



Università degli Studi di PISA
Facoltà di Ingegneria
Dipartimento di Ingegneria Meccanica,
Nucleare e della Produzione

Tesi di Laurea in Ingegneria Nucleare:

**Deflagrazioni di idrogeno ventate in presenza di ostacoli
interni: studio sperimentale**

Il Candidato:

Martino Schiavetti

I Relatori:

Prof. Ing. M. Carcassi
Prof. Ing. G. Forasassi
Ing. G. Cerchiara
Ing. A. Marangon

Anno Accademico 2005-2006.

RINGRAZIAMENTI.

Oltre ai relatori Prof. Ing. Giuseppe Forasassi e Prof. Ing. Marco Carcassi per le loro competenze e la disponibilità offerta durante il presente lavoro di tesi, desidero ringraziare l'Ing. Gennaro Cerchiara per la collaborazione offerta durante lo svolgimento delle prove sperimentali, l'Ing. Alessia Marangon per la collaborazione nel rendere disponibili i risultati delle simulazioni effettuate col codice FLACS, tutti i tecnici del laboratorio Scalbatraio per la disponibilità ed esperienza messa a disposizione durante tutto il periodo di svolgimento della campagna sperimentale. Ringrazio infine il Dott. Gabriele Alidori per la competenza e la disponibilità offerta nella gestione dei database.

INDICE.

1.	INTRODUZIONE: DEFLAGRAZIONI VENTATE.....	5
2.	INFLUENZA DELLA TURBOLENZA SULLA DEFLAGRAZIONE.....	6
3.	STUDIO DEL FENOMENO.....	7
3.1	Wrinkled laminar flame model.....	7
3.2	Turbulent transport model.....	9
3.2.1	Modelli relativi alle vorticosità su larga scala.....	9
3.2.2	Modelli relativi alle vorticosità su piccola scala.....	9
4.	FILOSOFIA E LOGICA DEL LAVORO.....	11
5.	DESCRIZIONE GENERALE DELL'APPARECCHIATURA CVE.....	12
6.	MESSA A PUNTO DELL'APPARECCHIATURA.....	17
7.	INTRODUZIONE AL PROGRAMMA DI PROVE SPERIMENTALI.....	21
8.	CAMPAGNA SPERIMENTALE SM.....	24
9.	ANALISI DEI RISULTATI.....	30
9.1	Pressioni interne.....	30
9.2	Pressioni esterne.....	36
10.	PRIME SIMULAZIONI COL CODICE FLACS.....	38
11.	CONCLUSIONI.....	42
12.	ATTIVITA' FUTURA.....	42
	BIBLIOGRAFIA.....	43

APPENDICE A	DESCRIZIONE GENERALE DELL'APPARECCHIATURA
APPENDICE B	VERIFICHE STRUTTURALI OSTACOLI INTERNI
APPENDICE C	SENSORI DI PRESSIONE ESTERNI
APPENDICE D	PROCEDURE DI PROVA / SICUREZZA
APPENDICE E	PROGRAMMA DI ACQUISIZIONE
APPENDICE F	ELABORAZIONE DATI
APPENDICE G	DATI RIASSUNTIVI – SCHEDE TECNICHE DI PROVA
APPENDICE H	GRAFICI IMMISSIONE
APPENDICE I	GRAFICI DEFLAGRAZIONE
APPENDICE L	STIMA DELL'IDROGENO IMMESSO
APPENDICE M	RIASSUNTO DEI DATI DELLE PROVE

INDICE DELLE FIGURE.

Figura 5.1 – Schema concettuale della CVE.....	12
Figura 5.2 – CVE in posizione di prova.....	13
Figura 5.3 – Schema generale del circuito d’immissione e prelievo della CVE.....	15
Figura 5.4 – Analizzatori di concentrazione	15
Figura 7.1 – Grafico delle pressioni interne prima dell’eliminazione del rumore	22
Figura 7.2 – Grafico delle pressioni interne dopo l’eliminazione del rumore.	22
Figura 8.1 – Evoluzione della fiamma durante il passaggio dell’ostacolo nella prova filmata SM58, vista aerea.	26
Figura 9.1.1 – Confronto delle pressioni in prove a bassa concentrazione.....	30
Figura 9.1.2 - Transitorio di una deflagrazione al 12,3% volume di idrogeno nella CVE in assenza di ostacoli [4].	30
Figura 9.1.3 - Transitorio di una deflagrazione al 12,3% volume di idrogeno con in presenza della piastra centrale.	31
Figura 9.1.4 - Transitorio di una deflagrazione al 12,2% volume di idrogeno con in presenza della piastra centrale.	31
Figura 9.1.5 - Pressioni rilevate dal sensore sinistro in prove con piastra centrale e concentrazioni variabili.	32
Figura 9.1.6 - Pressioni rilevate dal sensore sinistro in prove con set di montanti e concentrazione variabile.	32
Figura 9.1.7 - Pressioni massime raggiunte nella configurazione di ostacoli costituita dalla sola piastra centrale in funzione della concentrazione media a cui è stata svolta la prova.	33
Figura 9.1.8 – Confronto tra due prove effettuate nelle stesse condizioni.....	34
Figura 9.1.9 - Sovrapressioni massime raggiunte nelle due configurazioni di ostacoli che occludono un area pari al 33% del totale.....	34
Figura 9.1.10 – Prove effettuate alla concentrazione del 12,5% con diverse configurazioni di ostacolo.....	35
Figura 9.2.1 – Andamento delle pressioni esterne Prova SM25.....	36
Figura 9.2.2 – Andamento delle pressioni esterne Prova SM26.....	37
Figura 9.2.3 – Andamento delle pressioni esterne in funzione del picco massimo interno.....	37
Figura 10.1 - Localizzazione dei punti di monitoraggio (FLACS).....	39
Figura 10.2 - Simulazione al FLACS della condizioni delle prove SM27 e SM29 (a) comparata con l’andamento sperimentale delle pressioni nei due casi (b).....	40
Figura 10.3 - Simulazione al FLACS nelle condizioni delle prove SM17 e SM18 comparata con l’andamento sperimentale delle pressioni nei due casi.	41

INDICE DELLE TABELLE.

Tabella 3.2.1 – Alcuni dei modelli relativi al Wrinkled laminar flame model [2].....	8
Tabella 3.3.1 – Alcuni dei modelli relativi al Turbulent transport model [2].....	10
Tabella 6.1 - Lista dei componenti costituenti un set di montanti.	19
Tabella 8.1 – Campagna sperimentale SM.	25
Tabella 8.2 – Dati riassuntivi delle prove(1 di 3).....	27
Tabella 8.2 – Dati riassuntivi delle prove(2 di 3).....	28
Tabella 8.2 – Dati riassuntivi delle prove(3 di 3).....	29
Tabella 10.1 – Confronto tra la prova SM25 e le simulazioni al FLACS.....	41

1. INTRODUZIONE: DEFLAGRAZIONI VENTATE.

La situazione di maggior pericolo per un deposito industriale o per un locale civile che si trovi in condizioni di ospitare delle quantità di gas infiammabile è sicuramente la sequenza incidentale nella quale una perdita diffonde all'interno generando una nube che successivamente se ignita da luogo ad un'esplosione.

La protezione rispetto a questo tipo di fenomeno viene ricercata fin dalla fase di progettazione attraverso tecniche di analisi di rischio e analisi costi-benefici. Una soluzione passiva economicamente interessante riguarda l'utilizzo di "vent" di sicurezza.

Il vent è un'area della struttura avente resistenza inferiore della stessa, nei casi più conservativi un'area aperta, che permette l'evacuazione della miscela deflagrante in modo da ridurre i picchi di pressione generati internamente durante l'evoluzione del fenomeno. Lo studio di esplosioni in ambienti confinati provvisti di sistema di vent è complicato dal gran numero di variabili in gioco; alcuni dei parametri implicati sono:

- Il tipo di combustibile e di ossidante;
- la distribuzione gas nell'ambiente;
- l'area di vent;
- la pressione e il tempo di apertura del dispositivo che copre il vent;
- la geometria del volume;
- il punto di innesco della reazione;
- l'eventuale presenza di ignizioni multiple;
- il volume e la forma del locale in oggetto;
- l'eventuale presenza di meccanismi che accelerano la fiamma;
- la presenza di elementi strutturali e di ostacoli all'interno dell'ambiente in esame;
- la turbolenza e l'instabilità della fiamma.

Durante una deflagrazione ventata la pressione, che inizialmente crescerà per effetto della combustione, raggiunge la pressione di apertura del dispositivo che copre l'area di vent ne provoca l'apertura in un determinato lasso di tempo. Ad apertura completata l'andamento della pressione interna dipende dalle caratteristiche evolutive dell'esplosione e quindi dal bilancio energetico tra l'energia di combustione prodotta nell'unità di tempo e quella fuoriesce dal vent nello stesso istante. L'evoluzione temporale del rilascio energetico dipende dalla velocità di bruciamento con la quale si propaga la reazione, questa a sua volta è influenzata da diversi fattori tra i quali la turbolenza.

2. INFLUENZA DELLA TURBOLENZA SULLA DEFLAGRAZIONE.

La pressione generata dalla combustione dipende dalla velocità con cui si propaga il fronte di fiamma dal punto di ignizione al resto della miscela e da come la pressione può espandersi verso l'esterno in funzione del suo grado di confinamento.

Una deflagrazione si propaga con velocità relativa al gas incombusto subsonica, con ordine di grandezza 1-1000 m/s; la pressione generata in questo caso può comunque raggiungere ~ 8 barg in assenza di sfiato. Una deflagrazione è un fenomeno di combustione sufficientemente lento da non provocare onde d'urto e troppo veloce per poter essere assimilato ad una combustione in un ambiente a pressione costante; dunque fenomenologicamente si manifesta con un sostanziale aumento di pressione e di temperatura nell'ambiente confinato o parzialmente confinato. La maggioranza dei danni che essa può provocare sono da attribuire all'aumento di pressione che la accompagna.

