

Simulazione di transitori di pressione durante esplosioni all'interno di edifici

G. Fiore, M. Bazzichi, P. Cecchella

Studio Associato di Ingegneria Bazzichi - Cecchella – Lungarno Sonnino, 3 - Pisa

Sommario

Un'esplosione provoca un aumento di pressione che può comportare carichi sulle strutture degli edifici tali da comprometterne la funzionalità e, in alcuni casi, provocarne anche il cedimento strutturale. Dato che è generalmente poco pratico ed antieconomico progettare un edificio per resistere a tali sovrappressioni, una possibilità, in genere adottata, è l'uso di sistemi di sfiato ("venting") che, limitando le sovrappressioni, riducono i danni alle strutture. Tali salvaguardie non proteggono dalle conseguenze di un'esposizione diretta alla fiamma o alla pressione, tuttavia, permettono di minimizzare gli effetti distruttivi della deflagrazione e limitare il numero di individui che potrebbero essere coinvolti nell'esplosione.

Negli ultimi anni il Dipartimento di Costruzioni Meccaniche e Nucleari di Pisa (DCMN) ha realizzato, testato e messo a punto il codice di calcolo "DEVENT" per la stima dei transitori di pressione causati da deflagrazioni di idrogeno-aria in ambienti ventati. In questo lavoro, il codice è stato modificato per tener conto anche di deflagrazioni metano-aria e propano-aria. Note le condizioni geometriche e la composizione chimica della miscela incombusta iniziale, il codice "VE.DE.G" (VEnted DEflagration of Gas) fornisce i valori delle principali grandezze di interesse dei processi di deflagrazione e venting in funzione del tempo.

Introduzione

Per ridurre i rischi connessi alla presenza di sostanze combustibili aeriformi confinate in ambienti dove un'accidentale ignizione può causare un brusco aumento di pressione in grado di provocare danni alle strutture, è importante agire sia sul piano della prevenzione, in modo da evitare l'esplosione, sia sulla limitazione delle conseguenze della combustione.

Per evitare la combustione si può cercare di ostacolare il miscelamento con l'aria delle sostanze combustibili e/o di ridurre le sorgenti di ignizione e/o di inertizzare gli ambienti.

Per quanto riguarda gli effetti di una combustione è opportuno distinguere tra detonazione (onda di combustione che, propagandosi a velocità supersonica, è associata ad onde d'urto), dove gli interventi sono purtroppo limitati alla progettazione della struttura ai carichi dinamici, e deflagrazione (onda di combustione che, propagandosi a velocità subsonica, provoca essenzialmente una relativamente lenta ed uniforme pressurizzazione dell'ambiente confinato), dove la progettazione della struttura può essere facilitata dall'adozione di sistemi di sfiato verso l'esterno (venting) per ridurre la sovrappressione massima.

Una linea guida di riferimento internazionale per la progettazione del venting è la norma "NFPA 68" che, sulla base di normogrammi dedotti da esperienze tipiche di deflagrazione [1, 2], fornisce risultati generalmente conservativi, ma che, in ragione di particolari condizioni di deflagrazione, potrebbero risultare eccessivamente conservativi o, al contrario, addirittura non conservativi. Queste particolari situazioni, per suggerimento esplicito della stessa guida, devono essere analizzate caso per caso. Per questo, sarebbe opportuno disporre di modelli matematici in grado di simulare la deflagrazione di gas in ambienti ventati.

Al di là della progettazione del venting, questi modelli possono essere utili anche per descrivere i transitori di deflagrazione, ad esempio, nelle stanze di un edificio civile, al fine di una progettazione mirata della prevenzione antincendio.

Purtroppo, i fenomeni che intervengono nel processo di deflagrazione ventata sono così complessi che non è possibile elaborare una teoria generale capace di descrivere in modo pienamente soddisfacente l'influenza di ogni singolo parametro. Comunque, si sta tentando di procedere in questo senso, sulla base dei modelli approssimati già disponibili [3, 4, 5, 6, 7].

In questo lavoro è stato messo a punto un codice di calcolo tale da poter essere applicato in varie condizioni operative e per vari tipi di gas.

Fenomenologia del venting

Il venting è usato per mitigare gli effetti provocati da una deflagrazione in un ambiente confinato. Si tratta di determinare il numero, il tipo e la posizione degli sfiati, allo scopo di limitare la pressione massima all'interno della struttura sede della combustione. Nella figura 1 [1] è riportato l'andamento qualitativo della pressione nel tempo in un recipiente sferico, senza sfiato, con ignizione centrale; nella figura 2 [1] le curve sono riferite allo stesso recipiente recante due diversi sistemi di sfiato.

Analizzando l'andamento di queste curve è possibile osservare un ritardo fra l'entrata in funzione del venting e la pressione di azionamento dello stesso (p_v). Il motivo del ritardo è dovuto essenzialmente all'inerzia del sistema di apertura.

Nella fig.2, la curva A si riferisce ad un recipiente con area di sfianto minore rispetto a quello a cui si riferisce la curva B. Nella prima fase, le due curve presentano andamenti simili, salvo il valore massimo della pressione che risulta maggiore nella curva A; nella fase successiva, le diversità si fanno sempre più accentuate. La differenza nel valore di pressione massima è dovuta all'instaurarsi di una maggiore o minore portata di gas attraverso lo sfianto; le altre differenze sono dovute alla variazione del regime fluidodinamico che si crea all'interno del volume in cui avviene la deflagrazione, dopo l'apertura del venting.

Sebbene la fuoriuscita del gas porti in primo luogo alla diminuzione della pressione, nel gas incombusto si può instaurare una maggiore turbolenza che provoca, in seguito all'aumento del rateo di bruciamento, una maggiore velocità di salita di pressione nel recipiente ventato. Il bilancio fra questi due fattori contrastanti è di fondamentale importanza: il secondo picco di pressione nella curva B è dovuto proprio al temporaneo accentuarsi del fenomeno della turbolenza.

Con riprese filmate ad alta velocità è possibile dimostrare come, a causa della turbolenza, il fronte di fiamma si rompe in un gran numero di fronti che si propagano in varie direzioni provocando un notevole aumento del rateo di combustione.

