

ESPLOSIONE DI GAS IN AMBITO CIVILE STUDIO DI UN CASO

D. Minisini – Comando VVF Udine, via Popone 55 – 33100 Udine
G. Fiocca, F. Zenier – ARTES srl, via C. Battisti 2/A – 30035 Mirano (VE)

SOMMARIO

Il recente evento incidentale avvenuto nel centro urbano di Roma, consistente in un'esplosione di gas di rete che ha causato effetti devastanti per il tributo di vite umane costato, in particolare ai Vigili del Fuoco, ha riportato in evidenza, soprattutto su spinta dei mezzi di informazione, le problematiche connesse con l'utilizzo in ambito civile di gas infiammabili, indifferentemente da rete o altro tipo di alimentazione o stoccaggio.

Si prende spunto da un caso avvenuto qualche anno fa, connesso a quella che a seguito di indagine è stata identificata come un'esplosione di gas metano di rete all'interno di una abitazione civile. Lo scopo dello studio, a prescindere dalla ricerca delle cause dell'evento, è di valutare l'applicabilità di modelli empirici ovvero fisico-matematici per la simulazione della dinamica incidentale, con l'utilizzo di dati relativi alle grandezze fisiche ed energetiche in gioco e tenendo in considerazione il ruolo rivestito dalle condizioni di ventilazione dell'ambiente, che influenzano in modo significativo la possibilità di formazione di miscela infiammabile all'interno di locali chiusi.

Si sottolinea la carenza, a livello nazionale, di metodi e studi correlati ad eventi incidentali simili a quello trattato, e di conseguenza la necessità di attingere a pubblicazioni internazionali (principalmente inglesi e statunitensi). La mancanza di tali risorse e la scarsa dimestichezza italiana con la metodologia di approccio a tavolino, da confrontare con l'analisi storica e l'esperienza sul campo, induce anche gli addetti ai lavori nel settore a non approfondire sufficientemente l'indagine, con il rischio di incorrere in errori valutativi non tollerabili.

1. DINAMICA DELL'INCIDENTE ED EFFETTI DI DANNO

L'incidente di cui si tratta avvenne in una palazzina a due piani bifamiliare, occupata da un unico residente (si vedano Figure n°1 e n°2 recanti ubicazione e planimetria dell'edificio esploso e Figura n°3 riportante il prospetto sud dello stesso edificio).

