno un rischio che a sua volta non potrà essere considerato nullo, bensì trascurabile.



## 5. Foglio di calcolo per la valutazione dei rischi ATEX

Il lavoro di tesi si è incentrato sulla realizzazione di un foglio di calcolo utile alla valutazione del rischio finale. Dopo aver approfondito le varie normative e il metodo di valutazione utilizzato, si è cercato di sviluppare un foglio di calcolo in grado di calcolare, in modo rapido ed evitando di commettere errori, il rischio legato al pericolo in esame.

Si è dunque scelto un approccio di tipo tabulare per una migliore formattazione e rapidità di utilizzo del suddetto foglio.

Inoltre, è stato anche prodotto un piccolo manuale d'uso, in cui sono descritte le varie tabelle ed elencate la sequenza di azioni utili per la compilazione.

Esaminando i vari aspetti delle norme e gli step utili per una valutazione ben fatta, si è deciso di far partire l'identificazione delle sostanze presenti nel luogo in esame, che saranno dunque il punto di partenza dell'intera compilazione tabulare.

Una volta elencate le sostanze si passa all'identificazione delle sorgenti di emissione relativamente al luogo d'interesse in cui si trovano. Come già discusso più sorgenti di emissione possono concorrere alla formazione di una zona pericolosa, dunque l'elenco delle sorgenti di emissione risulta un qualcosa in più utile per la completezza dei documenti necessari per la stesura della valutazione finale.

Una volta individuate le aree da esaminare si passa alla determinazione dei valori dei fattori utili per la valutazione, di cui si è discusso nel capitolo 4. Primo fra tutti il fattore di pericolo P, ricavato dopo aver definito il tipo di zona che si genera nel luogo in esame. Successivamente, tramite valutazioni emerse dai vari sopralluoghi e grazie all'abilità dell'incaricato all'analisi dei rischi, si valutano i vari fattori di contatto che risultano essere tanti quanti le fonti d'innescamento menzionate nelle norme (per un totale di 13). Dopodiché si passa alla valutazione del fattore di danno D. Quest'ultimo richiede l'approfondimento di alcuni parametri in gioco, come le proprietà della sostanza pericolosa in esame e le caratteristiche della zona pericolosa generata e del luogo in esame. Per poter valutare D serviranno dei sopralluoghi così da individuare le caratteristiche dell'ambiente in esame (come presenza di lavoratori e il confinamento della nube esplosiva). Inoltre, sarà necessario l'uso di software (ad esempio TuttoNormel) per valutare l'estensione della zona pericolosa e poter ricavare il volume ipotetico di atmosfera esplosiva ( $V_Z$  o  $V_{DZ}$ ).

Infine, tramite valutazioni fatte a monte, si decidono le barriere protettive applicabili e il foglio restituirà i valori del rischio R e del rischio compensato R'.

Adesso andremo a vedere nel dettaglio come è strutturato in programma e come funziona.

Nelle figure che seguiranno è stato preso in esame un esempio di valutazione di rischio reale, fornita dall'azienda ARIA s.r.l..

### 5.1 Struttura e funzionamento

Il foglio di calcolo creato è composto da 5 tabelle che andranno compilate secondo le decisioni prese dai tecnici incaricati della classificazione. Ogni tabella ha lo scopo di raccogliere informazioni utili per la classificazione e la stesura dei documenti che, in seguito, serviranno per poter stilare la valutazione di rischio finale da consegnare al richiedente.

#### 5.1.1 Tabella 1, elencazione delle sorgenti di emissione e loro caratteristiche

Per la completezza della raccolta dati, la prima tabella è stata inserita per raggruppare tutte le sorgenti di emissione, esaminate durante i sopralluoghi, ed elencarle per luoghi d'interesse.