Limitatamente alle deflagrazioni lente [8], escludendo quindi la presenza di apprezzabili accelerazioni di fiamma e di fenomeni dinamici come onde di pressione (onde di shock), l'intervento del sistema di venting, in entrambe le situazioni illustrate in figura 2, riduce la sovrappressione massima raggiungibile ($P_{max,1}$, $P_{max,2}$, $P_{max,3}$). Il valore limite della pressione dipende dalla quantità globale di combustibile bruciato (energia liberata dalla combustione).

Il venting è tanto più efficace quanto più è lenta la velocità di propagazione della fiamma e più basse sono la pressione e l'inerzia di apertura dello sfianto [9]. La quantità di gas fuoriuscito dipende, oltre che dalle dimensioni dell'area di vent, dalla durata del transitorio di pressione e (eccetto nel caso di efflussi critici) dai valori di pressione durante il transitorio. Fissato il tipo e la composizione della miscela combustibile, la durata della combustione è legata alle dimensioni dell'ambiente ed alla velocità di bruciamento. Fino a questo momento la complessità dei fenomeni che intervengono nella combustione rende praticamente impossibile valutare a priori la velocità di bruciamento [10]; valutazioni ragionevolmente vicine alla realtà sono ottenute, con una certa garanzia, solo quando le miscele sono poco reattive ed il regime fluidodinamico è mantenuto laminare (deflagrazioni lente con fiamme non accelerate).

Nel caso di deflagrazioni veloci [9], la presenza del venting può risultare inutile o addirittura, in alcuni casi, non è da escludere che il suo intervento possa peggiorare la situazione. Infatti può originare accelerazioni di fiamma tali da provocare la nascita di onde d'urto, che determinano carichi dinamici sulle strutture, o anche la transizione alla detonazione.

In caso di detonazione, il fronte di fiamma e l'onda di pressione viaggiano accoppiate nel mezzo incombusto a velocità sonica e pertanto si crea una distribuzione di pressione non omogenea all'interno dell'ambiente. Se il sistema di sfianto si trova dalla parte della miscela incombusta e si aziona automaticamente quando la pressione supera una data soglia (ad esempio i vetri delle finestre chiuse, che si rompono ad una certa sovrappressione) il venting non entrerà in funzione fino a quando il sistema di apertura non è colpito dall'onda di shock (che non altera lo stato del gas che la precede). Se lo sfianto è situato dalla parte del gas combusto, nascono dall'apertura delle onde di rarefazione che non possono in nessun caso raggiungere l'onda di combustione. Nonostante queste incertezze, l'uso del venting è spesso il sistema più pratico ed economico per limitare i danni prodotti da una esplosione.

Attualmente non esiste una normativa vera e propria sul progetto e sull'uso dei sistemi di venting ma solo delle raccomandazioni tratte dall'esperienza che non coprono una gamma completa di possibili condizioni incidentali. In questo senso, l'adozione di un modello fisico-matematico che descriva il

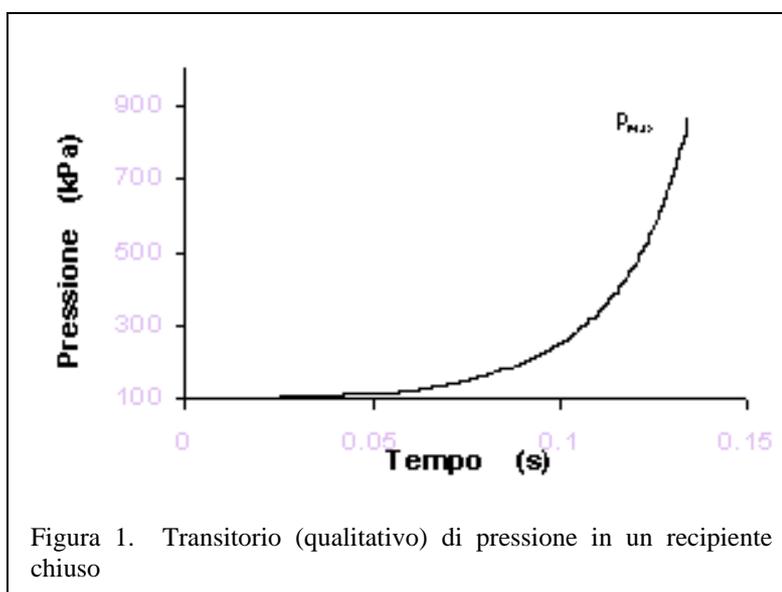


Figura 1. Transitorio (qualitativo) di pressione in un recipiente chiuso

processo di deflagrazione e la sua implementazione in un codice di calcolo potrebbe costituire uno strumento di pratica utilità nella progettazione di edifici civili soggetti a pericoli di esplosioni, una volta che la validazione del codice sia stata condotta a termine.

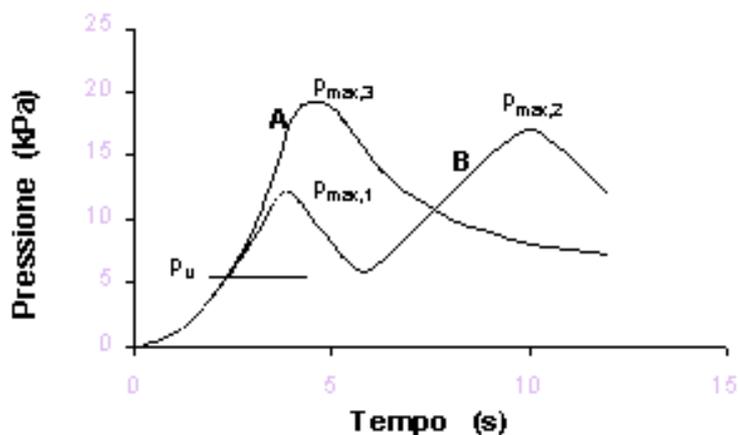


Figura 2. Transitorio di pressione in un recipiente con due diversi sistemi di venting (A e B)

Modello fisico-matematico

Il modello matematico alla base del codice di calcolo VEDEG descrive il transitorio di deflagrazione di una miscela di gas infiammabile in un recipiente ventato. Lo scopo fondamentale è determinare la pressione massima ed il tempo a cui viene raggiunta.