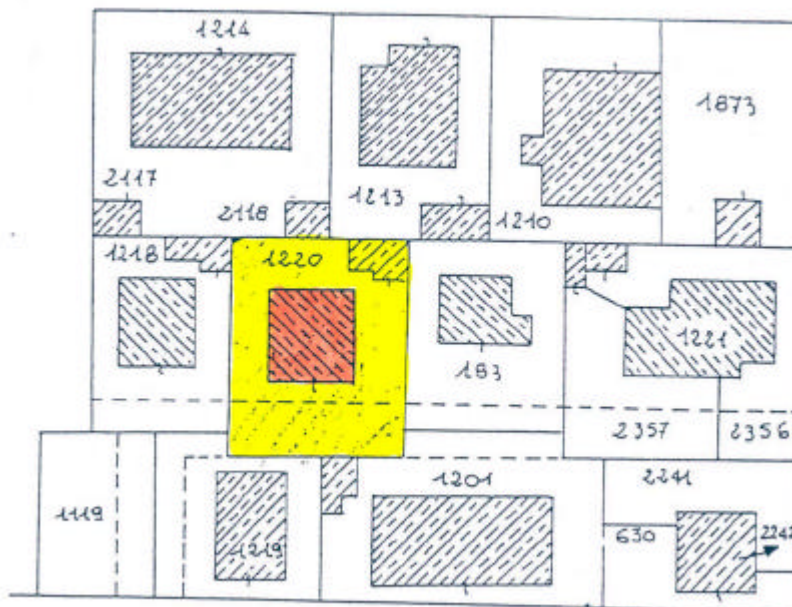


Figura n°1 – Estratto di mappa della zona dell'incidente

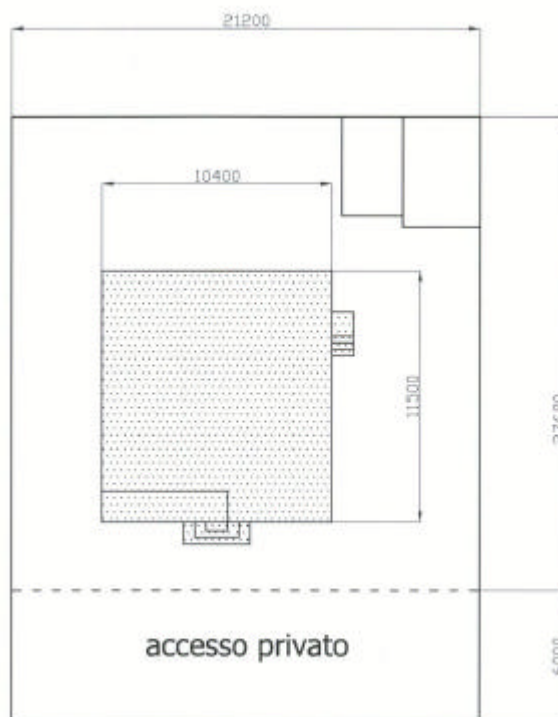


Figura n°2 – Planimetria del fabbricato



Figura n° 3 – Prospetto sud del fabbricato esploso

All'incirca alle 6.50 di mattina si verificò un'esplosione che provocò ingenti danni strutturali allo stesso fabbricato e danni a carico degli edifici limitrofi, con rottura dei vetri delle finestre e danneggiamento di tapparelle. Di seguito si riassumono le principali informazioni relative all'evento, utili per la successiva simulazione del fenomeno incidentale:

- Ora approssimativa dell'esplosione: 6.50
- Danni:
 - a) Danni ingenti a causa della sovrappressione a carico dell'edificio, con crollo quasi totale dello stesso: in particolare vennero distrutte tutte le pareti perimetrali in muratura di mattoni (spessore medio 30 cm, prive di qualsiasi elemento di rinforzo in c.a.) e vennero distrutti parzialmente i solai, realizzati in laterocemento. I danni maggiori, con proiezione di elementi, si ebbero verso la strada di accesso alla palazzina (direzioni sud, est/sud-est, ovest/sud ovest).

- b) Danni a causa della sovrappressione a carico degli edifici limitrofi: rottura di vetrate, tapparelle e altri elementi architettonici decorativi fino ad una distanza di circa 50-60 m lungo le direzioni prevalenti già citate.
- c) Bruciatura a bolle (“scorching”, vedere esempio Fotografia n°4) su una porta interna, probabilmente quella della cucina/sala pranzo dove verosimilmente ebbero luogo la fuoriuscita di gas e il successivo innesco della miscela infiammabile.

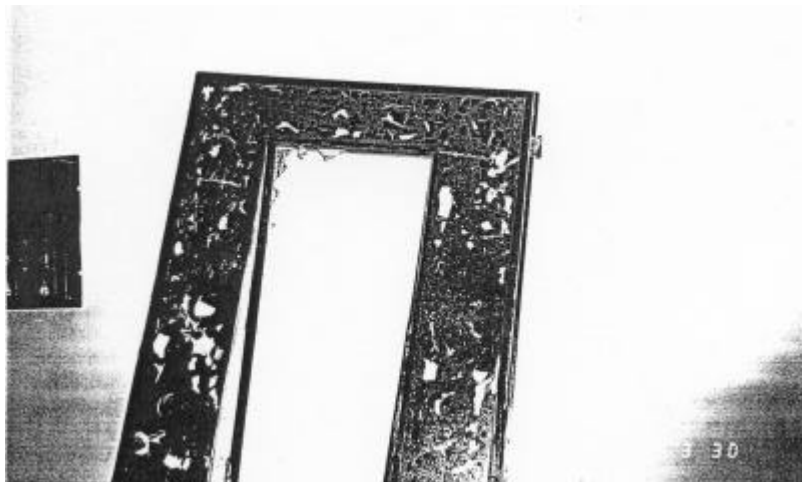


Figura n°4 – Fotografia della porta locale cucina con bruciatura “a bolle”

- Presenza di sostanze pericolose: l’investigazione sul posto ha evidenziato l’esclusiva presenza dell’impianto di adduzione del gas metano agli utilizzatori interni, derivato dalla rete cittadina.

L’analisi in loco ha portato subito ad identificare il fenomeno come una tipica deflagrazione in luogo confinato, ossia un’esplosione caratterizzata dalla combustione rapida di una miscela infiammabile (nel caso specifico, una miscela gassosa di gas metano ed aria) con velocità di propagazione della combustione relativamente bassa rispetto alla quella di propagazione dell’onda di pressione (velocità di fiamma), che viaggia all’incirca alla velocità del suono. Inoltre, l’assenza di tracce di combustione generalizzata, in concomitanza con gli ingentissimi danni prodotti dall’esplosione, hanno fatto concludere che la deflagrazione fosse avvenuta in una miscela quasi stechiometrica di gas in aria, poiché la combustione fu perfetta e completa, senza residui carboniosi di alcun tipo (“nerofumo”), eccetto che sul corpo della vittima e in alcune suppellettili vicine. Per il metano la concentrazione stechiometrica è pari al 9,5% vol. in aria (assunta pari al 10% vol. nel caso in esame).