Come si vede nella figura 5.1, si segue una certa schematicità nella compilazione della tabella, che si è deciso di mantenere per l'intero foglio. In particolare, per la tabella 1 in figura 5.1:

- si parte dall'identificazione della sostanza pericolosa;
- se ne indica il luogo o ambiente nel quale è presente;

- si indicano le sorgenti di emissione ad essa inerenti;
- si fornisce una descrizione di ogni SE esaminata;
- si valuta la zona pericolosa generata dalla SE, scegliendo i valori da apposita tendina;
- infine, si indicano le quote significative della zona generata.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I
1	<b>Tab. 1</b>	Sostanza	Area d'in	SE	Descrizione SE	Zona	Quota "a", raggio sfera	Quota "b"	Quota "h"
2		Gas metano	Reparto A	001	Elettrovalvola	NE	-	-	-
3				002	Flangia (riduttore di pressione)	2	0,5 m	-	-
4				003	Filtro	2	0,5 m	-	-
5				004	Valvola di regolazione (stabilizzatore)	2	0,5 m	-	-
6				005	Flangia bruciatore	2	0,5 m	-	-
7				006	Giunto filettato	NE	-	-	-
8			Reparto B	011	Elettrovalvola	NE	-	-	-
9				012	Flangia (riduttore di pressione)	2	0,5 m	-	-
10				013	Filtro	0	0,5 m	-	-
11				014	Valvola di regolazione (stabilizzatore)	2	0,5 m	-	-
12				015	Flangia bruciatore	2	0,5 m	-	-
13				016	Giunto filettato	NE	-	-	-
14			Reparto E	0,19	Elettrovalvola	NE	-	-	-
15				0,20	Flangia (riduttore di pressione)	2	0,5 m	-	-
16				0,21	Filtro	2	0,5 m	-	-
17				0,22	Valvola di regolazione (stabilizzatore)	2	0,5 m	-	-
18				0,23	Flangia bruciatore	2	0,5 m	-	-
19				0,24	Giunto filettato	NE	-	-	-
20		Polvere	Reparto A	007	Big Bag/GIR	22	e dal punto di connessione ti	-	-
21				008	Scarico in secchiello	21	nterno della nicchia dosapol	-	-
22						21	ill'esterno della nicchia dosap	-	-
23			Reparto B	017	Big Bag/GIR	22	e dal punto di connessione ti	-	-
24				018	Scarico in secchiello	21	nterno della nicchia dosapol	-	-
25						21	ill'esterno della nicchia dosap	-	-
26		GPL	Reparto A	009	Raccordo bombola - giunti filettati	2	0,9 m	-	-
27		Acetilene	Reparto A	010	Raccordo bombola - giunti filettati	2	1,5 m	-	-
28		Idrogeno	Tettoia este	025	Batteria	1	0,5 m	-	-

Figura 5.1. Elenco delle SE e sue caratteristiche

Come si può notare dalla figura 5.1, la tabella presenta celle a compilazione libere mentre altre celle hanno dei valori che saranno presi da elenchi predefiniti e preimpostati. La scelta delle tendine per la compilazione è nata dalla necessità di dover scegliere tra valori prestabili dalle norme.

È già stato accennato che i calcoli fatti per la stima delle quote "a", "b" ed "h" quando presenti, sono state fatte con l'uso di software dedicati (TuttoNormel).

### 5.1.2 Tabella 2, definizione qualitativa e valutazione quantitativa del fattore di contatto C

Lo schema di inserimento dati, visto per la tabella in figura 5.1, è stato mantenuto anche per le tabelle successive e il punto di partenza si è deciso essere sempre lo stesso. La seconda tabella, presente in figura 5.2, raggruppa tutti i fattori di contatto analizzati dalla norma [22], si può infatti notare una certa ripetitività nella tabella che racchiude tante voci per quante sono le sorgenti d'innescio da analizzare (saranno in tutto 13).

Dunque, la compilazione della tabella 2, in figura 5.2, sarà la seguente:

- si parte dall'identificazione della sostanza pericolosa;
- se ne indica il luogo o ambiente nel quale è presente;
- si fornisce una "valutazione" qualitativa sulla presenza ed efficacia della sorgente in esame;
- si fornisce una "definizione" qualitativa sulla presenza ed efficacia della sorgente in esame, scegliendo i valori tra quelli presenti nell'apposita tendina;
- in base alla "definizione" qualitativa data, il foglio fornisce in automatico il valore del fattore di contatto ad essa associata.

Questo procedimento sarà ripetuto per le 13 voci corrispondenti alle 13 sorgenti d'accensione da esaminare.