L'andamento della pressione in seguito ad un'esplosione in un ambiente ventato, dipende essenzialmente dalle proprietà della miscela di gas, dal tasso volumetrico di bruciamento, inteso come prodotto della velocità di bruciamento per la superficie di fiamma (area di separazione tra la fase incombusta e la fase combusta), dall'area e dal tempo di apertura del vent.

Attualmente il tasso di bruciamento viene stimato sulla base di dati sperimentali, così un modello termodinamico che necessita di questo dato in fase di input dovrà avere a supporto un'ampia gamma di esperienze.

Il modello, come altri reperibili in letteratura, si basa sull'ipotesi che a ciascun istante la combustione di ciascuna massa elementare avvenga a pressione costante (uniformità della pressione tra fase combusta e fase incombusta). L'aumento complessivo della pressione è causato dalla combustione successiva dei vari elementi di massa. Il gas incombusto subisce una compressione isoentropica, dato che non ci sono ingressi di gas nel sistema incombusto, ed ogni uscita (sia essa dovuta allo sfiato o alla combustione) è nelle stesse condizioni del sistema. La temperatura di fiamma, cioè la temperatura del gas bruciato per combustione isoentalpica (adiabatica isobara), varia quindi da istante ad istante al variare della pressione e della temperatura del gas incombusto.

La maggior parte dei modelli reperibili in letteratura ipotizzano, per semplicità della trattazione termodinamica, che ogni singolo elemento di massa, dopo che è stato combusto, non subisca alcuno scambio di materia o di calore con gli altri elementi, per cui è compresso isoentropicamente dalla pressione e dalla temperatura di fiamma a cui è stato bruciato (diverse per ogni elemento) alla pressione finale: in sostanza, il gas incombusto è considerato isotropo mentre il gas combusto è considerato anisotropo.

Questa ipotesi è nella maggior parte dei casi irrealistica, per cui il modello del codice VEDEG considera il perfetto miscelamento anche in fase combusta. Ciò se da un lato rende più complessa l'analisi termodinamica, dall'altro comporta la possibilità di ottenere una distribuzione di temperatura del gas combusto uniforme nello spazio e quindi maggiore semplicità nell'applicazione delle relazioni sullo sfiato.

Le ipotesi fondamentali alla base del modello fisico-matematico sono:

1. gas combusto e gas incombusto ideali con calori specifici rappresentati da una funzione empirica della temperatura
2. spessore della zona di reazione trascurabile
3. combustione completa attraverso la fiamma (la dissociazione dei prodotti della reazione, presente ad una temperatura superiore ai 1600 K, è supposta trascurabile)
4. tasso volumetrico di bruciamento (prodotto della velocità di bruciamento per la superficie di fiamma) conosciuto ad ogni valore di tempo
5. velocità di fiamma piccola rispetto alla velocità del suono nel mezzo (uniformità della pressione)

6. temperature del gas combusto e del gas incombusto uniformi (e di valore diverso)
7. sistema adiabatico
8. pressione esterna costante
9. rilascio sia del gas combusto che incombusto al di sopra di un prefissato valore di pressione (p_v)

L'ipotesi 4 è senza dubbio quella più gravosa. Le variabili che intervengono nella determinazione del tasso volumetrico di bruciamento sono difficilmente analizzabili, quindi la conoscenza di questa grandezza ad ogni valore del tempo può essere anche molto approssimata. La correlazione che esprime la variazione del tasso volumetrico di bruciamento è fornita sulla base di correlazioni semiempiriche che stimano la velocità di bruciamento laminare, eventualmente corretta per tener conto della turbolenza, e sulla base di una prefissata evoluzione della superficie di fiamma (in particolare, si ipotizza una superficie di fiamma sferica). La correlazione che stima la velocità laminare di bruciamento per metano e per propano è valida negli intervalli (7.5% , 12.5%) e (3.2% , 5.3%), rispettivamente. Ne deriva l'impossibilità di utilizzare il codice VEDEG al di fuori di tali limiti almeno fino a che non saranno implementate nuove correlazioni per il calcolo della velocità di bruciamento.

Analisi termodinamica

L'analisi termodinamica è basata sui seguenti bilanci:

- bilancio di massa nel gas incombusto
- bilancio di massa nel gas combusto
- bilancio di energia nel gas incombusto
- bilancio di energia nel sistema globale
- bilancio di massa nel sistema globale
- il bilancio della quantità di moto è implicito nell'assunzione dell'uniformità della pressione

Le equazioni sono scritte in funzione delle variabili p , T_c , T_i , $x = V_c/V$, m_v ; il tempo, t , è la variabile indipendente.

Condizioni iniziali

Inizialmente il sistema di sfiato non è operativo perché le valvole di rilascio sono chiuse. All'inizio della deflagrazione risulta nullo il tasso volumetrico di bruciamento perché è nulla la superficie di fiamma e, quindi, tutte le derivate rispetto al tempo della variabili oggetto del modello sono nulle. In questa situazione, per poter iniziare il processo di integrazione, si impone un valore iniziale al tasso volumetrico di bruciamento diverso da zero e più piccolo possibile.

Tale valore permane finché non è eguagliato dal prodotto superficie di fiamma per velocità di bruciamento; da questo momento in poi il processo segue la normale evoluzione. Il valore iniziale è talmente piccolo che non pregiudica i risultati.

Studio di sensibilità del codice VEDEG

Al fine di esaminare le influenze che alcuni parametri e grandezze del modello possono avere sui risultati della simulazione, con il codice VEDEG è stato condotto uno studio di sensibilità. Le simulazioni effettuate sono relative a deflagrazioni di idrogeno, metano e propano in un recipiente sferico, al centro del quale avviene l'innescò della deflagrazione. In particolare è stato valutato il transitorio di pressione, tanto per l'idrogeno quanto per il metano ed il propano, al variare di:

- area di venting
- concentrazione del gas
- pressione di apertura dello sfiato
- volume del recipiente sferico
- velocità di bruciamento turbolenta

Le condizioni di riferimento, per i tre tipi di gas, sono riportate in Tabella 1. Le simulazioni sono condotte assegnando alle grandezze contenute nel file di input il valore riportato in tabella, ad eccezione del parametro di cui si valuta l'influenza.

Nel codice la velocità di bruciamento turbolenta, v_{turb} , è stata assunta uguale alla velocità di bruciamento laminare, v_{lam} , avendo posto:

$$v_{turb} = \alpha v_{lam} \quad (1)$$

con $\alpha = 1$.