2. STUDIO DELL’EVENTO INCIDENTALE

Lo studio dell’evento incidentale è finalizzato all’analisi di due aspetti ritenuti di interesse:

- 2.1 Valutazione del volume di miscela infiammabile;
- 2.2 Valutazione della portata di gas e del tempo necessari a formare il volume di cui sopra;

2.1 Valutazione del volume di miscela infiammabile

La valutazione del volume di miscela infiammabile formatosi all’interno dell’edificio è stata condotta basandosi sui rilievi effettuati sul luogo dell’incidente e attraverso l’impiego di formule analitico-empiriche. In particolare la stima è stata condotta utilizzando i seguenti dati:

- Distanze di danno agli edifici limitrofi
- Caratteristiche geometrico-costruttive del fabbricato
- Caratteristiche chimico fisiche del gas metano
- Relazione empirica di Cubbage & Marshall (ref. [1])

Innanzitutto si è partiti dal dato di sovrappressione osservato sugli edifici limitrofi, impostando le stime in modo che le valutazioni del volume in campo di infiammabilità e della massima pressione generata dall’esplosione fossero congruenti: per quanto riguarda gli effetti correlati ad un’esplosione, in particolare alla sovrappressione, di seguito si riporta una correlazione che può fornire indicazioni esaurienti. È tuttavia necessario rilevare che uno studio corretto degli effetti dovrebbe tener conto anche dell’impulso, o della

durata dell'onda di pressione, e delle fasi (pressione positiva e negativa), che possono essere determinanti per stabilire il grado di danno ipotizzabile a seguito del fenomeno.

DANNO	SOVRAPPRESSIONE (bar)
rottura vetri delle finestre (50 %)	0,015÷0,025
rottura vetri delle finestre (75-90 %)	0,035÷0,05
danneggiamento telai finestre, danni minori a muratura leggera	0,07
danni a strumentazione di processo, pannelli in legno, lamierino	0,1
danneggiamento torri di raffreddamento, canale e condotte di ventilazione, cedimento tetti abitazioni, danni a muratura	0,14÷0,17
deformazione serbatoi atmosferici, tubazioni; rottura strumentazione di processo, pannelli in calcestruzzo leggero; danni gravi ad edifici in muratura	0,20÷0,24
deformazione macchine, filtri, spostamento tubazioni dai supporti, rottura serbatoi atmosferici	0,25÷0,28
deformazione mantello di apparecchi di processo non a pressione (colonne di frazionamento, ecc.), deformazione muri in calcestruzzo (20 cm); distruzione muratura in laterizio	0,35÷0,38
valore di soglia per danni gravi ai timpani	0,40
deformazione serbatoi a pressione, spostamento da supporti di apparecchi leggeri	0,42÷0,45
rottura tubazioni, danni gravi ad apparecchi di processo e (rottura del mantello, ecc.), spostamento ferrocisterne	0,45÷0,49
danneggiamento serbatoi sferici a pressione; cedimento muratura in calcestruzzo non rinforzato	0,53÷0,56
deformazione strutture portanti in acciaio; spostamento dai basamenti di apparecchi (pompe, scambiatori, ecc.)	0,70

Stimando in prima approssimazione il volume di miscela infiammabile utilizzando la legge della radice cubica, si ha:

$$V_e = \sqrt[3]{\frac{P_r}{P_m - P_r}} \cdot d^{\frac{3}{2}} \approx 228 \text{ m}^3 \quad (1)$$

con il seguente significato dei simboli:

V_e = volume di miscela infiammabile (m^3)

P_r = sovrappressione tipica di rottura vetri/danni a tapparelle = 45 mbar (*)

P_m = sovrappressione massima generata dall'esplosione = 450 mbar (*)

d = distanza di danno misurata = 55 m

(*) = valori assunti sulla base del calcolo mediante formula (2)

Congiuntamente, si è applicata l'equazione di Cubbage & Marshall, che lega la sovrappressione massima generata dall'esplosione P_m alla pressione di rottura dell'elemento di "vent" P_v (nel caso specifico, l'elemento di "vent" è coinciso con la parete sud del fabbricato), alla velocità di combustione S_0 , al peso dell'elemento di "vent" W e al volume di miscela infiammabile V_e :

$$P_m = P_v + 23 \frac{S_0^2 \cdot K \cdot W}{\sqrt[3]{V_e}} \approx 474 \text{ mbar} \quad (2)$$