31	Tab. 2	Sostanza	Area d'interesse	Valutazione 1	Definizione qualitativa	C1 (Superfici calde)	Valutazione 2
32		Gas metano	Reparto A	Area macchina rotazion	Quasi mai	1	Area macchina rotazionale. I
33			Reparto B	Area macchina rotazion	Quasi mai	1	Area macchina rotazionale. I
34			Reparto E	Area macchina rotazion	Quasi mai	1	Area macchina rotazionale. I
35		Polvere	Reparto A (Scarico in secchiello)	Area dosaggio polveri.	Mai	0	Area dosaggio polveri. In sta
36			Reparto A (Big Bag/GIR)	Area dosaggio polveri.	Permanente	0	Area dosaggio polveri. In sta
37			Reparto B (Scarico in secchiello)	Area dosaggio polveri.	Onni tanto	0	Area dosaggio polveri. In sta
38			Reparto B (Big Bag/GIR)	Area dosaggio polveri.	Mai	0	Area dosaggio polveri. In sta
39		GPL	Reparto A	Area fiammatura. Non	Permanente	3	Area fiammatura. Non è pos
40		Acetilene	Reparto A	Area manutenzione. No	Permanente	3	Area manutenzione. Non è g
41		Idrogeno	Tettoia esterna	Tettoia (esterna) per la	Mai	0	Tettoia (esterna) per la ricari
42							
43							
44							
45							
46							
47							
48							
49							
50							
51							

Figura 5.2. Valutazione qualitativa e quantitativa del fattore di contatto C

I valori del fattore di contatto così determinati saranno in seguito usati per la valutazione del rischio finale.

### 5.1.3 Tabella 3, valutazione quantitativa del fattore di danno D

Con l'aiuto della tabella 3, presente in figura 5.3, si riesce a calcolare facilmente il fattore di danno D che, come già visto, dipende da 5 fattori per i gas, vapori o nebbie infiammabili e da 6 per le polveri combustibili.

La schematicità delle celle è sempre mantenuta, ma da ora in poi le prime due celle si autocompilleranno, prendendo i valori dalla tabella 2, raffigurata in figura 5.2.

La compilazione della tabella 3, in figura 5.3, sarà la seguente:

- l'identificazione della sostanza pericolosa in esame e il luogo di riferimento saranno compilati in automatico, prendendo i valori riportati nella tabella 2 in figura 5.2;
- per ogni "area d'interesse" se ne identifica il tipo di zona generata e si assegna un valore tra quelli presenti nell'apposita tendina;
- per ogni "area d'interesse" si valuta la presenza dei lavoratori  $P_L$  e si assegna un valore tra quelli presenti nell'apposita tendina;
- per ogni "sostanza" presente nell'aria in esame, se ne identifica l'indice di esplosività,  $K_G$  per gas, vapori o nebbie esplosive,  $K_{ST}$  per le polveri combustibili, e si assegna un valore tra quelli presenti nell'apposita tendina;
- per ogni "sostanza" presente nell'aria in esame, si determina l'estensione del volume di atmosfera esplosiva potenzialmente pericoloso,  $V_Z$  per gas, vapori o nebbie infiammabili,  $V_{DZ}$  per le polveri combustibili, e si assegna un valore tra quelli presenti nell'apposita tendina;
- per ogni atmosfera esplosiva identificata (sostanza in una determinata area d'interesse), si determina lo stato di confinamento della nube CN e si assegna un valore tra quelli presenti nell'apposita tendina;
- solo per le polveri combustibili, si determina lo spessore di polvere combustibile SS depositata che si crea durante l'emissione, e si assegna un valore tra quelli presenti nell'apposita tendina;
- una volta determinati tutti i parametri, il foglio di calcolo associa ad ogni voce delle rispettive tendine un indice, come già discusso nel capitolo 4, e calcola il fattore di danno D risultante; il foglio escluderà in automatico dal calcolo finale il parametro SS se si sta esaminando questo per gas, vapori o nebbie esplosive.

58	Tab. 3	Sostanza	Area d'interesse	Zona generata	P <sub>L</sub>	K <sub>G</sub> o K <sub>ST</sub> (bar*m/s)	V <sub>2</sub> o V <sub>02</sub> (dm <sup>3</sup> )	CN	SS (mm)	D
59		Gas metano	Reperto A	2	Continua	51÷100	>10	Parzialmente confinata		2,2
60			Reperto B	2	Continua	51÷100	>10	Non prevista		2,2
61			Reperto E	2	Continua	51÷100	>10	Non confinata		2,2
62		Polvere	Reperto A (Scarico in secchiello)	21	Continua	>100	>10	Completamente confinata	Assente	2,6
63			Reperto A (Big Bag/GIR)	22	Continua	>100	>10	Parzialmente confinata	Assente	2,4
64			Reperto B (Scarico in secchiello)	21	Continua	>100	>10	Parzialmente confinata	Assente	2,6
65			Reperto B (Big Bag/GIR)	22	Continua	>100	>10	Parzialmente confinata	Assente	2,4
66		GPL	Reperto A	2	Continua	51÷100	>10	Parzialmente confinata		2,2
67		Acetilene	Reperto A	2	Continua	>100	>10	Parzialmente confinata		2,4
68		Idrogeno	Tettoia esterna	1	Continua	>100	>10	Parzialmente confinata		2,6
69										
70										
71										
72										
73										
74										
75										
76										
77										
78										
79										
80										
81										
82										