Una detonazione corrisponde invece ad una velocità di propagazione della fiamma relativa al gas incombusto supersonica, l'onda di pressione e il fronte di fiamma in questo caso sono accoppiate, le velocità in gioco sono dell'ordine di 1500-2000 m/s e i picchi di pressione generati sono tipicamente di 15-20 bar.

In un'esplosione idrogeno-aria la velocità di bruciamento iniziale al momento dell'ignizione è generalmente dell'ordine di 3-4 m/s e se la miscela è non confinata tenderà a raggiungere valori non superiori ai 20-25 m/s generando di conseguenza picchi di pressione trascurabili.

In un ambiente chiuso le pressioni raggiungono invece valori molto più alti, a parità di altre condizioni la presenza di ostacoli può indurre velocità di bruciamento dell'ordine di centinaia di metri al secondo [1].

Quando la fiamma inizia a propagarsi, i prodotti di combustione, ad alta temperatura, espandono spingendo la massa del gas incombusto e generando un flusso che può divenire turbolento. Se l'interfaccia tra i gas leggeri, combustibili, a temperatura maggiore, e quelli pesanti, incombustibili, a temperatura inferiore, è instabile, allora il fronte di fiamma sarà corrugato; aumentando la superficie di fiamma aumenterà di conseguenza la velocità di bruciamento.

Quando la fiamma raggiunge così il campo di moto turbolento la velocità di bruciamento effettiva aumenta e la turbolenza generata fuori dal fronte di fiamma aumenta a sua volta. Questo feedback positivo può causare l'incremento crescita della velocità di bruciamento fino al raggiungimento, nei casi peggiori, della velocità di transizione deflagrazione – detonazione.

In una situazione confinata, anche in presenza di aperture di vent, non è necessario raggiungere velocità di fiamma elevatissime per generare picchi di pressione elevati.

3. STUDIO DEL FENOMENO.

Una completa teoria riguardante la combustione turbolenta è possibile soltanto estendendo la teoria statistica della turbolenza agli altri fenomeni coinvolti nel processo di propagazione della fiamma quali: le fluttuazioni di temperatura, le concentrazioni delle specie in gioco e la velocità chimica della reazione.

La velocità di bruciamento, quando la propagazione del fronte di fiamma è laminare, è predetta dalla teoria con una buona approssimazione; in caso di propagazione turbolenta la teoria diviene molto complessa e le soluzioni ipotizzate tendono ad introdurre numerose semplificazioni.

Per questo motivo una soluzione complessiva del problema non è stata ancora formulata e la teoria in questo campo utilizza diversi modelli che forniscono le basi per predire la velocità di bruciamento turbolenta u_t . Due distinti modelli di fiamma turbolenta sono stati proposti e si basano rispettivamente sul trasporto molecolare e sul trasporto turbolento.

3.1 Wrinkled laminar flame model.

Il Wrinkled (spiegazzato) laminar flame model, assume che l'effetto principale della turbolenza è quello di aumentare la superficie della fiamma disponibile per il trasporto delle specie coinvolte nella reazione. E' basato sull'assunto che la scala della turbolenza indotta nel flusso sia molto maggiore dello spessore del fronte di fiamma che si propaga nel fluido considerato. In questo modello l'influenza della turbolenza sul fronte di fiamma risulta in un incremento della superficie di fiamma dovuto agli effetti su larga scala.

I modelli derivanti da questa teoria assumono che la fiamma si propaghi, relativamente al gas incombusto, con velocità laminare u_l incrementata attraverso un termine dipendente dalla turbolenza.

Tabella 3.2.1 – Alcuni dei modelli relativi al Wrinkled laminar flame model [2].

Autore equazioni per la velocità di bruciamento turbolenta.	Ipotesi	Considerazioni
Damköhler $\frac{u_t}{u_l} = 1 + \frac{u'}{u_l}$ $u_t = u' (u' \gg u_l)$ $u_t \propto R_e$	Fiamma laminare continua e corrugata. Scala di propagazione della turbolenza molto maggiore dello spessore del fronte di fiamma. $l \gg \delta_l$	Velocità di bruciamento turbolenta u_t indipendente dalla scala della turbolenza
Shchelkin $\frac{u_t}{u_l} = \left[1 + B \left(\frac{u'}{u_l} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}}$ $u_t \cong u'$	$u' \leq u_l, l \gg \delta_l$ fiamma laminare continua corrugata conicamente. $u' \gg u_l, l \gg \delta_l$; fiamma divisa in fronti separati.	Velocità di bruciamento turbolenta u_t indipendente dalla scala della turbolenza
Frank-Kamenetskii $u_t = \left(\frac{lu'}{\tau} \right)^{\frac{1}{2}}$ $u_t \cong (u_l u')^{\frac{1}{2}}$	Superficie di fiamma divisa in fronti separati ognuno dei quali brucia con velocità laminare u_l	
Leason $\frac{lu'}{2u_l} > 1(1)$ $\frac{u_t}{u_l} = \left[1 + \left(\frac{2u'}{u_l} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}}$	Il flusso turbolento è composto da vortici di diametro l , con velocità sinusoidalmente fluttuante con valor medio u' .	(1) La turbolenza incrementa il fronte di fiamma, l'incremento è indipendente dalla scala. (2) La turbolenza incrementa la diffusione delle specie reagenti o del calore, questo effetto dipende da l e da u'
Karlovitz $u' \ll u_l \mapsto u_t = u_l + u'$ $u' \gg u_l \mapsto u_t = u_l + (u_l u')^{\frac{1}{2}}$ Per elevati valori della turbolenza $u' \mapsto u''$ $u'' = \frac{u_l}{\sqrt{3}} \cdot \left(\frac{\rho_u}{\rho_b} - 1 \right)$	Fiamma continua e corrugata con turbolenza addizionale generata dalla fiamma	u_l (velocità laminare di bruciamento) rimane il fattore più importante rispetto alla turbolenza anche quando la seconda è molto maggiore della prima.
Richardson $u' \ll u_l \mapsto \frac{u_t}{u_l} = 1 + \frac{1}{\sqrt{2}} \frac{u'}{u_l}$ $u' \gg u_l \mapsto \frac{u_t}{u_l} = 1 + \frac{1}{2^{\frac{1}{5}}} \left(\frac{u'}{u_l} \right)^{\frac{4}{5}}$	Fiamma laminare continua e corrugata	Turbolenza monodimensionale
Legenda u_l velocità di bruciamento laminare; u_t velocità di bruciamento turbolenta u' velocità del fluido; l scala della turbolenza; δ_l spessore di fiamma.		

3.2 Turbulent transport model.

Questi modelli si suddividono in due categorie che enfatizzano rispettivamente il processo su larga scala e su piccola scala. Questi modelli si basano sull'assunto che la fiamma venga trasportata all'interno dei vortici in modo omogeneo abbandonando quindi la visione della stessa come un'entità di spessore molto minore delle perturbazioni turbolente. Le due suddette categorie saranno brevemente esposte nei successivi paragrafi.

3.2.1 Modelli relativi alle vorticosità su larga scala.

Se un intero vortice è caratterizzato da una temperatura uniforme, allora la reazione di autocombustione sarà indotta attraverso il vortice al raggiungimento della temperatura di autoignizione del fluido. Questo presuppone un miscelamento perfetto all'interno del vortice.

Se larghi vortici si propagano contemporaneamente la reazione può essere propagata attraverso il loro moto al gas incombusto. Questo può avvenire dopo che i vortici hanno percorso grandi distanze dando origine ad altre agnizioni spontanee dopo l'avvenuto miscelamento turbolento di un nuovo vortice. Così la propagazione della zona di reazione vortici che trasportano la combustione ed all'interno dei quali la composizione e la temperatura sono uniformi.

3.2.2 Modelli relativi alle vorticosità su piccola scala.

In caso di flusso molto turbolento il moto dei piccoli vortici è il meccanismo responsabile della propagazione del fronte di fiamma. Alcuni autori enfatizzano inoltre l'importanza dei tempi coinvolti nella propagazione chimica della reazione in rapporto ai vortici ed alla loro vita media[2]. Un piccolo vortice può essere formato in contemporanea da gas combustibili, caldi, e da incombusti. Se la vita media dei microvortici risulta maggiore del tempo di induzione chimica della reazione nelle condizioni in cui si trova il flusso allora la reazione continua all'interno del vortice fino a che esso non decade. Dopo il decadimento di questo vortice assieme a quelli della sua stessa generazione all'interno di una zona occupata contemporaneamente da gas combustibili ed incombusti, un'altra generazione di vortici un'altra generazione di vortici nascerà e la reazione sarà indotta in questi dal calore rilasciato dalle prime reazioni. La vita media dei piccoli vortici può essere minore del tempo della propagazione chimica della reazione, ma se il gas all'interno del vortice diviene sufficiente caldo, allora il vortice diverrà in grado di propagare la reazione.

Tabella 3.3.1 – Alcuni dei modelli relativi al Turbulent transport model [2].

