



MINISTERO DELL'INTERNO



CORPO NAZIONALE
DEI VIGILI DEL FUOCO

ANALISI DEL RISCHIO GAS: INCENDIO E TOSSICITÀ

DOTT.ING. PIETRO RASCHILLA' - DOTT.ING. DONATELLO DI MARZO
Comando Provinciale Vigili del Fuoco di Savona Via Nizza, 35 - 17100 Savona
Tel.019/230131; Fax.019/263582
pietro.raschilla@vigilfuoco.it; donatello.dimarzo@vigilfuoco.it;

ESTRATTO

Questa relazione ha come obiettivo di illustrare la pericolosità indotta da un' esplosione di gas e le conseguenze che può avere in un edificio in termini strutturali. La fenomenologia dell'esplosione (confinata, semiconfinata e non confinata) e le equazioni che governano la Gasdinamica reattiva classica risultano propedeutiche alla comprensione delle pericolosità e dei rischi indotti. Si riporta di seguito un esempio applicativo che ipotizza una fuga di gas all'interno di una centrale termica dove è collocata una caldaia di potenzialità nota con condizioni al contorno definite dai parametri termofluidodinamici: viene svolta un'analisi del rischio di esplosione calcolando la concentrazione della miscela esplosiva nell'intervallo di esplosività ai sensi della norma AtEx CEI 31-30. Alcuni brevi cenni sulla tossicità e sugli indici per la valutazione delle concentrazioni di gas tossici completano il lavoro.

Un gas è classificato dalla teoria della materia come un aeriforme caratterizzato da una temperatura critica inferiore alla temperatura ambiente; la natura del gas fa sì che è disponibile ad una reazione di combustione già nel suo stato.

Il verificarsi di questo fenomeno dipende esclusivamente dalla concentrazione di gas nella miscela con l'aria e dall'energia minima di attivazione della reazione.

Il fenomeno della combustione, talvolta, in dovute condizioni, può degenerare in una esplosione, accompagnata da notevoli aumenti di pressione, calore ed energia cinetica.

Tali aumenti di energia cinetica favoriscono scambi di quantità di moto, inducendo notevoli danni all'ambiente circostante.

Le equazioni che studiano questi fenomeni sono quelle classiche della Gasdinamica tradizionale e pertanto si rifanno alla *Conservazione della Massa, Conservazione dell'Energia e le equazioni di Navier Stokes*. Questo set di equazioni viene risolto restituendo le variabili termofluidodinamiche u , p , ρ , T (Velocità, Pressione, Densità, Temperatura) per la soluzione di questi sistemi si ricorre all'utilizzo di metodologie di calcolo automatico con l'ausilio del calcolatore proprie della *CFD (Computational Fluid Dynamics)*.

Equazione di Conservazione Massa:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho u) = 0$$

Equazione di Conservazione dell'Energia

$$\rho \frac{De}{Dt} = -p \nabla \cdot u + \tau : \nabla u - \nabla \cdot q$$

Equazione di Navier-Stokes

$$\rho \frac{Du}{Dt} = -\nabla p + \frac{1}{3} \mu \nabla (\nabla \cdot u) + \mu \nabla^2 u$$

- Velocità u [m/s];
- Pressione p [Pa];
- Densità ρ [Kg/m³];
- Viscosità μ [Ns/m²];
- Energia all'unità di massa e [J/Kg];
- Sforzi tangenziali τ [Pa];
- Calore scambiato q [J/Kg]

In questa sede non sono utilizzati tali metodi; infatti sono state utilizzate le equazioni scalari della Termodinamica Classica e relazioni empiriche risultato di sperimentazione in laboratorio.

L'esplosione è di fatto una reazione di combustione di un gas rilasciato accidentalmente in ambiente che miscelato in aria libera può essere avvertito come *un rilascio* di una enorme quantità di energia sottoforma di calore e luce e/o un aumento della pressione.

Le esplosioni possono essere classificate:

1. *Esplosioni Confinare;*
2. *Esplosioni Semi Confinare;*
3. *Esplosioni Non Confinare.*

La prima tipologia è definita come tale se si realizza all'interno di un ambiente chiuso, senza superfici di sfogo.

Le esplosioni semiconfinare sono esplosioni inizialmente confinate che hanno uno sfogo attraverso una parete: diversamente dalle esplosioni confinate dipendono dalla geometria interna e dalla velocità di combustione. Tali parametri influenzano la pressione di picco.