Figura 5.3. Determinazione del fattore di danno D

La tabella 3, in figura 5.3, risulta essere una delle più utili dell'intero foglio di calcolo. Infatti, proprio questa fase, essendo ricca di parametri da considerare (con annessi indici), risulta quella più soggetta ad errore umano.

#### 5.1.4 Tabella 4, valutazione del rischio R

La tabella 4 del foglio di calcolo, in figura 5.4 e figura 5.5, permette di calcolare il rischio legato al pericolo P in modo automatico ed immediato. Si evitano così eventuali errori dovuti a sviste nei calcoli.

I valori presenti nella tabella 4 sono tutti legati alle valutazioni fatte nelle precedenti tabelle. La compilazione della tabella 4, in figura 5.4 e 5.5, è la seguente:

- l'identificazione della sostanza pericolosa in esame, il luogo di riferimento saranno compilati in automatico, prendendo i valori riportati nella tabella 2 in figura 5.2, mentre il valore della cella "zona generata" sarà compilata in automatico, prendendo i valori dalla tabella 3, in figura 5.3;
- il fattore di pericolo P sarà calcolato in automatico in base alla definizione di zona pericolosa fornita in tabella 3, figura 5.3;
- i vari fattori di contatto (13 in tutto) si autocompilano prendendo i valori dalla tabella 2, in figura 5.2;
- il fattore di danno D prende il valore calcolato precedentemente in tabella 3, figura 5.3;
- il rischio R sarà dunque calcolato con l'uso della formula (4.2), prendendo i valori per il calcolo dalle celle precedentemente definite nella tabella 4 in esame, figura 5.4 e figura 5.5.

Tab. 4		Sostanza	Area d'interesse	Zona generata	Fattore P	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9	C10	C11	C12	C13	Fattore D
87	Gas metano	Reparto A		2	1	1	0	2	3	2	3	2	3	0	0	0	0	0	2,2
88		Reparto B		2	1	1	0	2	3	2	3	2	3	0	0	0	0	0	2,2
89		Reparto E		2	1	1	0	2	3	2	3	2	3	0	0	0	0	0	2,2
90	Polvere	Reparto A (Scarico in secchiello)		21	2	0	0	2	3	2	3	2	3	0	0	0	0	0	2,6
91		Reparto A (Big Bag/GIR)		22	1	0	0	2	3	2	3	2	3	0	0	0	0	0	2,4
92		Reparto B (Scarico in secchiello)		21	2	0	0	2	3	2	3	2	3	0	0	0	0	0	2,6
93		Reparto B (Big Bag/GIR)		22	1	0	0	2	3	2	3	2	3	0	0	0	0	0	2,4
94	GPL	Reparto A		2	1	3	3	2	3	2	3	2	3	0	0	0	0	0	2,2
95	Acetilene	Reparto A		2	1	3	3	2	3	2	3	2	3	0	0	0	0	0	2,4
96	Idrogeno	Tettoia esterna		1	2	0	0	0	0	0	0	3	2	3	0	0	0	0	2,6