<u>Autore</u>	Ipotesi	Equazioni per la velocità d bruciamento turbolenta
<u>Damköhler</u>	$u_t \propto \left(\frac{k}{C_p \rho_0} \right) \propto \sqrt{\nu}$ $l < \delta_l$	$\frac{u_t}{u_l} = \left(\frac{\varepsilon}{\nu} \right)^{\frac{1}{2}} = \left(\frac{\lambda_t}{k} \right)^{\frac{1}{2}}$ <p>Dove $\varepsilon = \frac{\lambda_t}{C_p \rho}$</p>
<u>Shchelkin</u>	$u_t \propto \left(\frac{k}{\tau_\chi} \right)^{\frac{1}{2}}$ <p>Dove $\tau_\chi \propto e^{-E/RT}$</p> $l < \delta_l$	$\frac{u_t}{u_l} = \left(1 + \frac{\lambda_t}{k} \right)^{\frac{1}{2}}$
<u>Delbourg</u>	$\lambda_T = k + \lambda_t$ <p>c_l costante</p> <p>T_i temperatura di ignizione</p> $u_t = \frac{c_l T_u k (T_b - T_i)}{\rho C_p (T_i - T_u)}$	$u_t = \frac{c T_u \lambda_T (T_b - T_i)}{\rho C_p (T_i - T_u)}$ $\frac{u_t}{u_l} = \frac{c}{c_2} \left(1 + \frac{\lambda_t}{k} \right)$
<u>Summerfield</u>	Teoria termica. Modello indipendente dalla scala l	$\frac{u_t}{u_l} = \frac{\varepsilon \delta_l}{\nu \delta_t}$
<p><u>Legenda</u></p> <p>u_l velocità di bruciamento laminare; u_t velocità di bruciamento turbolenta</p> <p>l scala della turbolenza; δ_t spessore di fiamma;</p> <p>ν viscosità cinematica; k conduttività termica, ρ densità; ε diffusività termica.</p>		

4. FILOSOFIA E LOGICA DEL LAVORO.

Il filo conduttore del presente lavoro è quello di indagare sperimentalmente gli effetti generati sul fenomeno della deflagrazione da ostacoli posti sul cammino di avanzamento del fronte di fiamma. In genere le esperienze effettuate nell'apparecchiatura CVE hanno riguardato le fiamme wrinkled in cui la video registrazione è fondamentale per ricavare istante per istante la superficie del fronte di fiamma. In questo lavoro per la prima volta sono stati posizionati ostacoli di varia forma e dimensione all'interno della CVE.

Una prima parte del lavoro ha riguardato la progettazione degli ostacoli ed il loro posizionamento all'interno dell'apparecchiatura CVE per poi verificare, in fase di analisi, l'effettiva influenza che hanno sull'evoluzione della deflagrazione di miscela idrogeno aria, in termini di sovrappressioni generate internamente, ed esternamente nelle immediate vicinanze dell'area di vent. Alcune prove della campagna sperimentale sono state selezionate e ripetute in notturna per permettere le riprese video dell'evoluzione della fiamma.

Altro obiettivo è quello di determinare le concentrazioni ammissibili per l'esercizio in sicurezza delle prove in ciascuna delle configurazioni adottate. I dati sperimentali ottenuti saranno poi confrontati con i risultati generati da un codice, il FLACS (CFD), utilizzato nella simulazione di problemi di diffusione ed esplosione di miscela gassose in installazioni industriali.

5. DESCRIZIONE GENERALE DELL'APPARECCHIATURA CVE.

L'apparecchiatura sperimentale CVE (*Chambre View Explosion*) è concepita per lo studio dell'evoluzione di deflagrazioni con miscele infiammabili di aria-idrogeno e aria-metano in ambienti confinati. E' costituita da una struttura di forma cubica realizzata attraverso un telaio metallico al quale sono collegati dei moduli rettangolari provvisti di cornici; ha un volume di circa 25 m³.

Le cornici possono ospitare diversi tipi di pannelli, di acciaio o vetro, costituenti le pareti della camera di prova, nonché dei pannelli speciali provvisti di aperture che costituiscono le aree di vent.

Una delle pareti è fissata attraverso delle viti prevaricate che, avendo una tensione di rottura inferiore al resto dell'apparecchiatura, permettono l'apertura della stessa ad una pressione inferiore a quella di progetto trasformandola in un vent di sicurezza.

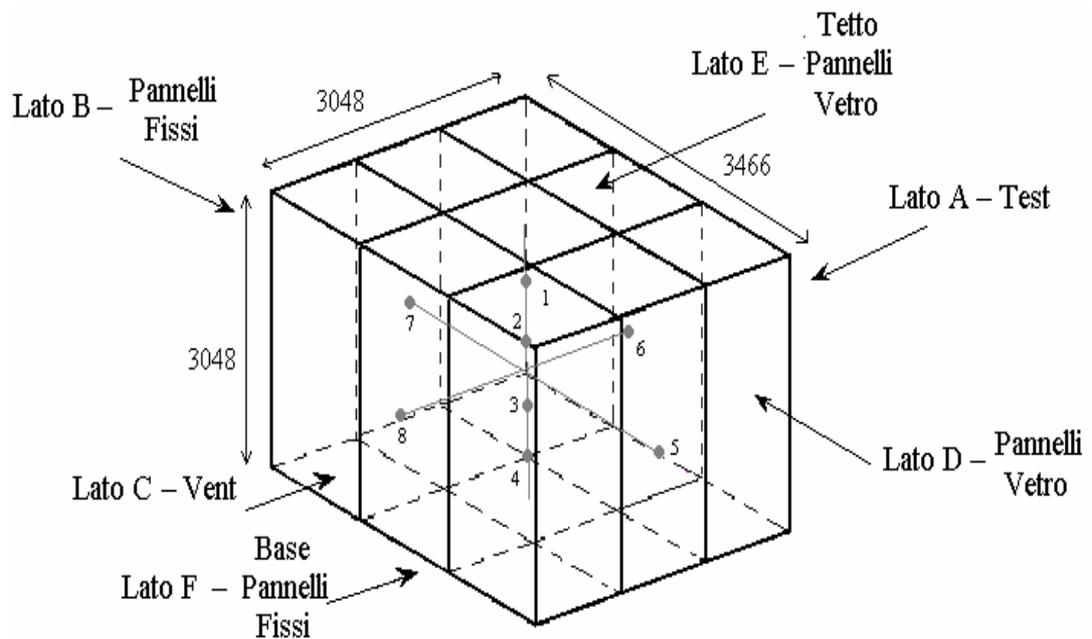


Figura 5.1 – Schema concettuale della CVE.

Nel dettaglio seguente riportiamo descrizione e funzionalità di ogni parete [3]:

- Parete (A): parete laterale di test, uno dei pannelli di acciaio ha, ricavato al suo interno, il passo d'uomo che permette l'accesso all'interno dell'apparecchiatura; due pannelli, anch'essi di acciaio, sono dotati di alloggiamenti che permettono il montaggio di una porta e di una finestra in telo di plastica per la simulazione di un locale domestico o di qualsiasi altro "locale ventato", (quale potrebbe essere anche un deposito di bombole all'interno di una stazione di rifornimento di idrogeno). Sia il pannello che sorregge la porta, che quello della finestra, sono intercambiabili con altri pannelli metallici pieni, nel caso si voglia variare l'area di vent.

- Parete (B): parete fissa dotata di pannelli in acciaio fissati dall'interno.
- Parete (C): parete dotata di tre pannelli in acciaio costituenti il *vent* di sicurezza e fissati dall'esterno con viti di sicurezza a sezione resistente sottocalibrata, la taratura è eseguita in modo che si stacchino dall'apparecchiatura al raggiungimento di un picco di pressione interna pari a 150 millibar relativi (il limite di pressione di progetto dell'apparecchiatura è 200 mbar).
- Parete (D): parete laterale dotata di pannelli in vetro speciale, intelaiati in profilati di acciaio collegati alla struttura portante dell'apparecchiatura, questa parete dà la possibilità di osservare e di riprendere l'evoluzione della deflagrazione tramite una videocamera posta all'esterno della CVE.
- Parete (E): tetto, dotato come la parete D di vetri speciali.
- Parete (F): pavimento, costituito da pannelli metallici fissi, uno sportello posizionato sul fondo si apre sotto la spinta del flusso di lavaggio durante questa operazione.



Figura 5.2 – CVE in posizione di prova.

Un elemento di primaria importanza per la sicurezza della CVE è rappresentato dal sistema d'immissione del gas all'interno dell'apparecchiatura.

Il malfunzionamento di tale sistema può dar luogo alla generazione di miscele troppo ricche di idrogeno rispetto ai valori previsti; al fine di garantire il corretto svolgimento della fase d'immissione è necessario assicurare una sufficiente stabilità del flusso in ingresso.

In base alla normativa vigente per il trasporto di gas infiammabili l'intero circuito e tutti i raccordi tra i vari elementi sono stati realizzati in acciaio inossidabile, AISI 304 NPA49-117, secondo le indicazioni delle Norma 1072 UNI 8-10.

L'immissione di gas all'interno della CVE, dopo l'apertura della linea, avviene previa apertura di due valvole, una posta a valle del circuito descritto precedentemente, la seconda posta immediatamente prima della parete posteriore della CVE. L'operazione viene eseguita all'inizio di ogni prova e comandata da calcolatore con tutto il personale in posizione all'interno della stanza idrogeno.

La strumentazione presente all'interno ed all'esterno dell'apparecchiatura può essere concettualmente divisa in 3 gruppi; un primo gruppo relativo agli strumenti atti al monitoraggio della fase di immissione, un secondo dedicato all'acquisizione dei dati che descrivono la fase della deflagrazione, ed un terzo gruppo di strumenti e sistemi "ausiliari" funzionali allo svolgimento in sicurezza delle varie fasi di prova.