In realtà tale assunzione risulta molto gravosa; è difficile, infatti, immaginare un processo di deflagrazione e venting in cui la velocità di bruciamento rimanga laminare e, in ogni caso, risulta difficile

immaginare che questo possa accadere per geometrie diverse da quella sferica, quali si presentano all'interno di un edificio civile.

Va comunque notato come ciò non influenzi minimamente la validità dello studio di sensibilità, mentre obblighi, per una corretta simulazione dei processi di deflagrazione e venting, a dotare il codice di correlazioni empiriche per il calcolo della velocità di bruciamento turbolenta per i vari gas o, in alternativa, ad utilizzare per α un valore (costante) maggiore dell'unità.

Tabella 1. Condizioni di riferimento

	IDROGENO	METANO	PROPANO
Raggio sfera (m)	1.00	1.00	1.00
Area di sfiato (m ²)	0.50	0.50	0.50
Temperatura iniziale (K)	298.15	298.15	298.15
Pressione iniziale (Pa)	101325	101325	101325
Concentrazione volumetrica di incombusto (% Vol.)	32	10	4.5
Pressione ambiente (Pa)	101325	101325	101325
Pressione apertura sfiato (Pa)	160000	160000	160000

Modifica delle aree di venting

Quando ha luogo la deflagrazione il recipiente è chiuso (lo sfiato si apre a $p_v = 0.16$ MPa) e la miscela aria-gas è a pressione atmosferica. Per effetto della deflagrazione si assiste, all'interno del recipiente, ad un aumento di pressione al quale tende ad opporsi l'effetto prodotto dall'apertura dello sfiato. Quest'ultimo non si ripercuote istantaneamente sul transitorio di pressione ma presenta un certo tempo di inerzia (tempo che intercorre da quando si apre lo sfiato al momento in cui ne è visibile l'influenza prodotta sul transitorio) che dipende dal tipo di gas, dalla sua concentrazione, dalla pressione di apertura dello sfiato, dal volume del recipiente, dalla velocità turbolenta di bruciamento. In particolare, dato che il venting modifica le condizioni del gas incombusto in modo più o meno marcato a secondo delle dimensioni dell'area di sfiato, del volume iniziale di gas e della pressione raggiunta nell'ambiente al momento in cui si apre lo sfiato, i tempi che occorreranno perché le nuove condizioni in cui si trova il gas incombusto influenzino il transitorio di pressione, dipendono:

1. dall'entità delle variazioni a cui il gas incombusto è soggetto
2. dalla posizione del fronte di fiamma rispetto allo sfiato, nel momento in cui questo si apre (e quindi dal volume iniziale e dalla velocità di bruciamento)
3. dalla concentrazione di gas (che influenza la velocità di bruciamento)

Nel caso in cui le aree di venting siano sufficientemente grandi da produrre una depressurizzazione del gas, la pressione massima risulta indipendente dalle aree di venting (vedi figure 3, 4, 5); il tempo per il raggiungimento del valore massimo di pressione è minore per l'idrogeno, dato che presenta velocità di bruciamento decisamente superiori a quelle del metano e del propano, mentre risultano paragonabili sia le velocità di bruciamento sia i valori massimi di pressione di questi ultimi gas (nonostante i valori di concentrazione notevolmente diversi).

Quando le aree di sfiato sono di piccole dimensioni ($A_v = 0.3$ m² per l'idrogeno, $A_v = 0.1$ m² per il metano, $A_v = 0.1$ m² per il propano) la pressione continua a salire, nonostante l'azione del venting, fino a valori massimi che dipendono dal tipo di gas, dalla concentrazione, dalla pressione di apertura dello sfiato, dal volume di gas iniziale, dalla velocità turbolenta di bruciamento. Tali valori massimi sono raggiunti quando l'intero volume del recipiente è occupato solo da gas combusto. I tempi necessari perché il fronte di fiamma raggiunga le pareti interne del recipiente risultano relativamente rapidi per le deflagrazioni di idrogeno; tempi maggiori occorrono, invece, per le deflagrazioni di metano e propano (poiché risultano più bassi i valori della velocità di bruciamento). L'azione del venting risulta incapace di depressurizzare il gas quando la portata (di gas incombusto) ventata non è tanto elevata da ridurre a valori sufficientemente bassi l'energia chimica, interna al recipiente, che, per combustione, si trasforma in energia di pressione. Ne deriva che un'area di sfiato $A_v = 0.3$ m² (vedi figura 3) non è in grado, nel caso dell'idrogeno, di depressurizzare il sistema.