Figura 5.4. Elenco dei fattori P, C e D per la valutazione del rischio R

		Rischio R												
Fattore D	R1	R2	R3	R4	R5	R6	R7	R8	R9	R10	R11	R12	R13	
2,2	2,2	0	4,4	6,6	4,4	6,6	4,4	6,6	0	0	0	0	0	
2,2	2,2	0	4,4	6,6	4,4	6,6	4,4	6,6	0	0	0	0	0	
2,2	2,2	0	4,4	6,6	4,4	6,6	4,4	6,6	0	0	0	0	0	
2,6	0	0	10,4	15,6	10,4	15,6	10,4	15,6	0	0	0	0	0	
2,4	0	0	4,8	7,2	4,8	7,2	4,8	7,2	0	0	0	0	0	
2,6	0	0	10,4	15,6	10,4	15,6	10,4	15,6	0	0	0	0	0	
2,4	0	0	4,8	7,2	4,8	7,2	4,8	7,2	0	0	0	0	0	
2,2	6,6	6,6	4,4	6,6	4,4	6,6	4,4	6,6	0	0	0	0	0	
2,4	7,2	7,2	4,8	7,2	4,8	7,2	4,8	7,2	0	0	0	0	0	
2,6	0	0	0	0	0	15,6	10,4	15,6	0	0	0	0	0	

Figura 5.5. Valutazione del rischio R

Si può notare dalla figura 5.5, le celle riferite al rischio legato ad un certo pericolo P, si colorano automaticamente in base al valore che viene fornito dalla cella. La colorazione scelta per le celle in questione è quella che si è usata per la compilazione della tabella 4.5 presente nel capitolo 4. Si è scelto il riempimento delle celle tramite colorazione così da poter subito individuare quali risultano gli aspetti critici, su cui poi si dovrà intervenire.

Caratteristica chiave della tabella 4, in figura 5.4 e figura 5.5, è la sua totale autonomia di compilazione. Infatti, non è necessario inserire alcun dato in suddetta tabella, i valori in essa presenti sono tutti presi dalle tabelle precedenti e i calcoli vengono prodotti in automatico, compreso il riempimento colorato delle celle interessate.

### 5.1.5 Tabella 5, barriere protettive e calcolo del rischio compensato R'

Una volta valutato il rischio, e visti gli aspetti critici della valutazione, il tecnico incaricato della valutazione decide quali potrebbero essere le barriere di protezione idonee per ridurre il rischio a valori accettabili, per quanto possibile.

La tabella 5, figura 5.6 e figura 5.7, permette, dopo aver deciso le barriere protettive, di calcolare il valore del rischio compensato (o residuo) in modo immediato.

Questa volta la compilazione non risulta del tutto automatica ma andranno scelti, da apposite tendine, i valori da assegnare ad ogni barriera protettiva. La compilazione della tabella 5, figura 5.6 e figura 5.7, sarà la seguente:

- l'identificazione della sostanza pericolosa in esame, il luogo di riferimento saranno compilati in automatico, prendendo i valori riportati nella tabella 2 in figura 5.2, mentre il valore della cella "zona generata" sarà compilata in automatico, prendendo i valori dalla tabella 3, in figura 5.3;
- si definisce la "misura di prevenzione del rischio (M)" da prendere, verrà fatto per 15 voci differenti (BP, BD e 13 per i rispettivi BC);
- si seleziona il valore della protezione presa, seguendo nella scelta le valutazioni fatte nelle tabelle 4.1, 4.2 e 4.3, e scegliendo i valori da apposite tendine;
- si definisce il valore dei fattori compensati P', C' e D', con compilazione automatica prendendo i valori da quelli precedentemente definiti, e facendo uso delle formule (5.1a), (5.1b) e (5.1c);
- si calcola il rischio compensato R' usando la formula (4.3) nel capitolo 4.

$$P' = (P - BP) \quad (5.1a)$$

$$D' = (D - BD) \quad (5.1b)$$

$$C' = (C - BC) \quad (5.1c)$$

Tab. 5	Sostanza	Area d'interesse	Zona generata	Misura di	BP	P'	Misura di	BD	D'	Misura di riduzione del rischio (M)	C1	BC1	C1'	Mis	BC2	C2'
113	Gas metano	Reparto A	2		0	1		2,2		Permessi di lavoro a caldo. Piano di manu	1	0			0	
114		Reparto B	2		1	1		2,2		Permessi di lavoro a caldo. Piano di manu	1	0			0	
115		Reparto E	2		2	1		2,2		Permessi di lavoro a caldo. Piano di manu	1	0			0	
116					3	2		2,6							0	
117	Polvere	Reparto A (Scarico in secchiello)	21			1		2,4							0	
118		Reparto A (Big Bag/GIR)	22			2		2,6							0	
119		Reparto B (Scarico in secchiello)	21			1		2,4							0	
120		Reparto B (Big Bag/GIR)	22			2		2,6							0	
121	GPL	Reparto A	2			1		2,2		Procedura per l'utilizzo di bombole GPL e	1	2	Procec	1	2	
122	Acetilene	Reparto A	2			1		2,4		Procedura per l'utilizzo di bombole GPL e	1	2	Procec	1	2	
123	Idrogeno	Tettoia esterna	1			2		2,6							0	
124																
125																
126																
127																
128																
129																
130																
131																
132																
133																
134																
135																
136																
137																
138																