La strumentazione atta a monitorare la fase di immissione è costituita da:

- 2 trasduttori di pressione posti sulla linea di alta per determinare il salto di pressione nelle bombole,
- una termo-resistenza posta sulla superficie esterne delle bombole,
- un flussimetro massico che permette di determinare la quantità di idrogeno immessa all'interno
- un trasduttore di pressione di bassa ed una seconda termoresistenza che registrano le caratteristiche di lavoro del flussimetro,
- 5 analizzatori di concentrazione interni alla CVE

La strumentazione utilizzata per acquisire i dati relativi alla fase di deflagrazione è costituita da:

- 2 trasduttori di pressione interni alla CVE
- 2 trasduttori di pressione esterni alla CVE la cui posizione è variabile
- una termoresistenza interna utilizzata per determinare la temperatura massima raggiunta in fase di prova
- 3 telecamere, due esterne ed eventualmente una interna, per filmare l'esplosione

Manometri – M

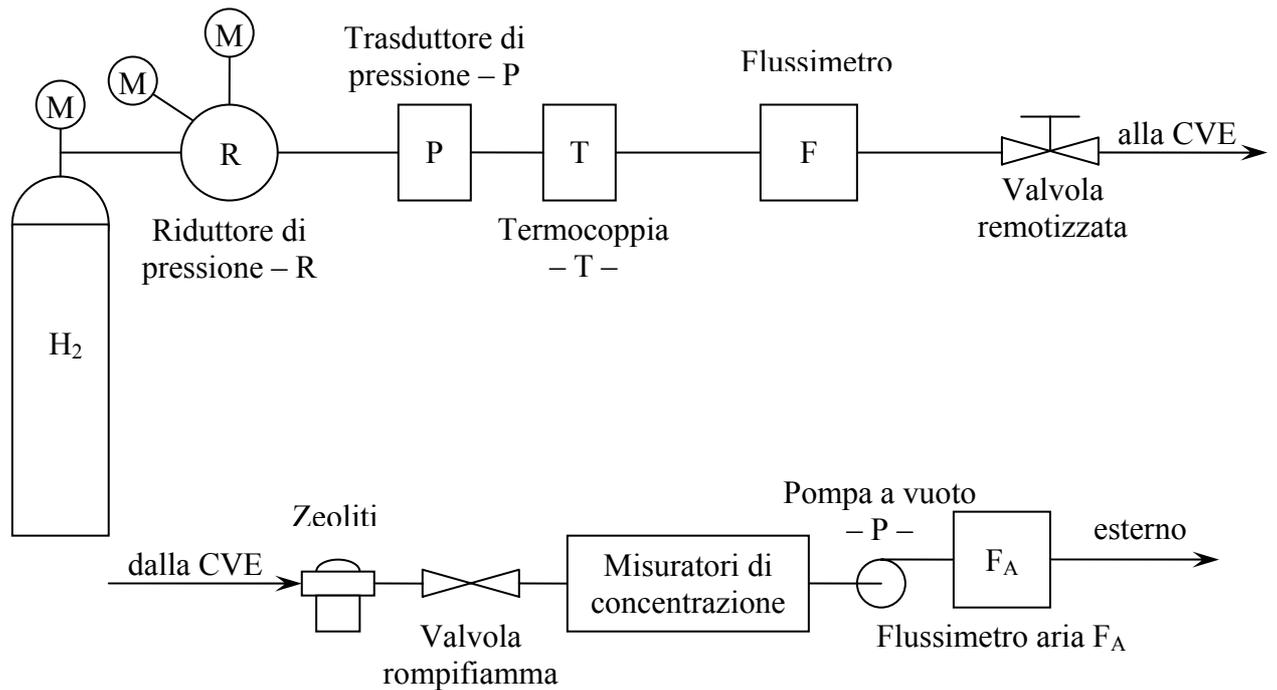


Figura 5.3 – Schema generale del circuito d'immissione e prelievo della CVE.



Figura 5.4 – Analizzatori di concentrazione

Fra i sistemi “ausiliari” ricordiamo:

- 7 ignitori posizionati in diversi punti all'interno della CVE ed utilizzabili indipendentemente l'uno dall'altro
- un sistema di lavaggio dell'atmosfera interna utilizzato dopo la prova per lavare i prodotti della combustione o in caso di errori in fase di immissione per evacuare la miscela incombusta senza effettuare la prova
- Un ventilatore utilizzato nelle prove omogenee per miscelare l'atmosfera interna all'apparecchiatura
- un dispositivo di vaporizzazione di una miscela di acqua e sale utilizzato nelle prove filmate per rendere visibile l'evolvere del fenomeno

Rimandiamo in appendice A una descrizione più dettagliata dell'apparecchiatura e dei sistemi annessi.

6. MESSA A PUNTO DELL'APPARECCHIATURA.

Durante la fase preparatoria del presente lavoro alcune modifiche sono state apportate all'apparato sperimentale nel suo complesso. Per quanto riguarda le modifiche strutturali della CVE, esse hanno riguardato la progettazione e successiva messa in opera degli ostacoli interni.

La filosofia adottata per l'indagine della turbolenza in ambienti confinati, e quindi per la progettazione del set di ostacoli, è stata quella della "modularità", ossia della possibilità di riprodurre di un certo numero di configurazioni con il minor numero di geometrie. Tale principio ha permesso di ottimizzare i tempi di sperimentazione e nello stesso tempo non ha posto alcun limite nella realizzazione delle configurazioni.

La scelta di attrezzare la CVE con set di montanti per l'alloggiamento di piastre, rende comunque possibile la conduzione di future indagini di turbolenza con geometrie diverse da quella piana (ostacoli realizzati mediante piastre); infatti, tali set di montanti, a meno della realizzazione di idonee strutture di collegamento, potranno ospitare anche eventuali oggetti sagomati, come ad esempio geometrie cilindriche per la riproduzione degli effetti di *array* di tubazioni.

Le specifiche seguite in fase di progettazione sono state le seguenti:

- gli ostacoli devono poter essere rimossi;
- la configurazione deve poter essere variata introducendo diversi gradi di chiusura e percorsi di fiamma;
- indurre i minori cambiamenti possibili sulla struttura originaria (in particolare la geometria stessa della CVE ha comportato forti limitazioni nelle possibili soluzioni da adottare)
- poter effettuare cambi di configurazione in tempi limitati

La scelta adottata è stata quella di realizzare due set di montanti, otto in tutto quattro per ogni set, posizionati in modo da suddividere la sezione dell'apparecchiatura in tre sottosezioni uguali tra loro. In questo modo è possibile interporre tra i montanti delle piastre identiche tra loro, ed intercambiabili in posizione, in modo da realizzare varie configurazioni di chiusura. In figura 6.1 mostriamo il disegno di uno dei due set.

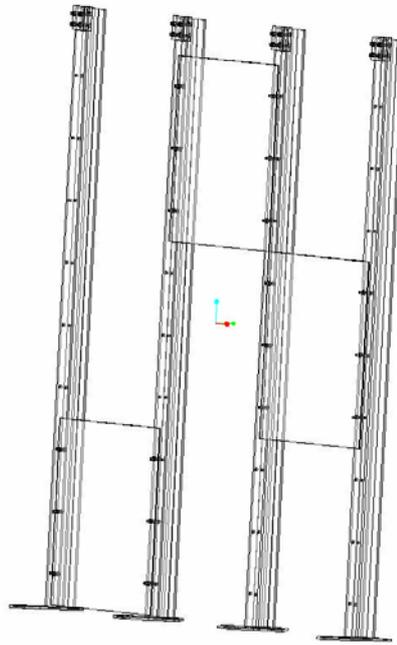


Figura 6.1 – Rappresentazione di uno dei due set di montanti con piastre in posizione casuale.

La posizione dei due set è vincolata alle possibilità di ancoraggio che la struttura permetteva, in particolare il lato superiore della stessa è chiuso da cornici che contengono i pannelli di vetro. I montanti sono saldati inferiormente a delle piastre che vengono ancorate alla base attraverso dei collegamenti bullonati, detti collegamenti sfruttano fori preesistenti e realizzati per fissare le piastre costituenti la pavimentazione alle strutture portanti. Nella parte superiore la scelta è stata quella di ancorare i montanti con una pinza ad una sporgenza dell'ala dei giunti a croce che costituiscono la struttura portante delle cornici che contengono i pannelli di vetro.



(a)



(b)

Figura 6.2 - Primo set di montanti con piastra centrale visto dal passo d'uomo (a) e particolare della parte superiore dei montanti (b).

Le piastre possono essere fissate e rimosse tramite collegamenti bullonati, ogni piastra è fissata attraverso sei bulloni, sono simmetriche e tutte uguali tra loro, possono occupare qualsiasi posizione prefissata. Considerando una singola coppia di montanti, questa offre la possibilità di ospitare una singola piastra in 7 diverse posizioni in altezza, un massimo di 3 piastre possono esservi ospitate contemporaneamente realizzando in questo modo la completa chiusura dello spazio tra di essi. Rimangono liberi soltanto un piccolo spazio inferiore ed uno spazio superiore per il montaggio ed il serraggio dei montanti alle travi dell'apparecchiatura.

Per la realizzazione dei montanti sono stati utilizzati dei profilati a sezione ad H della serie rinforzata HEB 100, che per dimensioni dell'ala sono ideali per l'accoppiamento con l'ala del giunto a croce ai quali devono essere fissati. Riportiamo di seguito la liste dei componenti costituenti un set di montanti:

Tabella 6.1 - Lista dei componenti costituenti un set di montanti.

ID	Parte	Numero	Materiale
A	Montanti: Profilati in acciaio Fe 360 HEB 100 UNI 5397	4	Fe 360
B	Piastre si prova	3	Fe 360
C	Piastra base montanti centrali	2	Fe 360
D	Piastra base montanti laterali	2	Fe 360
E	Vite M10 x 45 – 4.6 UNI 5725	18	
F	Dado M10 UNI 5588	18	
G	Vite M12 x 60 – 8.8 UNI 5727	16	
H	Dado M12 UNI 5727	16	
I	Vite M12 x 60 - 8.8 UNI 5727	28	
L	Dado M12 UNI 5727	28	
M	Piastrina superiore di collegamento lato ala	4	Fe 360
N	Piastrine superiori di collegamento lato anima	8	Fe 360

Le verifiche strutturali dell'intero set di ostacoli sono riportate in appendice B, è stata eseguita una verifica statica con coefficiente di sicurezza pari a due per essere cautelativi rispetto ad eventuali effetti dinamici generati dalle vibrazioni durante le deflagrazioni, all'interno della struttura.