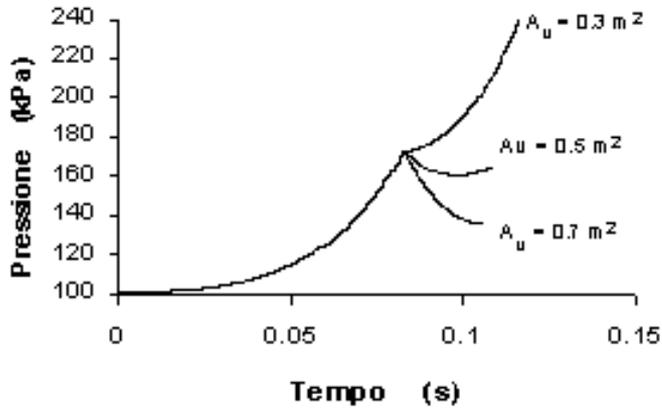


Figura 3 Transitori di pressione per l'idrogeno con diverse aree di venting

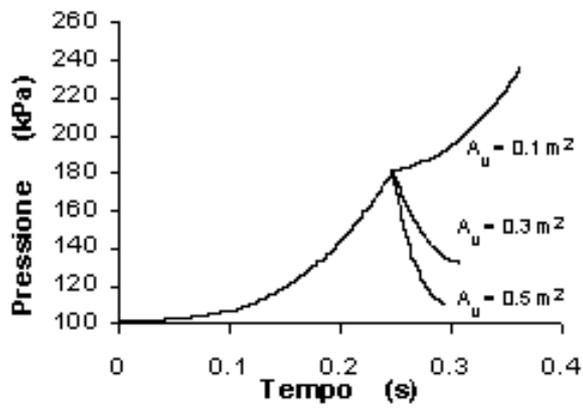


Figura 4. Transitori di pressione per il metano con diverse aree di venting

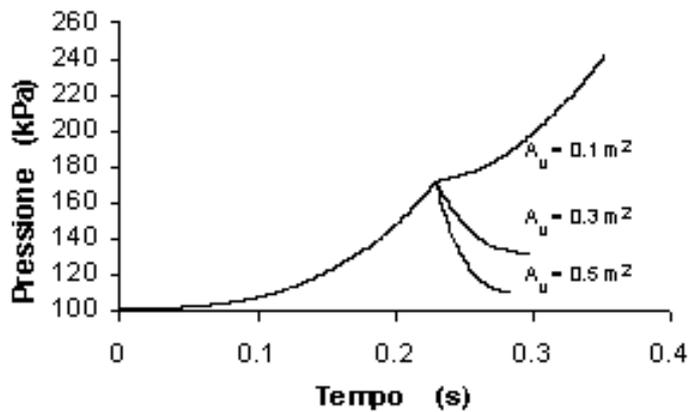


Figura 5. Transitori di pressione per il propano con diverse aree di venting

Modifica della concentrazione volumetrica di gas

L'aumento di concentrazione comporta in primo luogo una maggiore reattività (intesa come capacità della miscela di liberare energia), almeno finché la miscela gas-aria rimane ipo-stechiometrica. Contemporaneamente si manifesta una sensibile azione sulla velocità di bruciamento (nel codice fornita

essenzialmente come funzione della concentrazione) che si ripercuote sia sulla rapidità della combustione sia sul valore di pressione massimo raggiunto nella simulazione.

Le figure 6, 7, 8 mostrano in che modo ed in che misura l'influenza della concentrazione sulla reattività e sulla velocità di bruciamento si manifesti sul transitorio di pressione. Se pertanto, da un lato, (vedi figura 6) il grado di reattività è maggiore nel caso $C_{H_2} = 29.577\%$ (miscela stechiometrica), rispetto $C_{H_2} = 26\%$, dall'altro il valore più basso della velocità di bruciamento comporta un valore meno elevato della pressione massima.

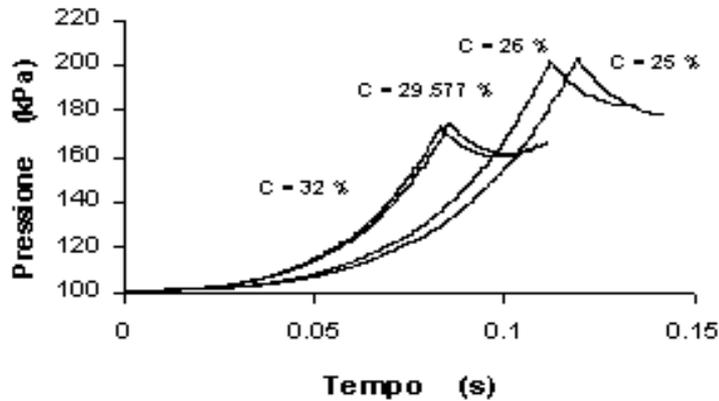


Figura 6. Transitori di pressione per diverse concentrazioni volumetriche di idrogeno

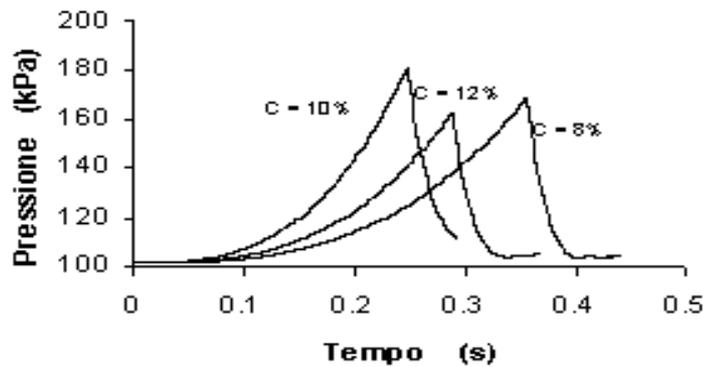


Figura 7. Transitori di pressione per diverse concentrazioni volumetriche di metano

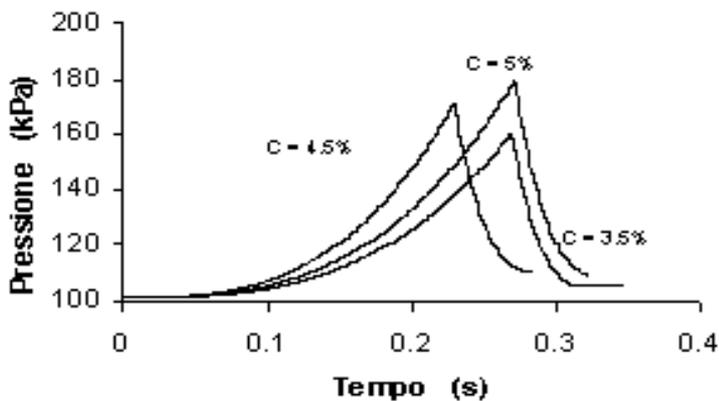


Figura 8. Transitori di pressione per diverse concentrazioni volumetriche di propano

Modifica della pressione di apertura dello sfiato

All'aumentare del valore di pressione a cui si apre lo sfiato si assiste ad un aumento della pressione di picco all'interno del volume.

Per l'idrogeno, nel transitorio di pressione relativo a $p_v = 0.12$ MPa in figura 9, lo sfiato si apre prima di 0.06 s, ma l'effetto sulla pressione si nota con un ritardo di qualche decina di millesimi di secondo, a causa dell'inerzia con cui il sistema si adegua alle nuove condizioni prodotte dallo sfiato aperto. Segue una graduale diminuzione di pressione, causata dal venting di gas incombusto, fino a che non si registra un nuovo aumento di pressione legato alla diminuzione della portata molare di incombusto ventato. In particolare, l'azione di depressurizzazione che si instaura per effetto del venting inizialmente predomina sull'azione di compressione prodotta dal gas combusto, manifestando a pieno il suo peso appena dopo il primo picco di pressione. Successivamente l'azione del venting tende a smorzarsi (la portata di gas ventato diminuisce) finché è l'azione di compressione, legata alla combustione, a prevalere: pertanto, la pressione nel recipiente aumenta (nonostante si verifichi un nuovo aumento della portata ventata che tenta di opporsi a tale variazione).