Figura 5.6. Misure di prevenzione e calcolo dei fattori compensati P', C' e D'





## Conclusioni

Col passare degli anni sono state trovate molte soluzioni al problema ma la valutazione racchiude in se una certa incertezza intrinseca che, pur considerando tutto ciò che pensiamo ci sia da considerare, fa sì che ogni anno in Italia e nel mondo accadano incidenti legati ad esplosioni causate da atmosfere esplosive.

Talvolta causa l'errore umano, forse il fattore di più difficile interpretazione e quasi impossibile da quantificare, talvolta per metodi di valutazione che sembravano essere idonei per il caso in esame che non si sono rivelati tali, il rischio di esplosione è sempre dietro l'angolo.

In questi anni si è visto un grande passo avanti verso una maggiore sicurezza sul lavoro, e le previsioni future sembrano essere ancora più rosee. Si sta assistendo ad un continuo aggiornamento di norme e guide tecniche, una maggiore responsabilità nei luoghi di lavoro e un investimento maggiore da parte degli enti pubblici e privati per ridurre il più possibile l'insorgere di incidenti nel luogo di lavoro.

La tecnologia e i nuovi software programmati dalle aziende stanno alzando l'asticella di affidabilità dei metodi usati per le valutazioni, strumenti che sono di grande aiuto per la determinazione di parametri chiave e per una più attenta e precisa analisi delle variabili in gioco. Ad esempio, una valutazione ATEX, come visto, richiede la determinazione di una molteplicità di parametri che variano molto da caso in caso e che, in assenza di strumenti di calcolo veloci ed affidabili, risulterebbero noiosi da ricavare e soggetti a molti errori. Invece una valutazione ATEX affiancata dall'uso di software come TuttoNormel ne semplifica i calcoli e ne velocizza la procedura.

Lo scopo di questo lavoro di tesi è stato proprio creare un supporto che, con l'utilizzo combinato di software come TuttoNormel, potesse velocizzare la parte finale della valutazione e cioè il calcolo del fattore di rischio che è sinonimo della probabilità che un determinato fenomeno esplosivo avvenga e con quale entità.

Inizialmente il metodo di valutazione del rischio ATEX utilizzava una formula molto restrittiva. Questa considerava con ridondanza gli aspetti legati al danno che la sostanza potesse causare nelle condizioni in cui si era analizzata. Questo approccio risultava essere poco affidabile in quanto forniva valori troppo alti, così alti che quasi sempre si era presenza di un rischio su cui intervenire. L'uso di una formula più immediata ha reso la valutazione più vicina ai risultati attesi. Così ottenuto il valore del rischio vengono valutati i provvedimenti utili per ridurre il valore.

Il programma sebbene funzionante e utile per la valutazione, richiede ancora piccoli miglioramenti atti a facilitare anche la stesura della relazione finale.

L'evoluzione della materia in esame e la consapevolezza della necessità di sentirsi sicuri sul posto di lavoro, sta portando avanti lo studio dei rischi di incedenti che si nascono dietro un qualsiasi processo produttivo. Anche se ancora oggi non si è arrivati a risultati eccellenti, si spera che nel giro di qualche anno si facciano ancora passi avanti e che, le aziende in primis e gli enti pubblici in seguito, facciano di tutto per assicurare un ambiente sicuro in cui poter lavorare, così da garantire un clima più sicuro per i lavoratori.