E' stato variato il programma di acquisizione ove sono state inserite le procedure da seguire in fase di prova. Tale modo di operare ha lo scopo da assicurare lo svolgimento in sicurezza (presenza di blocchi nel programma di controllo) delle prove riducendo al minimo le probabilità di errore umano.

E' stata inoltre impostata l'acquisizione delle pressioni esterne e modificata l'acquisizione del flussimetro attraverso un fattore sperimentale di taratura; il tempo di acquisizione della deflagrazione è stato ampliato da 10 a 20 secondi. Una trattazione più dettagliata relativa alle modifiche apportate al programma di acquisizione è presente in appendice E, le note relative ai sensori di pressione esterni sono reperibili in appendice C.

7. INTRODUZIONE AL PROGRAMMA DI PROVE SPERIMENTALI

Dall'analisi dei dati relativi alle precedenti campagne di prove sperimentali svolte sull'apparecchiatura CVE si evince la necessità di stilare dopo ogni prova una documentazione riassuntiva breve e leggibile delle condizioni ambientali e di prova nonché dei relativi risultati ottenuti.

Altra necessità riscontrata è stata quella di standardizzare un metodo relativo alla elaborazione dei dati acquisiti in fase di prova. Ogni prova sperimentale di deflagrazione ventata nella CVE è monitorata / controllata da un programma di acquisizione dati creato mediante il software LabView 7.1. Mediante il programma di acquisizione dati si è in grado di:

- Seguire la procedura di svolgimento delle prove sperimentali;
- Acquisire i dati iniziali pre-test (data, temperatura esterna, area di venting, concentrazione di prova, punto di ignizione, etc.);
- Acquisire i dati di immissione (frequenza di 5 Hz);
- Acquisire i dati di deflagrazione (frequenza di 5 kHz);;
- Annotare i parametri post-test (temperatura interna CVE, flusso integrato, note, etc.)

Le acquisizioni dei dati di immissione e deflagrazione sono poi disponibili in formato .txt (file di testo) per la successiva elaborazione della prova sperimentale. In appendice F è presentata in dettaglio la procedura di acquisizione, gestione ed elaborazione dei dati.

Il file .txt di acquisizione dati della prova sperimentale viene registrato con una codifica che permette di risalire al nome della prova ed alla data di svolgimento della stessa. La struttura del file di testo e la relativa legenda sono riportati anch'essi in appendice F.

Il database corrispondente ai dati di immissione può essere comodamente analizzato con un normale programma che permetta di visualizzare in grafico la variazione delle grandezze di interesse, mentre il database riguardante i dati della deflagrazione viene elaborato ulteriormente.

I dati derivanti dalle letture dei sensori di pressione interne sono influenzati dal rumore indotto dalle vibrazioni (onde acustiche) della struttura della CVE sollecitata dalla deflagrazione. Fortunatamente questo disturbo ha una frequenza molto maggiore della frequenza caratteristica della variazione di pressione, è possibile perciò eliminarlo.

L'eliminazione avviene eseguendo una semplice operazione di media ogni 50 valori acquisiti, ricordando che la frequenza di campionamento durante la deflagrazione è pari 5000 hertz, effettuando la media come indicato otteniamo una nuova frequenza a 100 Hz, quindi un punto

ogni 0,01 secondi. Riportiamo di seguito la visualizzazione di un dettaglio del momento della deflagrazione prima e dopo l'operazione di "pulizia" del rumore.

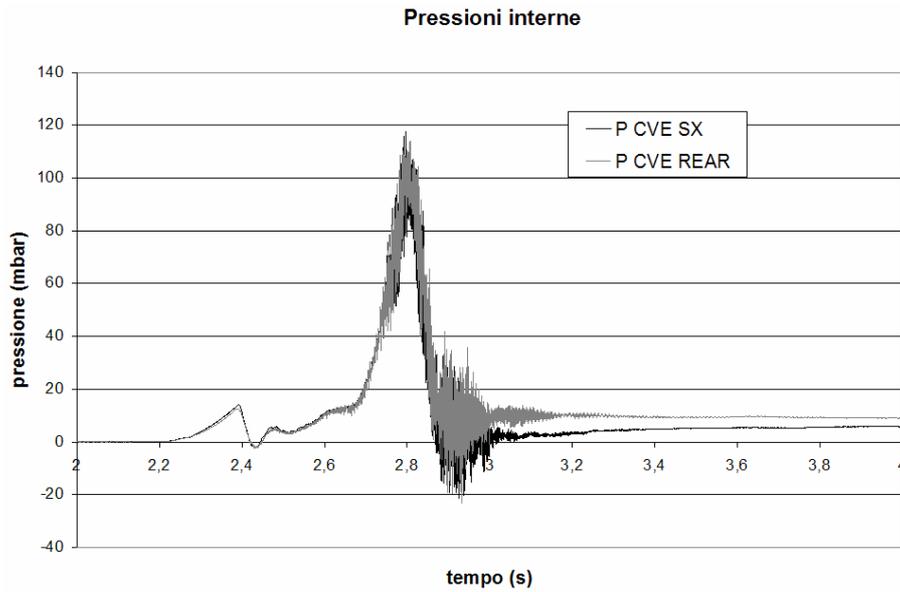


Figura 7.1 – Grafico delle pressioni interne prima dell'eliminazione del rumore

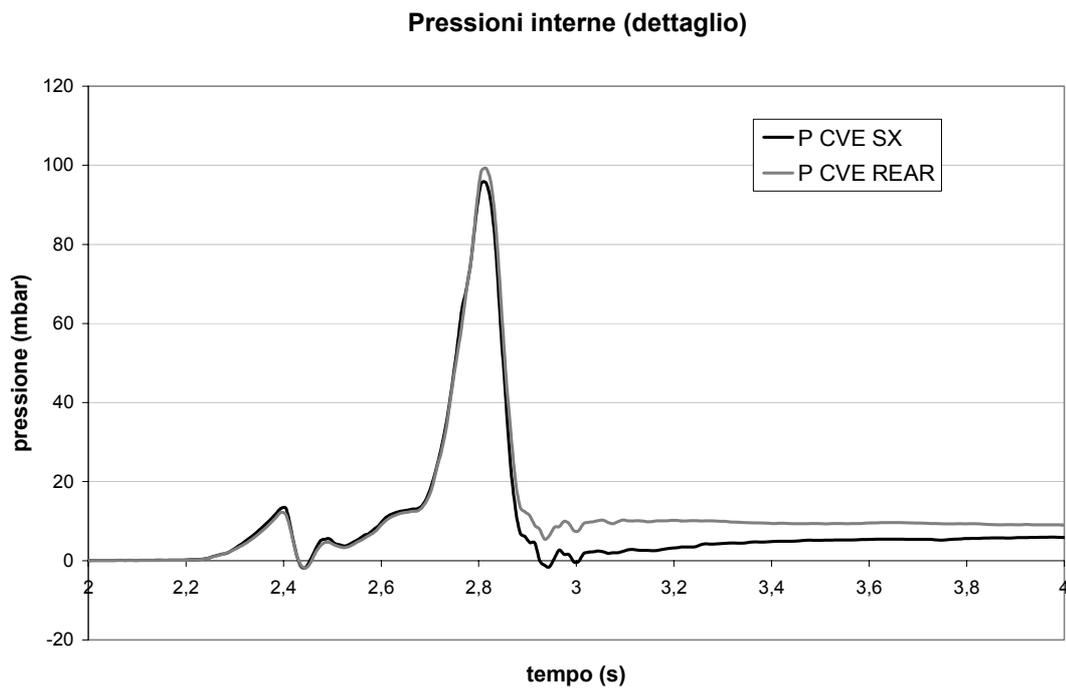


Figura 7.2 – Grafico delle pressioni interne dopo l'eliminazione del rumore.

Le pressioni esterne sono state acquisite a 3 e 5 metri di distanza dal vent in linea diretta dello stesso. Come vedremo in seguito la pressione agente su di essi sarà in gran parte dovuta agli effetti dinamici della grande quantità di massa combusta e incombusta che fuoriesce dal vent durante la deflagrazione.

Durante la campagna sono state effettuate delle prove atte a verificare l'ipotesi sopra descritta ed è stato verificato che spostando il trasduttore a 45° rispetto alla linea diretta uscente dal vent le pressioni in gioco sono di fatto molto minori. (Tabella 8.2 (2 di 3))

Sia per la fase di immissione che per quella di deflagrazione i dati raccolti sono stati poi riassunti in grafici riportati rispettivamente in appendice H ed in appendice I.

In appendice G sono riportati i dati riassuntivi delle prove con la descrizione dei problemi eventualmente incontrati durante il loro svolgimento; infine in appendice M sono riportati i dati riassuntivi dei risultati delle prove.

8. CAMPAGNA SPERIMENTALE SM.

L'oggetto della presenta campagna sperimentale consiste nell'andare a determinare le capacità ed i limiti della CVE in relazione allo studio di deflagrazioni in presenza i ostacoli interni. Dovrebbero essere dunque definiti i limiti di concentrazione che per ogni configurazione di ostacoli permettono di poter effettuare prove generando pressioni interne al di sotto di una determinata soglia. La sovrappressione interna scelta come limite è pari a 150 mbar, la massima di progetto all'interno 250 mbar.

Le prove sono state svolte a varie concentrazioni utilizzando il primo set di ostacoli al quale sono state applicate diverse configurazioni di piastre in modo da variare la percentuale di occlusione dell'area attraversata dal fronte di fiamma.