Per il metano ed il propano, invece, l'azione della decompressione prodotta dal venting è sufficiente a compensare l'aumento di pressione determinato dalla combustione e, pertanto, dopo l'apertura dello sfiato la pressione decresce sempre.

Modifica volume del recipiente (sfera)

I tempi a cui si manifesta l'influenza dello sfiato aumentano all'aumentare del volume del recipiente (vedi figure 12, 13, 14) in quanto il sistema reagisce all'aumento di pressione con un grado di elasticità via via maggiore. Il tempo di inerzia compreso tra l'apertura dello sfiato e l'attuarsi della sua azione tende ad aumentare, anch'esso, all'aumentare del volume iniziale

La depressurizzazione dovuta al venting si realizza in modi e tempi diversi per i vari volumi. Nel caso dell'idrogeno, l'area di venting per $R = 0.5$ m è sufficiente a depressurizzare il gas fino a pressione ambiente, mentre ciò non risulta più possibile per $R = 1$ m e addirittura, per $R = 1.5$ m, l'area di venting non è in grado di depressurizzare il sistema (esattamente come avviene per $R = 3$ m nel caso di miscela aria-metano ed aria-propano).

Nelle simulazioni con l'idrogeno e raggio sfera 1.5 m, l'energia chimica che, nonostante il venting, rimane dentro il recipiente e che si trasforma in energia di pressione, risulta maggiore rispetto a quella che rimane durante le simulazioni col metano (e propano), a parità di volume del recipiente. Questo è da ascrivere al valore più elevato della velocità di bruciamento dell'idrogeno, in quanto, divenendo più rapidi i tempi della combustione, occorrerebbero portate ventate ancora più elevate per limitare l'aumento di p.

Modifica della velocità turbolenta di bruciamento

L'aumento della velocità turbolenta di bruciamento comporta un anticipo dei tempi a cui si manifesta l'effetto dello sfiato (vedi figure. 15, 16, 17) in quanto sono anticipati i tempi a cui si raggiunge la pressione di apertura del venting.

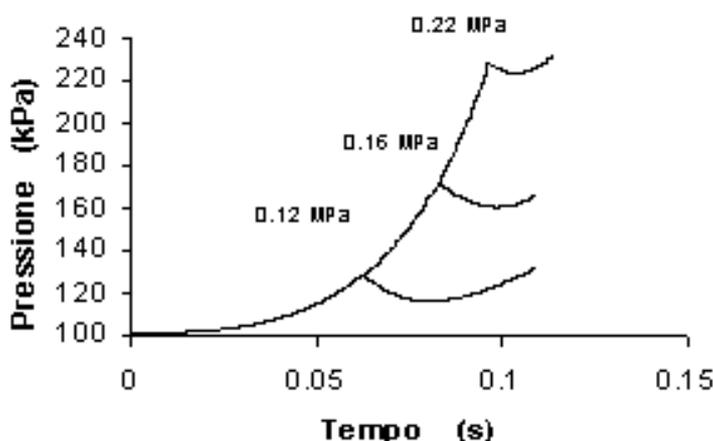


Figura 9. Transitori di pressione per l'idrogeno a diverse pressioni di apertura dello sfiato

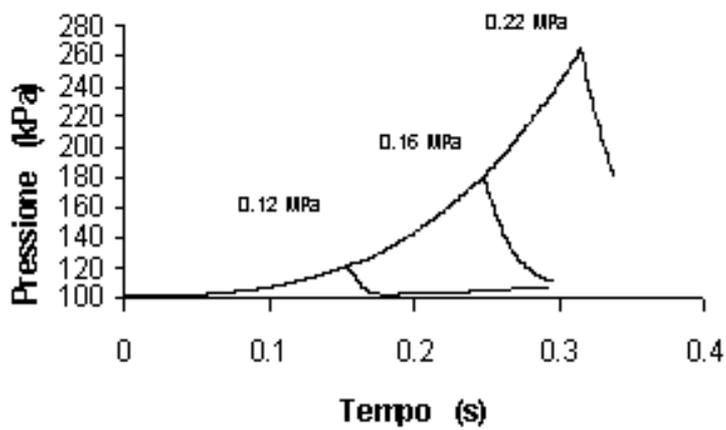


Fig. 10 Transitori di pressione per il metano a diverse pressioni di apertura dello sfiato

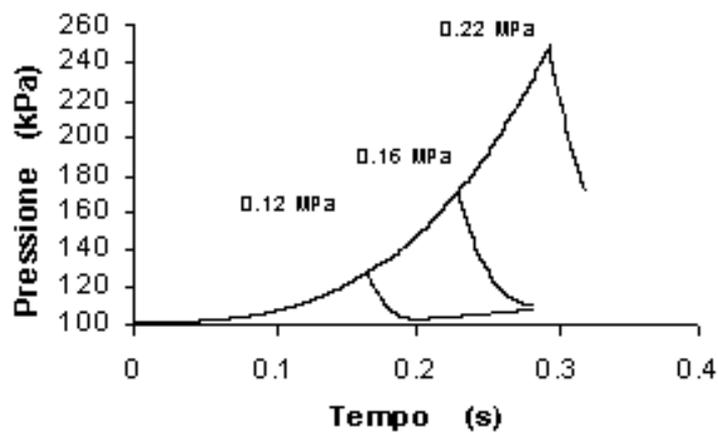


Fig. 11 Transitori di pressione per il propano a diverse pressioni di apertura dello sfiato