Il significato dei simboli è di seguito riassunto:

V_e = volume di miscela infiammabile = 228 m^3

P_v = sovrappressione tipica di rottura del "vent" = 200 mbar (stimata, rottura grave del muro a sud + finestre)

S_0 = velocità di combustione del metano = 0,45 m/s

W = peso per unità di superficie del materiale di "vent" = 360 kg/m^2 (calcolato, valutando 80% muratura e 20% finestratura nella parete sud)

K = rapporto tra superficie laterale del volume V_e e superficie di "vent" (assunto pari ad 1, sulla base delle precedenti considerazioni)

I valori calcolati mediante l'uso congiunto delle due equazioni portano a ritenere che la pressione massima sviluppatasi a seguito dell'esplosione sia stata di circa 450-470 mbar, con un volume di miscela infiammabile pari a circa 230 m³. In definitiva, il volume di un intero piano dell'edificio fu interessato dalla presenza di miscela infiammabile.

2.2 Valutazione della portata di gas e del tempo necessario al formarsi della miscela infiammabile

In qualsiasi ambiente civile, anche con i serramenti chiusi, si ha un ricambio d'aria dovuto principalmente alla non perfetta tenuta degli stessi oltre che ovviamente alle aperture fisse (o alle aperture effettuate periodicamente dagli occupanti dell'ambiente). I ricambi d'aria durante il giorno si assumono normalmente pari a $\frac{1}{2}$ del volume dell'ambiente interessato, per ora; nel periodo notturno, il ricambio è minore a causa della minor frequenza delle manovre di apertura dei serramenti. Nel caso in esame si è assunto, preliminarmente, un ricambio d'aria pari a $\frac{1}{6}$ del volume interessato dalla miscela infiammabile.

La portata di gas fuoriuscente dal tubo del gas (che è stato verosimilmente individuato essere la sorgente di emissione) è stata calcolata mediante la relazione di Chezy (ref. [1]) e verificata quindi con il software di calcolo S.T.A.R. (ref. [2]), sulla base dei seguenti dati:

P_1 = pressione in linea del metano = 1034 mbar (=20 mbar relativi, normale pressione della rete gas cittadina)

F = diametro della tubazione = 16,7 mm

L = lunghezza della tubazione = 20 m

La portata è risultata essere in entrambi i casi di circa 5,5 m³/h.

Successivamente, sono state utilizzate le seguenti formule (ricavate da ref. [1] e riprese anche in ref. [3]) che legano le grandezze coinvolte nel caso di rilascio di gas, ossia la concentrazione di gas presente nell'ambiente (c , %vol), il tempo di fuoriuscita (t , ore), il volume di miscela infiammabile (V_e , m³) e le portate di gas (Q_g , m³/h) e dell'aria di ventilazione (Q_a , m³/h).

Riferendosi alla formula (3) di seguito riportata, si può notare che la prima parte dell'equazione permette di calcolare la concentrazione a regime, mentre la seconda parte consente di tener conto, mediante un termine esponenziale, del transitorio legato al tempo di rilascio. È necessario sottolineare che tali formule assumono una miscelazione omogenea tra gas ed aria nel volume interessato; nel caso specifico, si è ritenuto che tali condizioni fossero state raggiunte, in quanto:

- ♦ la perdita è avvenuta vicino al pavimento (sperimentazioni condotte dal British Gas Midlands Research Station sul gas naturale, portano a concludere che perdite di gas naturale con punto di rilascio vicino al pavimento evolvono a condizioni di miscelazione omogenea in poco tempo, stante la bassa densità del gas, che tende a salire verso il soffitto e lungo il percorso miscelarsi con l'aria)
- ♦ la portata d'aria dovuta ai ricambi ambientali è superiore a quella di gas, per cui nella maggior parte delle situazioni la perdita dopo un tempo superiore a poche ore (circa tre) esaurisce la sua fase transitoria e assume connotazione continua (con miscelazione omogenea)

$$c = \frac{Q_g}{Q_a + Q_g} \times \left(1 - e^{-\frac{Q_a + Q_g}{V_e} t} \right) \quad \text{concentrazione} \quad (3)$$

$$t = \frac{V_e}{Q_a + Q_g} \times \ln \frac{1}{1 - \frac{Q_a + Q_g}{Q_g} c} \quad \text{tempo} \quad (4)$$

$$V_e = \frac{Q_a + Q_g}{\ln \left(\frac{1 - \frac{Q_a + Q_g}{Q_g} c}{1 - c} \right)} \times t \quad \text{volume} \quad (5)$$