La strategia adottata è stata quella di aumentare gradualmente la concentrazione volumetrica, partendo dal 7,5%, fino ad arrivare ad un massimo del 12,5%, valore precedentemente già riconosciuto, con un'area di vent di 1,12 m².

Per le prove effettuate nella seconda parte della campagna sperimentale è stato scelto di eliminare le concentrazioni inferiori al 9,5% in quanto i risultati ottenuti in termini di pressione interna non sono stati giudicati significativi in queste condizioni.

Il programma di prove sperimentali SM è iniziato con una serie di prove, SM00 - SM01 atte a verificare il funzionamento delle varie parti dell'apparato sperimentale: immissione, acquisizione dati etc.

Le modifiche apportate al programma di acquisizione sono state effettuate contestualmente alle prime prove del programma, l'inserimento delle procedure e l'aumento da 10 a 20 secondi del tempo di acquisizione è stato effettuato contemporaneamente all'esecuzione delle prime 15 prove (SM00 – SM14), la taratura del flussimetro attraverso un coefficiente sperimentale è stata effettuata analizzando i dati dell'immissione delle prime 20 prove effettuate (SM00 – SM19)

Dovendo studiare l'influenza della configurazione di vari set di ostacoli in termini di pressione massima si sono tenuti costanti gli altri parametri quali: punti di ignizione, area di venting e sua pressione di apertura.

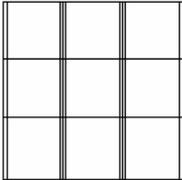
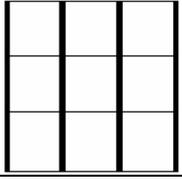
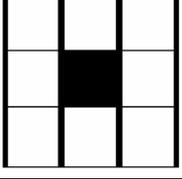
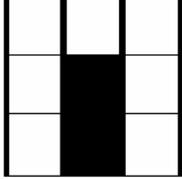
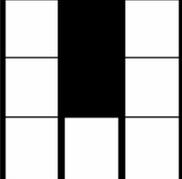
L'area di vent è stata mantenuta di superficie pari a 1,12 m² e la pressione di apertura Pstat pari a circa 15 mbar, caratteristica della copertura utilizzata.

Le caratteristiche indicate, area di vent piuttosto grande e pressione di apertura sufficientemente bassa, sono state scelte scopo di agire con la dovuta cautela rispetto alle conseguenze di un fenomeno che per la prima volta veniva introdotto ed analizzato nell'apparecchiatura CVE.

Durante la campagna sperimentale non si sono mai raggiunti valori di picco massimo ammissibile, si è deciso di mantenere comunque invariate queste caratteristiche in modo da poter utilizzare le prove effettuate per un confronto futuro con altre nelle quali si potranno utilizzare contemporaneamente i due set di ostacoli inizialmente progettati.

Per la quasi totalità delle prove effettuate qualsiasi configurazione ostacoli – concentrazione è stata ripetuta almeno due volte per indagare la variabilità dei risultati ottenuti.

Tabella 8.1 – Campagna sperimentale SM.

Tipo di prova	Sezione degli ostacoli	Area occupata dal primo set (percentuale sul totale)	Area occupata dal secondo set (percentuale sul totale)	Concentrazione di idrogeno (%vol)
Prove di test (a vuoto)		0%	0%	7,5 - 10,5
Montanti		14,6%	0%	7,5 - 8,5 - 9,5 - 10,5 - 11,5 - 12,5
Presenza di montanti con piastra centrale		23,5%	0%	7,5 - 8,5 - 9,5 - 10,5 - 11,5 - 12,5
Montanti con piastra centrale e bassa		32,3%	0%	7,5 - 8,5 - 9,5 - 10,5 - 11,5 - 12,5
Montanti con piastra centrale e alta		32,3%	0%	7,5 - 8,5 - 9,5 - 10,5 - 11,5 - 12,5

Le prove con area occupata pari al 14,6% sono state effettuate con la sola presenza dei montanti, in tutte le altre sono state applicate piastre tra i due montanti centrali. E' stato scelto di interporre

sempre un ostacolo tra il punto di ignizione ed il vent in modo da massimizzare l'interazione tra l'avanzamento del fronte di fiamma e l'ostacolo (figura 8.1).

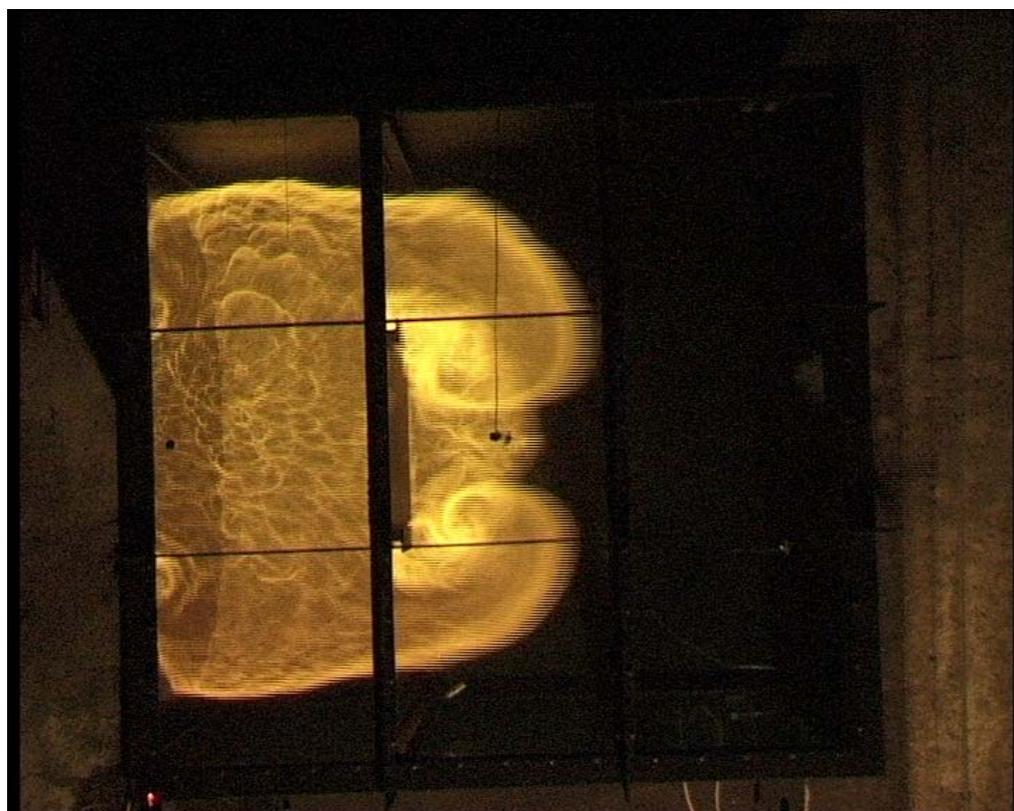


Figura 8.1 – Evoluzione della fiamma durante il passaggio dell'ostacolo nella prova filmata SM58, vista aerea.

Per cercare di ottenere condizioni iniziali di concentrazione il più possibile uniformi durante la fase di immissione è stato utilizzato un fan. Tale procedura comunque non è stata capace di creare una distribuzione omogenea, infatti i dati sperimentali hanno mostrato differenze di concentrazione lungo l'asse verticale dell'1-2%.

Nei report indicheremo come concentrazione alla quale è stata svolta la prova la media ricavata dalle letture dei campionamenti degli analizzatori eseguite a varie altezze. Informazioni più dettagliate circa i dati acquisiti in fase di immissione sono reperibili in appendice G, "Dati riassuntivi e schede tecniche di prova" e in appendice H, "Grafici immissione", dove sono riportati gli andamenti in funzione del tempo delle concentrazioni interne durante tutta la fase di immissione.

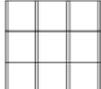
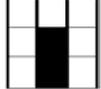
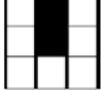
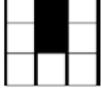
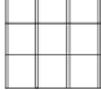
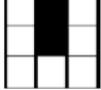
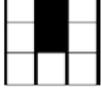
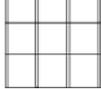
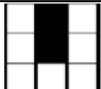
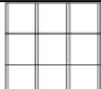
Tabella 8.2 – Dati riassuntivi delle prove(1 di 3).

Prova	Configurazione ostacoli		Conc. Media (%vol)	Tempo apertura vent (s)	Tempo di raggiungimento p_max (s)	P_Stat (mbar)	ΔT interno (°C)	Picco interno di pressione (mbar)		Pressioni esterne (mbar)	
	Set1	Set 2						SX	REAR	3 metri	5 metri
SM02			7,4	2,1	--	13	N.D.	13	12	--	--
SM03			10,4	N.D.	N.D.	--	N.D.	N.D.	N.D.	--	--
SM04			7,2	2,245	--	13	13	13	13	--	--
SM05			8,8	1,315	--	13	69	13	12	--	--
SM06			10,6	0,455	1,125	10	48	26	27	42	42
SM07			7,5	1,795	--	14	29	14	14	--	--
SM08			7,4	1,875	--	15	32	15	14	--	--
SM09			8,4	1,475	--	14	66	14	12	--	--
SM10			8,5	1,475	--	15	62	15	13	--	--
SM11			8,8	1,085	--	13	59	13	13	--	--
SM12			9,4	0,795	--	13	54	13	12	--	--
SM13			8,2	N.D.	N.D.	14	49	N.D.	N.D.	--	--
SM14			8,4	1,605	--	12	64	12	13	--	--
SM15			9,3	0,895	--	12	52	12	11	--	--
SM16			10,4	0,545	1,125	13	46	22	26	45	28
SM17			11,2	0,395	0,805	13	53	95	99	70	83

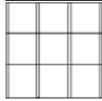
Tabella 8.2 – Dati riassuntivi delle prove(2 di 3).