La terza tipologia avviene quando la miscela di aria gas è in atmosfera libera, il processo è abbastanza veloce e genera un'onda di pressione, che dipende dalla velocità con cui la fiamma brucia nella miscela. La propagazione ondosa avviene secondo un fronte sferico.

L'impatto che può avere un'esplosione sulle strutture è tale che pochi sono in grado di resistere. Edifici, parti di impianti industriali, non sono in grado di resistere a meno che non siano stati progettati specificatamente per tale scopo.

Si riporta di seguito una tabella riepilogativa dei valori delle pressioni che portano al cedimento degli elementi strutturali.

Elemento strutturale	Pressione di cedimento [mbar]
Vetri	20 – 70
Porte	20 – 30
Tramezzi	20 – 50
Muri di blocchi	40 – 50
Muri di mattoni semplici	70 – 150

La risposta delle strutture e dei componenti strutturali ad una sollecitazione causata da un evento esplosivo naturalmente è da ricercarsi nella durata dell'evento, nella frequenza propria del sistema e nelle frequenze di risonanza.

Relativamente alla tossicità dei gas vengono illustrati i parametri indicatori di uso comune:

- **IDLH** (*Immediately Dangerous to Life and Health*), rappresenta la massima concentrazione che un lavoratore può sopportare per 30 minuti prima di subire danni irreversibili.
- **TLV-TWA** (*Time Weight Average*), rappresenta la concentrazione media ponderata nel tempo per una giornata lavorativa di 8 ore e per 40 ore settimanali a cui quasi tutti i soggetti possono essere esposti ripetutamente, giorno dopo giorno, senza effetti negativi
- **TLV-STEL** (*Short Time Exposition*), è la concentrazione a cui quasi tutti i soggetti possono essere esposti continuativamente per un breve periodo di tempo senza che insorgano: irritazioni; alterazione cronica o irreversibile del tessuto; narcosi di intensità sufficiente ad accrescere la probabilità di infortuni o di menomare le capacità dell'individuo.
- **TLV-C** (*Ceiling*), è la concentrazione che non deve essere superata neppure istantaneamente.

APPLICAZIONE NUMERICA

L'oggetto dell'applicazione numerica è quello di valutare, mediante un procedimento di calcolo, la classificazione di un determinato ambiente ai sensi della norma AtEx CEI 31-30.

Si considera la fuoriuscita di gas metano attraverso la valvola di intercettazione di una caldaia da 40 kW. Il locale tecnico presenta una luce di ventilazione posta ad una certa distanza dall'apparecchio. Pertanto i parametri che influenzano la massa "esplosibile" sono la ventilazione naturale presente e la portata di gas che fuoriesce dalla ventilazione.

L'esplosione avviene se la concentrazione del gas nella miscela aria-gas risulta essere compresa nell'intervallo di esplosività.

Questa concentrazione sarà funzione del grado ventilazione del locale, del tipo di emissione gassosa (Portata massica di gas) e della disponibilità della ventilazione.

Le relazioni di calcolo utilizzate sono state tratte dalla norma *CEI 31-35 del 2001-01*.

DEFINIZIONI ATEX

APPARECCHI

Categoria I: Apparecchi che possono generare esplosioni al 3° guasto;

Categoria II: Apparecchi che possono generare esplosioni al 2° guasto;

Categoria III: Apparecchi che possono generare esplosioni al 1° guasto;

AREE DI RISCHIO

Zona 0: zona in cui persiste per lunghi periodi una miscela esplosiva (più di 1000 ore/anno);

Zona 1: zona in cui occasionalmente avviene una formazione di una miscela esplosiva (da 10 a 1000 ore/anno);

Zona 2: zona in cui è poco probabile che si verifichi la formazione di una miscela esplosiva (da 0.1 a 10 ore/anno);

SORGENTI DI EMISSIONE (SE)

Emissioni di grado continuo: emissione continua o per lunghi periodi (e.g.: sversamento di liquidi infiammabili);

Emissioni di Grado I: emissione periodica o occasionale durante il funzionamento (e.g.: perdita da una valvola di sicurezza)

Emissioni di Grado II: emissione non prevista che si verifica al più per un breve periodo (e.g.: accoppiamenti flangiati, valvole di intercettazione);

VOLUME VZ: è definito come l'ipotetico volume di atmosfera esplosiva;

DISTANZA PERICOLOSA (dz): è la distanza dalla SE a partire dalla quale la concentrazione dei gas in aria è inferiore al *LEL* (costituisce un riferimento per la definizione delle geometrie delle aree pericolose);