Occorre evidenziare inoltre che la portata massima di ricambio d'aria $Q_{a \max}$ (oltre la quale non si raggiunge mai la concentrazione c di gas, assunta nel caso in esame pari al 10%) deve essere inferiore a $Q_g(1-c)/c$. Sostituendo i valori:

$$Q_{a \max} \leq 9Q_g = 50,4 \text{ m}^3/\text{h}$$

Assumendo $Q_a \approx 38 \text{ m}^3/\text{h}$ (1 ricambio ogni 6 ore) dalla relazione (4) si ottiene:

$$t \approx 8 \text{ ore}$$

Anche ipotizzando un numero di ricambi inferiore (ad es. 1 ricambio ogni 10 ore), si ha una portata $Q_a \approx 23 \text{ m}^3/\text{h}$ e sempre dalla relazione (4) si ottiene:

$$t \approx 6 \text{ ore}$$

In conclusione, se l'esplosione è avvenuta alle ore 6.50, l'inizio della fuoriuscita di gas può essere verosimilmente avvenuto tra le ore 23.00 e le ore 01.00 della sera precedente.

Per confronto si valuta il periodo di tempo necessario a saturare lo stesso volume con una perdita di gas da un fornello da cucina.

Potenzialita fornello	$W = 2500 \text{ kcal/h}$
Potere calorifico metano	$H = 9000 \text{ kcal/m}^3$
Portata di perdita	$Q_g = W/H = 0,3 \text{ m}^3/\text{h}$

Ponendo $Q_a = Q_{a \max} = 9Q_g = 2,7 \text{ m}^3/\text{h}$ si ottiene $t \approx 300$ ore, corrispondente a circa 12 giorni e mezzo, periodo di tempo eccessivamente lungo per essere preso in considerazione.

3. VALUTAZIONI FINALI - CONCLUSIONI

Dalle considerazioni fin qui svolte, risulta chiaro che il ruolo svolto dalla ventilazione nel caso di eventi incidentali quali le fuoriuscite di gas è di primaria importanza. Con riferimento al caso in esame, è essenziale sottolineare come anche una ventilazione limitata ad un ricambio del volume ogni 5-6 ore garantisca da fenomeni quali la formazione di miscela infiammabile in tempi brevi (ovviamente nell'ipotesi di perdite non provocate deliberatamente). Pertanto, la conformità ai requisiti di legge delle aperture previste ove siano presenti impianti termici alimentati a gas, rappresenta una sicurezza intrinseca degli ambienti interessati dalla presenza di gas infiammabili, dando per scontato che tali impianti siano regolarmente mantenuti e correttamente utilizzati.

Per quanto riguarda la simulazione dei possibili effetti di danno legati ad un'esplosione in edifici chiusi, si evidenzia la reperibilità in letteratura di diverse formule empiriche ricavate da test sperimentali: l'utilizzo di tali formule non può comunque prescindere dalle analisi relative all'ambiente di cui si tratta (caratteristiche costruttive, geometriche, di ventilazione, della tipologia e conformazione delle aperture di sfogo), onde evitare stime poco credibili delle grandezze in gioco (quali ad es. la sovrappressione massima attesa). È auspicabile che all'utilizzo di tali formule sia comunque legata un'analisi fisico-matematica più approfondita, per mezzo della quale la simulazione di fenomeni o la stima di grandezze (quali la sovrappressione attesa sulle strutture circostanti quella soggetta all'esplosione, per la valutazione di eventuali effetti domino) risulta avere un grado di precisione accettabile.

4. BIBLIOGRAFIA

- [1] R.J. Harris, Ph.D.,C.Eng.,M.I.GasE.,M.Inst.E., *The investigation and control of gas explosions in buildings and heating plant*, BRITISH GAS, E&FN Spon. London, New York (1983, rep.td 1989)
- [2] S.T.A.R. - SAFETY TECHNIQUES FOR RISK ASSESSMENT rel 3.02 per Windows® – ARTES S.R.L./PROMETEO S.R.L - MIRANO (VE)
- [3] CEI – Comitato Elettrotecnico Italiano, *CEI 31-35 Guida all'applicazione della norma CEI EN 60079-10 (CEI 31-30) Classificazione dei luoghi pericolosi*, CEI, II ed. fascicolo 5925 (2001)