## Bibliografia

- [1] D.lgs. 81/2008 e smi “Testo unico sulla salute e sicurezza sul lavoro”, Titolo XI
- [2] <http://www.safetyworkingareas.org/>
- [3] Carlo Ludovico Morozzo di Bianzè, Piccinini, 1996 (1788), Norberto, Relazione su una violenta esplosione, Politecnico di Torino, Torino, 1996, Italia
- [4] Basso B., Bellamino F., Carpegna G., Alviano M., Iannello S. e Sai G.M., 2015, La prevenzione delle esplosioni da polvere. Caso studio: le attività molitorie, [www.arpa.piemonte.it](http://www.arpa.piemonte.it), pp. 4–5, [https://www.arpa.piemonte.it/pubblicazioni-2/pubblicazioni-anno-2015/la-prevenzione-delle-esplosioni-da-polvere/at\\_download/file](https://www.arpa.piemonte.it/pubblicazioni-2/pubblicazioni-anno-2015/la-prevenzione-delle-esplosioni-da-polvere/at_download/file)
- [5] Cavaliere A., 2011, Manuale per l’applicazione delle direttive ATEX. Classificazione dei luoghi, valutazione e gestione dei rischi da atmosfere esplosive, EPC Editore, Roma, 2011, Italia
- [6] Norma UNI EN 13673-1 Determinazione della pressione massima di esplosione e della velocità massima di aumento della pressione di gas e vapori. Parte 1: Determinazione della pressione massima di esplosione
- [7] Norma UNI EN 14034-1 Determinazione delle caratteristiche di esplosione di nubi di polvere. Parte 1: Determinazione della pressione massima di esplosione di nubi di polvere
- [8] Rogowski Z. W., 1977, Explosion protection methods by relief, I. Chem. E. Symposium Series N. 49, 1977
- [9] Marshall M. R., 1977, Calculation of gas explosion relief requirements: the use of empirical equations; I. Chem. E. Symposium Series N. 49, 1977
- [10] Cabbage P. A., Marshall M. R., 1972, Pressure generated in combustion chambers by the ignition of air–gas mixture, I. Chem. E. Symposium Series N. 33, 1972
- [11] Rasbash D. J., The relief of gas and vapour explosions in domestic structures, Fire Research Note N. 759, 1969
- [12] Norma UNI EN 13673-1 Determinazione della pressione massima di esplosione e della velocità massima di aumento della pressione di gas e vapori. Parte 2: Determinazione della velocità massima di aumento della pressione di esplosione
- [13] Norma UNI EN 26184-1 Sistemi di protezione contro le esplosioni. Parte 1: Determinazione degli indici di esplosione di polveri combustibili in aria
- [14] Norma UNI EN 26184-3 Sistemi di protezione contro le esplosioni. Parte 3: Determinazione degli indici di esplosione di miscele combustibile/aria diverse da polvere/aria e gas/aria
- [15] CEI 31-35 Atmosfere esplosive. Guida alla classificazione dei luoghi con pericolo di esplosione per la presenza di gas in applicazione della norma CEI EN 60079-10-1
- [16] CEI 31-56 Costruzioni per atmosfere esplosive per la presenza di polveri combustibili. Guida all’applicazione della norma CEI EN 61241-10 (CEI 31-66) “Classificazione delle aree dove sono o possono essere presenti polveri esplosive”
- [17] CEI EN 61241-10 Costruzioni elettriche destinate ad essere utilizzate in presenza di polveri combustibili. Parte 10: Classificazione delle aree dove sono o possono essere presenti polveri combustibili
- [18] CEI 31-87 Atmosfere esplosive. Parte 10-1: Classificazione dei luoghi - Atmosfere esplosive per la presenza di gas
- [19] Bowen P. J. e Shirvill L. C., 1994, Combustion hazards posed by the pressurized atomization of high-flashpoint liquids, in “*Journal of Loss Prevention in the Process Industries Vol. 7*”, (P. Amyotte, G. Landucci, G. Reniers, Eds.), pp. 233-241, [www.elsevier.com/locate/jlp](http://www.elsevier.com/locate/jlp)
- [20] Norma UNI EN 12207 Finestre e porte. Permeabilità all’aria – Classificazione

[21] CEI 31-88 Atmosfere esplosive. Parte 10-2: Classificazione dei luoghi - Atmosfere esplosive per la presenza di polveri combustibili

[22] Norma UNI EN 1127-1, 2011, Atmosfere esplosive - Prevenzione dell'esplosione e protezione contro l'esplosione - Parte 1: Concetti fondamentali e metodologia, 2011

[23] Colwell J. D., Reza A., 2005, Hot surface ignition of automotive and aviation fluids, Fire Technology, Vol. 41, N. 2, 2005, pp. 99 – 117

[24] Babrauskas V., 2003, Ignition handbook: principles and applications to fire safety engineering, fire investigation, risk management and forensic science, Fire Science Publishers, Issaquah WA, 2003, USA