DISTANZA DI PROTEZIONE a : è il valore di sicurezza assunto ($a > dz$);

DISPONIBILITÀ DELLA VENTILAZIONE

Ventilazione è Buona: se risulta presente e con continuità;

Ventilazione è Adeguata: se risulta presente; è ammessa un'interruzione poco frequente;

Ventilazione Scarsa: se non si verificano i primi due requisiti;

GRADO DI VENTILAZIONE

ALTO: se la ventilazione è tale da ridurre in maniera istantanea la concentrazione in prossimità della sorgente di emissione (la concentrazione X di miscela esplosiva risulta inferiore al LEL);

MEDIO: se la ventilazione non viene ridotta in maniera istantanea ma il grado è tale da mantenere valori della concentrazione X al di sotto del LEL;

BASSO: se la ventilazione non è in grado di controllare la concentrazione della miscela esplosiva X , consentendo il perdurare della stessa nell'ambiente;

CAMPO VICINO: è lo spazio prossimo alla SE, la ventilazione non è in grado di influenzare il campo vicino e la $u_{\text{ARIA}} \ll u_{\text{EMISSIONE}}$;

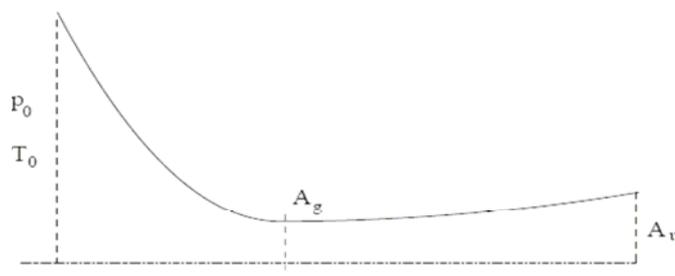
CAMPO LONTANO: è lo spazio distante dalla SE in cui la concentrazione non dipende più dalle caratteristiche della sorgente SE ma è solo funzione della portata di ventilazione e di quella emittente.

DATI

- Potenza Caldaia $P=40$ [kW];
- Densità del gas a $T=20^{\circ}\text{C}$ $\rho=0.719$ [kg/m³];
- Massa Molare, $M=16.34$ [kg/mol];
- Rapporto $k = c_p/c_v=1.31$;
- Limite inferiore di esplosività, LEL =3.93[%];
- Pressione a monte della valvola, $p=1.033$ [bar];
- Pressione ambiente, $p_a=1.013$ [bar];
- Coefficiente di efflusso, $c=0.8$;
- Superficie del foro, $A_g=0.25$ [mm²];
- Volume Ambiente, $V=18$ [m³];
- Costante del Gas in oggetto, $R=508.8$ [J/KgK];
- Temperatura Esterna, $T_e=20$ [°C];
- Temperatura Interna Locale, $T_i=22.1$ [°C];
- Temperatura Media, $T_m=21.05$ [°C];
- Ventilazione Naturale, $A_{\text{vent}}=0.3$ [m²];
- Distanza dalla Sorgente Emissiva (SE), $L=0.4$ [m];
- Concentrazione iniziale di gas, $X_0=50$ [%];
- Fattore di efficacia della ventilazione, $f=2$;
- Fattore di sicurezza riferito al LEL, $\kappa=0.5$;
- Ricambio Orario di aria, $N=0.33$ [vol/h];
- Accelerazione di gravità, $g=9.81$ [m/s²];

PROCEDURA DI CALCOLO

Consideriamo l'uscita di gas dal foro, in queste condizioni questo si comporterà come un ugello, dotato di una sezione ristretta A_g , di una sezione di uscita A_u , per poter calcolare la portata dell'ugello bisognerà anzitutto stabilire il tipo di flusso:



1. In questo step si stabilisce se la fuga di gas attraverso il foro è un flusso sonico ($M=1$, numero di Mach) o subsonico ($M<1$), ovvero se nella sezione di gola si ha una ricompressione del flusso oppure evolve in condizioni di sonicità:

$$\frac{p_a}{p} \leq \left(\frac{2}{k+1} \right)^{\frac{k}{k-1}}$$

2. Atteso che le condizioni all'uscita dal foro siano tali (pressione atmosferica) da far ricomprimere il flusso questo diminuirà la sua velocità, e pertanto si applicherà la seguente relazione per il calcolo della portata massica, come si può notare questa dipende dalla natura del gas, dalla pressione e dalla temperatura a monte del foro, dalla sezione di gola, da un coefficiente di efflusso e da un coefficiente φ funzione del rapporto di espansione e del tipo di gas:

$$G = \varphi c A_g \sqrt{k \left(\frac{2}{k+1} \right)^{\frac{k+1}{k-1}} \frac{p}{\sqrt{RT_a}}}$$

$$\varphi = \beta^{\frac{1}{k}} \sqrt{\left[1 - \beta^{\frac{k-1}{k}} \right] \left[\left(\frac{2}{k-1} \right) \left(\frac{k+1}{2} \right)^{\frac{k+1}{k-1}} \right]}$$