Prova	Configurazione ostacoli		Conc. Media (%vol)	Tempo apertura vent (s)	Tempo di raggiungimento p_max (s)	P_Stat (mbar)	ΔT interno (°C)	Picco interno di pressione (mbar)		Pressioni esterne (mbar)	
	Set1	Set 2						SX	REAR	3 metri	5 metri
SM18			11,2	0,385	0,805	13	47	98	100	72	66
SM19			12,2	0,275	0,625	13	55	54	57	74	50
SM20			12,3	0,275	0,655	10	54	59	63	81	77
SM21			12,8	0,275	0,575	15	52	63	66	75	53
SM22			12,8	0,255	0,585	14	53	47	51	90	66
SM23			10,7	0,465	0,975	13	53	58	59	73	63
SM24			10,5	0,485	1,035	10	54	26	29	47	38
SM25			11,9	0,305	0,685	13	55	62	63	71	72
SM26			11,9	0,315	0,745	13	57	33	36	40	47
SM27			11,5	0,345	0,765	13	56	52	52	68	65
SM28			11,6	0,335	0,785	13	52	34	33	38	40
SM29			12,4	0,285	0,675	14	57	32	37	50	43
SM30			12,6	0,245	0,535	10	56	38	35	48	12(*)
SM31			12,6	0,245	0,525	10	56	31	28	30	10(*)
SM32			11,5	0,345	0,815	12	53	22	25	22	7(*)

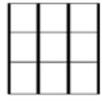
Tabella 8.2 – Dati riassuntivi delle prove(3 di 3).

Prova	Configurazione ostacoli		Conc. Media (%vol)	Tempo apertura vent (s)	Tempo Di raggiungimento p_max (s)	P_Stat (mbar)	ΔT interno (°C)	Picco interno di pressione (mbar)		Pressioni esterne (mbar)	
	Set1	Set 2						SX	REAR	3 metri	5 metri
SM33			9,3	0,855	--	13	61	13	12	--	--
SM34			7,5	1,855	--	13	37	13	12	--	--
SM35			9,5	0,805	--	12	61	12	11	--	--
SM36			10,5	0,485	1,005	12	53	38	39	50	40
SM37			11,5	0,335	0,775	13	55	50	52	65	53
SM38			12,6	0,275	0,595	15	55	44	46	51	50
SM39			9,5	0,835	--	12	58	12	11	--	--

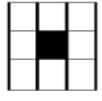
Legenda



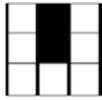
Assenza di set



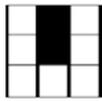
Set composto da soli montanti



Set di montanti con piastra montata in posizione centrale



Set di montanti con piastra in posizione centrale e centrale alta



Set di montanti con piastra in posizione centrale e centrale alta

9. ANALISI DEI RISULTATI

9.1 Pressioni interne

Le prove effettuate a basse concentrazioni, inferiori al 10% volume di idrogeno in aria, non hanno evidenziato apprezzabili differenze nelle pressioni interne rispetto alla presenza o meno degli ostacoli, (figura 9.1.1)

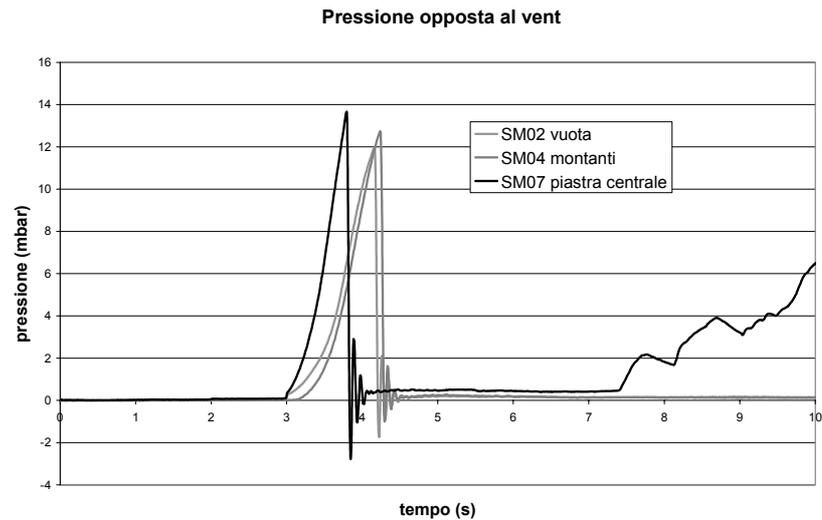


Figura 9.1.1 – Confronto delle pressioni in prove a bassa concentrazione

Quando la concentrazione supera il 10% il picco dovuto all'apertura del vent è seguito da un transitorio che porta ad un secondo picco maggiore in valore assoluto. Il transitorio generato dalla presenza degli ostacoli non differisce sensibilmente da quello generato in assenza degli stessi ed è indipendente dal tipo di configurazione (figure 9.1.2 – 9.1.3).

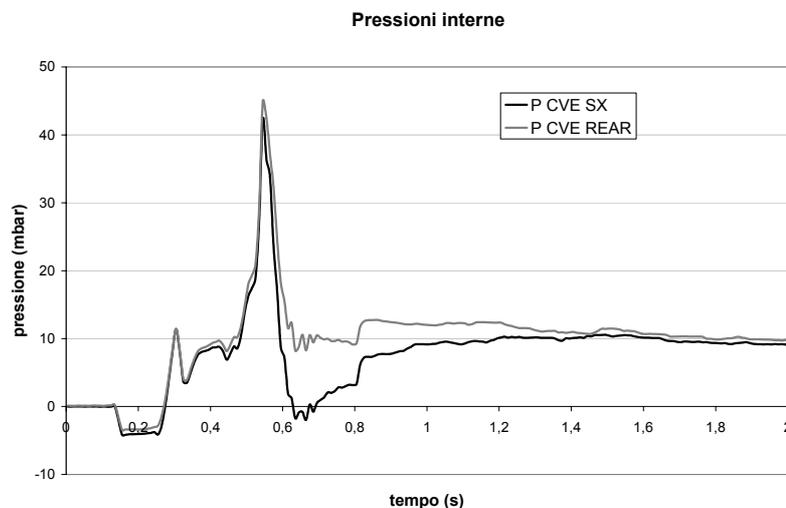


Figura 9.1.2 - Transitorio di una deflagrazione al 12,3% volume di idrogeno nella CVE in assenza di ostacoli [4].

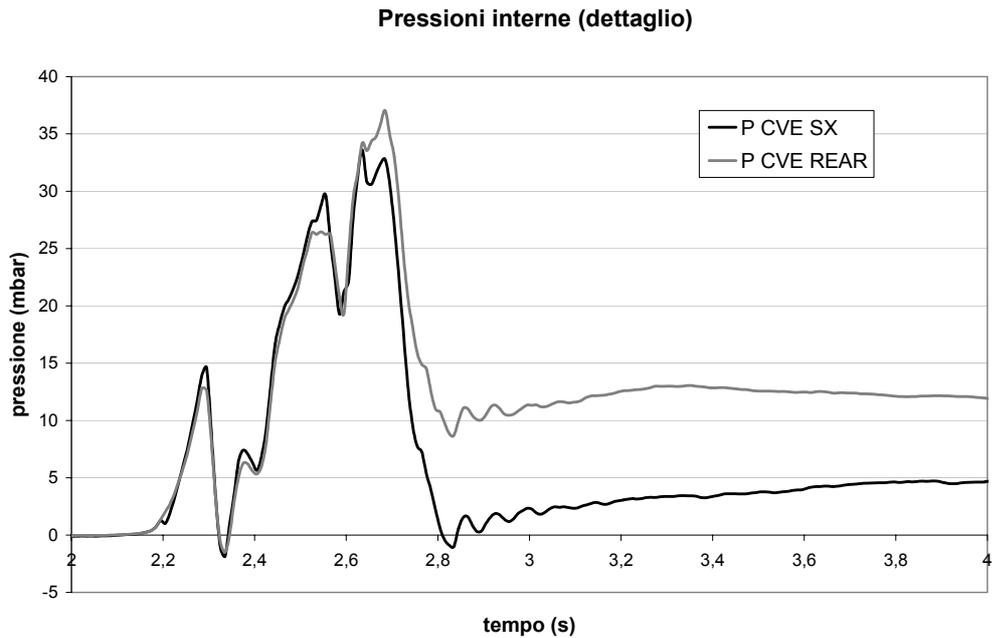


Figura 9.1.3 - Transitorio di una deflagrazione al 12,3% volume di idrogeno con in presenza della piastra centrale.