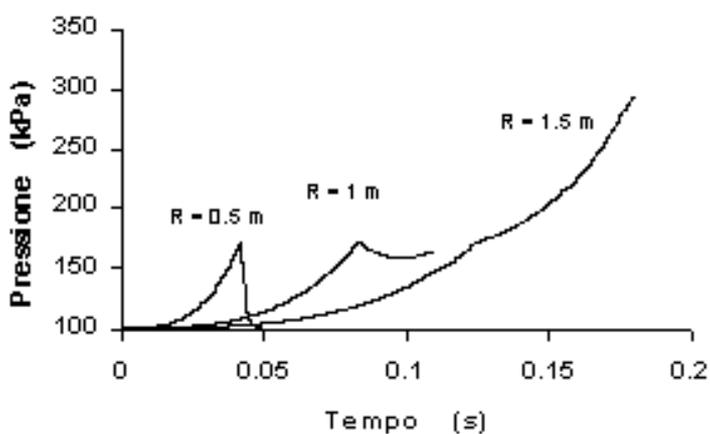


Figura 12. Transitori di pressione per l'idrogeno all'interno di diversi volumi

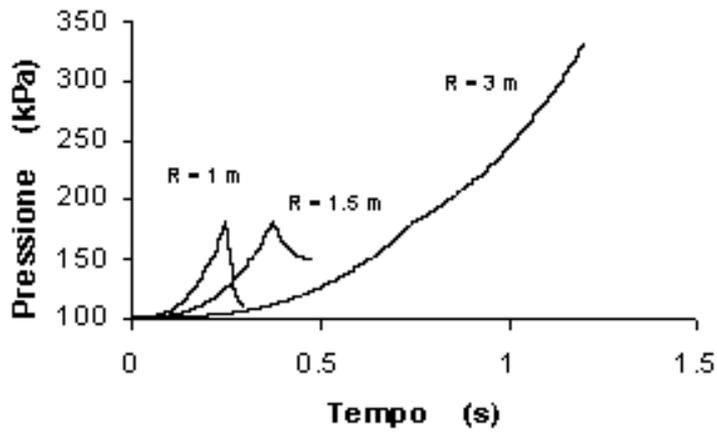


Figura 13. Transitori di pressione per il metano all'interno di diversi volumi

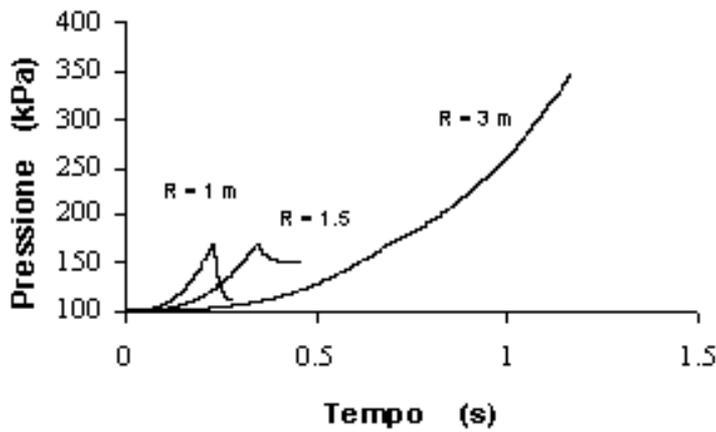


Figura 14. Transitori di pressione per il propano all'interno di diversi volumi

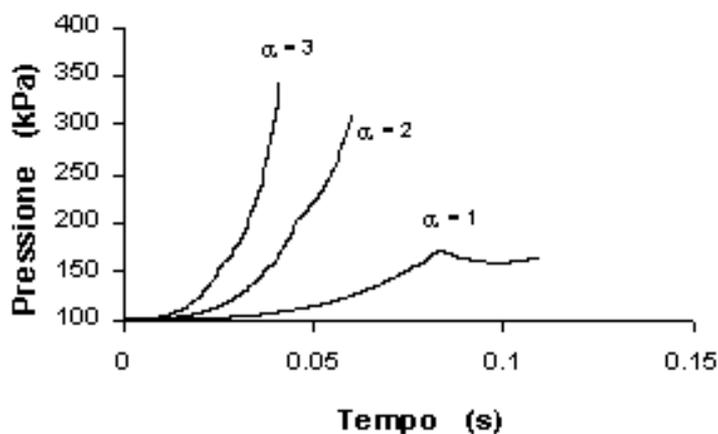


Figura 15 Transitori di pressione per l'idrogeno per diversi valori della velocità turbolenta di bruciamento

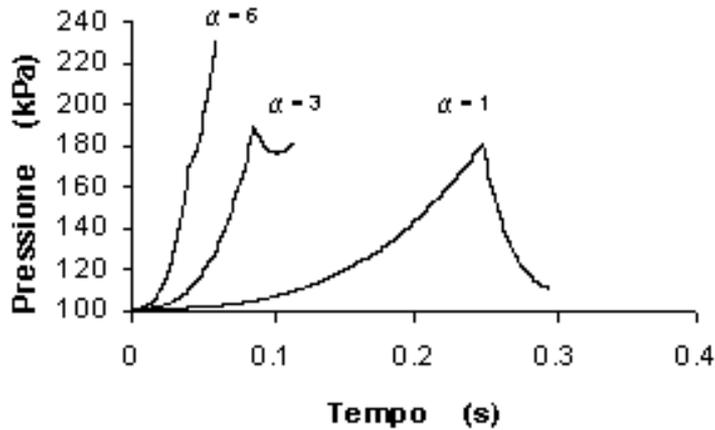


Figura 16 Transitori di pressione per il metano per diversi valori della velocità turbolenta di bruciamento

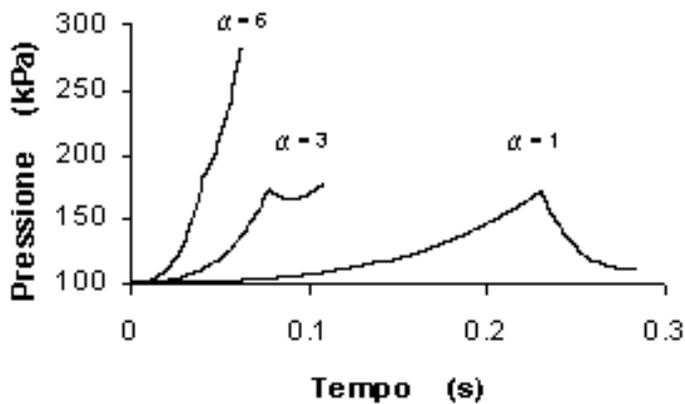


Figura 17 Transitori di pressione per il propano per diversi valori della velocità turbolenta di bruciamento

L'area di sfiato, all'aumentare di $\alpha = v_{\text{turb}}/v_{\text{lam}}$ (e cioè della velocità turbolenta di bruciamento), non è più in grado di garantire la depressurizzazione del gas; per l'idrogeno (vedi figura 15), le simulazioni evidenziano come la pressione massima che si manifesta nei transitori sia tanto maggiore quanto più grande è il valore di α (e quindi occorrerebbero aree di venting sempre maggiori per limitare il valore massimo di pressione nel volume); per il metano, valori moltiplicativi della velocità turbolenta di bruciamento fino ad $\alpha = 3$ non comportano sostanziali variazioni del valore massimo di pressione in quanto l'area di venting permette di depressurizzare il gas; questo non accade più per $\alpha = 6$.