3. In questo *step* si calcola la portata di ventilazione realmente presente nell'ambiente è dovuta all'effetto *camino* attraverso l'apertura praticata nel locale tecnico:

$$q = c_s \frac{A_{vent}}{3} \sqrt{\frac{(T_i - T_e)gL}{T_m}}$$

Questa relazione è funzione dell'area di ventilazione praticata (reperibile attraverso il DM 12.04.1996 e funzione dell'ubicazione del locale e della potenza termica della caldaia), della temperatura interna, esterna e media, nonché della distanza di A_{vent} dal punto in cui si verifica la perdita e da un opportuno coefficiente di efflusso della griglia di ventilazione.

4. Dato che la caldaia in questione è di bassa potenzialità, si ritiene a favore di sicurezza, poichè non è sorvegliata, che il tempo per rilevare la perdita nel Campo lontano abbia raggiunto il valore di regime, si calcola la concentrazione media come rapporto tra la portata massica del gas attraverso il foro e la portata massica di aria presente in ambiente a temperatura media raggiunta nel locale:

$$X_m = \frac{G}{\rho_{(T_a)} q} 100$$

5. La distanza dz viene calcolata mediante una relazione che vede una diretta proporzionalità con la pressione a monte della perdita di gas e con una crescita esponenziale della concentrazione e inversamente proporzionale al limite inferiore di esplosività questo sempre nell'ottica di sicurezza. Per valori compresi tra la sorgente di emissione SE e dz si avrà una zona superiore al LEL e pertanto con un rischio di esplosione; per valori superiori a dz la concentrazione di gas diminuirà fino alla completa neutralizzazione; questo valore viene scelto in maniera del tutto arbitraria e viene dedotto con la lettera a , questo parametro ci dà delle utili informazioni sulla geometria dell'eventuale miscela esplosiva:

$$d_z = 22.275 M^{-0.4} A_g^{0.5} e^{\frac{76 X_m}{MLEL(\%)}} \left(\frac{LEL(\%)}{100} \right)^{-1} \sqrt{10^{-5} p}$$

6. Per poter calcolare il volume ipotetico di miscela esplosiva è necessario stabilire la portata minima volumetrica teorica di aria di ventilazione necessaria a diluire una data emissione di sostanze infiammabili fino alla concentrazione richiesta più bassa del limite inferiore di esplosività, tale portata (volumetrica) è funzione della portata di gas che fuoriesce dal foro e da un fattore κ di sicurezza applicato al LEL che tipicamente vale 0.25 per emissioni di grado continuo e I e 0.5 per emissioni di II grado:

$$q_{adm} = \frac{GT_i}{\kappa LEL 293}$$

7. Dal calcolo della concentrazione media nel campo lontano si può fare un confronto con la concentrazione di verifica funzione del LEL e di un fattore f che tiene conto del fatto che un flusso d'aria è impedito da ostacoli e che lo stesso valore numerico che riutilizza per il calcolo del volume della miscela esplosiva:

$$X_m \leq \frac{\kappa LEL(\%)}{f}$$

8. Il volume V_z della ipotetica miscela esplosiva rappresenta il volume nel quale la concentrazione media del gas infiammabile è di 0.25 o 0.5 volte il valore del LEL; questo implica che ai limiti del volume stimato la concentrazione di gas è inferiore al LEL, ovvero il volume nel quale la concentrazione è superiore al LEL il volume V_z sarà inferiore, questo naturalmente aumenterà con il diminuire del numero dei ricambi ora che si realizzano all'interno del locale tecnico:

$$V_z = \frac{fq_{adm}}{N}$$

9. Tempo di persistenza della miscela esplosiva sarà una funzione anch'essa del numero dei volumi ora, infatti il segno meno e la inversa proporzionalità di N stanno ad indicare che la miscela esplosiva permarrà in ambiente tanto più quanto ci sarà il minor numero di ricambio dell'aria in ambiente:

$$t = \frac{-f}{N} \ln\left(\frac{\kappa LEL(\%)}{X_0}\right)$$

10. Valutazione mediante la tabella riassuntiva della *CEI 31-35 del 2001-01* del rischio di esplosione.

Dai calcoli effettuati si ricavano i seguenti risultati numerici:

Verifica	Valore
pa/p	0.98 > 0.54 (subsonico)
G [kg/s]	1.0412E-05
q [m ³ /s]	0.01088
X _m [%]	3.41
dz [m]	0.11

a [m]	0.15
q _{ADM} [m ³ /s]	0.00078
Verifica sulla concentrazione	0.134 < 0.198
V _z [m ³]	0.0047
t [s]	19.4

Grado della emissione Grade of release	Ventilazione Ventilation						
	Grado Degree						
	Alto High			Medio Medium			Basso Low
	Disponibilità Availability						
	Buona Good	Adeguate Fair	Scarsa Poor	Buona Good	Adeguate Fair	Scarsa Poor	Buona, Adeguata o Scarsa Good, Fair or poor
Continuo Continuos	(Zona 0 NE) (Zone 0 NE) Zona non pericolosa ^(a) Non-bazardous ^(a)	(Zona 0 NE) (Zone 0 NE) Zona 2 ^(a) Zone 2 ^(a)	(Zona 0 NE) (Zone 0 NE) Zona 1 ^(a) Zone 1 ^(a)	Zona 0 Zone 0	Zona 0 + Zona 2 Zone 0 + Zone 2	Zona 0 + Zona 1 Zone 0 + Zone 1	Zona 0 Zone 0
Primo Primary	(Zona 1 NE) (Zone 1 NE) Zona non pericolosa ^(a) Non-bazardous ^(a)	(Zona 1 NE) (Zone 1 NE) Zona 2 ^(a) Zone 2 ^(a)	(Zona 1 NE) (Zone 1 NE) Zona 2 ^(a) Zone 2 ^(a)	Zona 1 Zone 1	Zona 1 + Zona 2 Zone 1 + Zone 2	Zona 1 + Zona 2 Zone 1 + Zone 2	Zona 1 o Zona 0 ^(c) Zone 1 or Zone 0 ^(c)
Secondo ^(b) Secondary ^(b)	(Zona 2 NE) (Zone 2 NE) Zona non pericolosa ^(a) Non-bazardous ^(a)	Zona 2 NE Zone 2 NE Zona non pericolosa ^(a) Non-bazardous ^(a)	Zona 2 Zone 2	Zona 2 Zone 2	Zona 2 Zone 2	Zona 2 Zone 2	Zona 1 e anche Zona 0 ^(c) Zone 1 and even Zone 0 ^(c)

Nota: "+" significa "circondata da".
"±" significa "surrivolta da".

Dalla Tabella B1 della *CEI 31-35 del 2001-01* si evince che: Grado di ventilazione “ALTO” , Disponibilità della ventilazione: “BUONA”, Emissione di “II grado”.

Pertanto il luogo è classificato non pericoloso essendo presente una zona 2 di entità trascurabile (Zona 2 NE).

CONCLUSIONI:

Questo metodo per la classificazioni dei luoghi a rischio di esplosioni è facilmente implementabile sul calcolatore data la natura scalare delle relazioni utilizzate e può essere utilizzato da tecnici abilitati nella professione.

RINGRAZIAMENTI:

Si ringrazia il sig. Comandante Ing. Vincenzo Lotito per aver dato la possibilità di studiare questo tipo di tematiche, l’Ing. Fulvio Borsano per gli utili consigli in fase di stesura del lavoro e tutto il Personale operativo e non del Comando Provinciale dei Vigili del Fuoco di Savona.

BIBLIOGRAFIA:

B.Genova, M.Silvestrini, P.Simonetti - Esplosioni di Gas – Metodi Semplificati per la valutazione degli effetti – Dipartimento dei Vigili del Fuoco del Soccorso Pubblico e della Difesa Civile;

M.Napolitano – Appunti di Gasdinamica – Dipartimento di Ingegneria Meccanica e Gestionale – Politecnico di Bari;

Comitato Elettrotecnico Italiano - CEI EN 60079-10 – 31-30 – Classificazione dei luoghi pericolosi

Dott. Ing. Pietro RASCHILLA’ - Direttore Vice Dirigente del *CNVVF*

Dott. Ing. Donatello DI MARZO - Direttore del *CNVVF*