Analoga la situazione che si presenta per il propano (vedi figura 17)

Conclusioni

Il modello matematico implementato nel codice di calcolo VEDEG descrive il transitorio di deflagrazione di una miscela di gas infiammabile in un recipiente ventato. Lo scopo fondamentale è determinare la pressione massima ed il tempo a cui viene raggiunta.

L'andamento della pressione in seguito ad un'esplosione in un ambiente ventato, dipende essenzialmente dalle proprietà della miscela di gas, dal tasso volumetrico di bruciamento, dall'area e dal tempo di apertura del vent.

Nel modello alla base del codice si suppone che il volume in cui avviene la deflagrazione sia di forma sferica, all'interno sia presente una miscela gas-aria ed avvenga una combustione completa attraverso la fiamma.

Lo studio di sensibilità effettuato mostra come il codice riesca bene a rappresentare il fenomeno fisico di deflagrazione e venting, dando risposte qualitativamente corrette agli stimoli impartiti. In particolare, dalle simulazioni effettuate emerge che:

1. Esiste un valore minimo dell'area di venting, che denomineremo critica, $A_{v,c}$, tale che per $A_v > A_{v,c}$ il valore massimo di pressione all'interno del volume non varia, fissate le condizioni iniziali del gas e la pressione di apertura dello sfiato. In altre parole, $A_{v,c}$ è la più piccola area di venting che permette di depressurizzare il gas.
2. Le dimensioni dell'area critica sono strettamente influenzate dal volume iniziale dell'ambiente; all'aumentare di questo aumentano le dimensioni dell'area critica.
3. Occorre minimizzare le pressioni di apertura dello sfiato per limitare l'aumento di pressione nel volume.
4. La pressione massima raggiunta nell'ambiente è notevolmente influenzata dalla velocità turbolenta di bruciamento. Purtroppo, il modello fisico alla base del codice non permette di valutare, per i gas simulati, tale velocità se non tramite correlazioni semiempiriche. Il problema principale è quello di dover conoscere (ed assegnare), passo per passo, il valore del rateo di bruciamento. Quest'ultimo è senza dubbio il punto più gravoso del modello fisico-matematico; d'altronde allo stato attuale non è ancora possibile fare a priori un'adeguata stima del rateo di bruciamento, dato che la conoscenza sui meccanismi di accelerazione di fiamma e sulla transizione deflagrazione-detonazione è tuttora assai scarsa.

Il codice DEVENT, di cui VEDEG rappresenta una naturale estensione applicativa, è stato positivamente testato su esperienze di deflagrazione H₂-aria in contenitori ventati. Tuttavia, l'applicazione del codice nel campo di strutture civili e, soprattutto, la simulazione di deflagrazioni metano-aria e propano-aria rendono necessario riprendere ed approfondire l'azione di validazione con i nuovi scenari, sviluppata sulla base di dati sperimentali reperibili in letteratura. Se questa azione dovesse produrre risultati confortanti, o anche in mancanza di dati affidabili o utilizzabili, sarebbe auspicabile intraprendere un processo di validazione basato su una campagna sperimentale, opportunamente studiata per definire il campo di applicabilità del codice, i suoi limiti e gli eventuali atti correttivi da apportare.

Qualora il codice fornisca simulazioni rappresentative del reale transitorio di deflagrazione in un ambiente parzialmente confinato, potrà essere un valido strumento per progettare e posizionare sistemi di sfiato efficaci al fine di ridurre i danni di una combustione sulle strutture e limitare le conseguenze alle persone.

Inoltre, in un'ottica più ampia, i dati forniti dal codice sul transitorio di deflagrazione, opportunamente trattati, potranno risultare utili anche nello studio, progettazione ed ottimizzazione dell'intero sistema di protezione antincendio di uno stabile.

Bibliografia

- [1] M. Carcassi, F. Fineschi, Analisi della normativa estera sul venting, Rapporto del Dipartimento di Costruzioni Meccaniche e Nucleari dell'Università degli Studi di Pisa, RL 419, (1989).
- [2] NFPA 68, Guide for Venting of Deflagration, NFPA (1988).
- [3] S. Crescitelli, G. Russo, V. Tufano, Analysis and Design of Venting Systems: A simplified Approach, Journal of Occupational Accidents, 2 (1979).
- [4] C. Chan, I.O. Moen, J.H.S. Lee, Influence of Confinement on Flame Acceleration Due to the Repeated Obstacles, Combustion and Flame, 49 (1983).
- [5] S. Chippett, Modeling of Vented Deflagration, Combustion and Flame, 55 (1984)
- [6] M. Fairweather, M. W. Vasey, A Mathematical Model for the Prediction of Overpressure Generated in Totally Confined and Vented Explosions, 19th Int. Symposium on Combustion (1982)
- [7] D. Bradley, A. Mitcheson, The Venting of Gaseous Explosions in Spherical Vessels. Theory, Combustion and Flame, 32 (1978)
- [8] F. Fineschi, Esplosioni in Aria e Valutazione dei loro Effetti, Rapporto del Dipartimento di Costruzioni Meccaniche e Nucleari dell'Università degli Studi di Pisa, RL 408(89), (1988).
- [9] R. J. Harris et alii, Evaluation of Protection from Explosion Over-pressure in AEC Gloveboxes, Rapporto a USAEC, FMRC 16215.1, RC69-T-23
- [10] F. Fineschi, Iniziazione della Detonazione in Miscele Combustibili Prove Sperimentali con Hot-Jets, Rapporto del Dipartimento di Costruzioni Meccaniche e Nucleari dell'Università degli Studi di Pisa, RL 356(88), (1988).