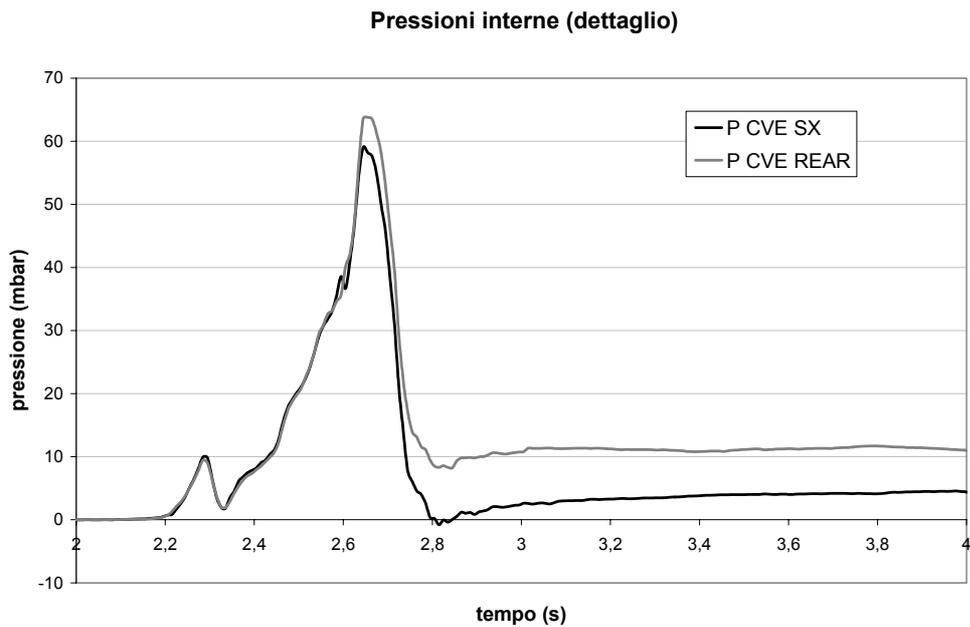


Figura 9.1.4 - Transitorio di una deflagrazione al 12,2% volume di idrogeno con in presenza della piastra centrale.

Tra il picco di apertura e quello massimo è presente un secondo picco spesso inferiore al primo e sempre meno accentuato man mano che si eseguono deflagrazioni a concentrazione crescenti. Dopo questo secondo picco e alla conseguente discesa, limitata nel tempo e nella magnitudo, la pressione inizia a salire meno ripidamente, specialmente a concentrazioni inferiori all'11%, per giungere ad un plateau superato il quale la velocità di salita della pressione è incrementata e porta al vero picco di pressione interna.

Aumentando la concentrazione questa terza discontinuità relativa alla velocità di salita della pressione tende ad essere sempre minore fino ad essere appena accennata per concentrazioni superiori al 12,5%. (Figura 9.1.5)

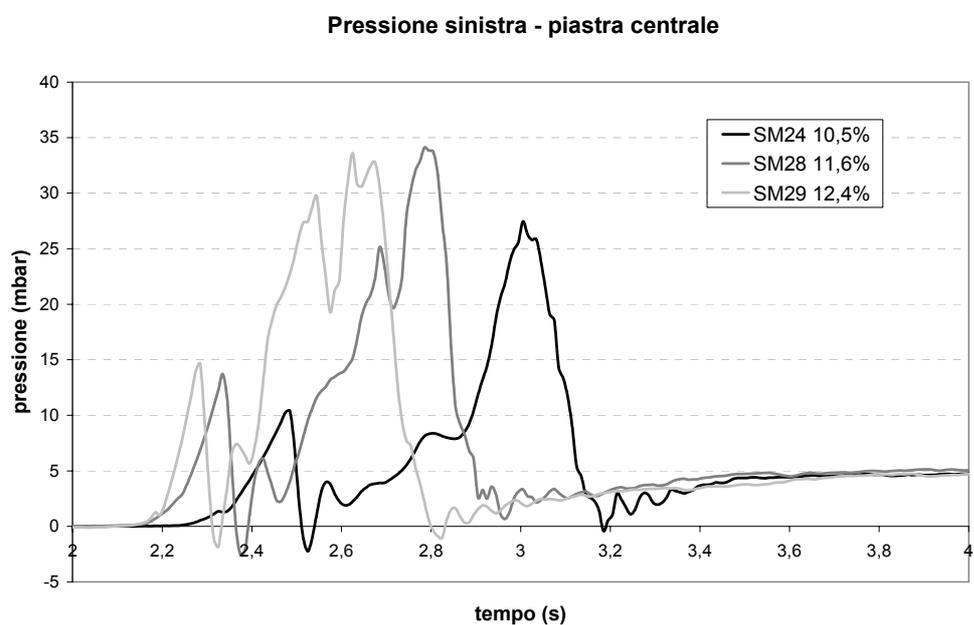


Figura 9.1.5 - Pressioni rilevate dal sensore sinistro in prove con piastra centrale e concentrazioni variabili.

Il comportamento descritto precedentemente è indipendente dalla presenza delle piastre interposte tra il punto di ignizione ed il vent e si nota anche nelle prove dove sono presenti soltanto i montanti.

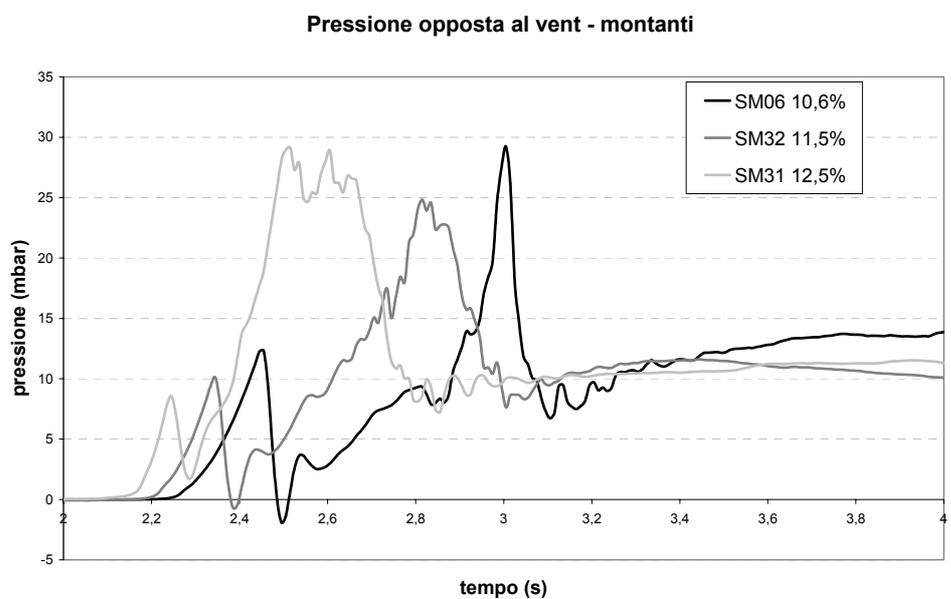


Figura 9.1.6 - Pressioni rilevate dal sensore sinistro in prove con set di montanti e concentrazione variabile.

Nelle prove effettuate a concentrazioni di idrogeno maggiori del 10% è possibile notare variabilità relativa alle pressioni massime raggiunte, (figura 9.1.7):

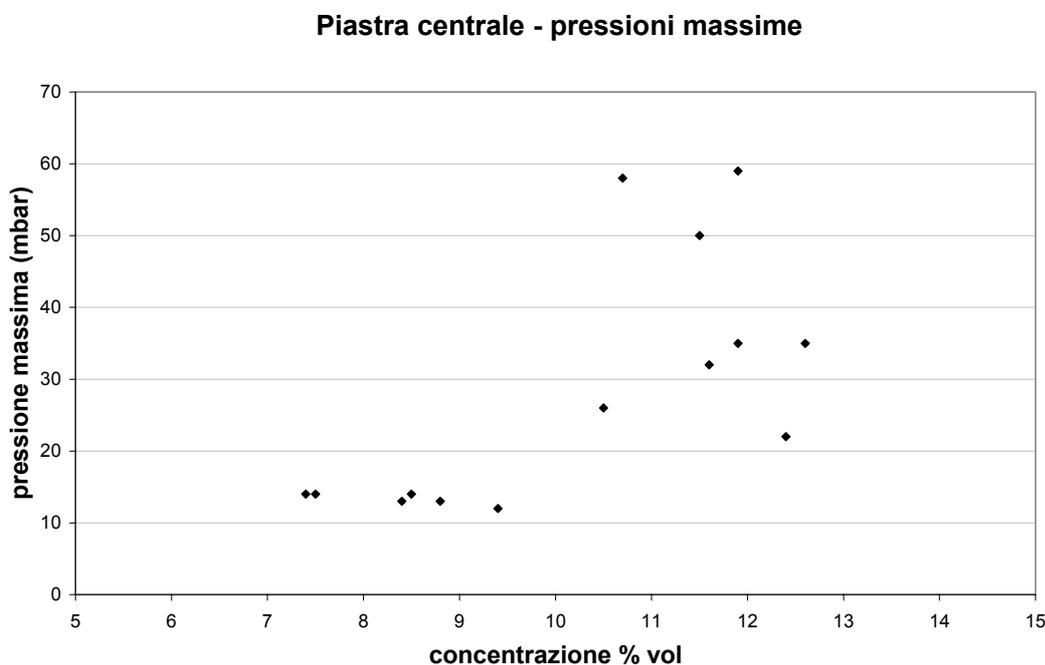


Figura 9.1.7 - Pressioni massime raggiunte nella configurazione di ostacoli costituita dalla sola piastra centrale in funzione della concentrazione media a cui è stata svolta la prova.

Prove effettuate nelle stesse condizioni generano talvolta differenze di pressione interna dell'ordine di 20-30 mbar sul picco massimo. Il massimo della variabilità di comportamento è stata rilevata per le prove effettuate con ostacolo costituito dalla sola piastra centrale. Come possiamo notare dall'esempio riportato di seguito relativo ad una prova eseguita al 11,5% vol., alcune delle prove mostrano due picchi di pressione interni temporalmente ravvicinati tra loro (Figura 9.1.8)

Nelle prove nelle quali questi due picchi si confondono fino a riunirsi in uno solo la salita della pressione riesce a raggiungere valori massimi più elevati, quando invece i due picchi sono distinti e non sommano i loro effetti la pressione massima risulta inferiore.

Rispetto alle prove senza ostacoli le sovrappressioni interne registrano picchi massimi più elevati nei casi in cui un solo picco è presente nell'evoluzione, altrimenti le pressioni sono comparabili per quanto riguarda il massimo raggiunto, ma comunque la durata temporale della sovrappressione generata e quindi l'impulso può essere fino a 4 volte superiore.

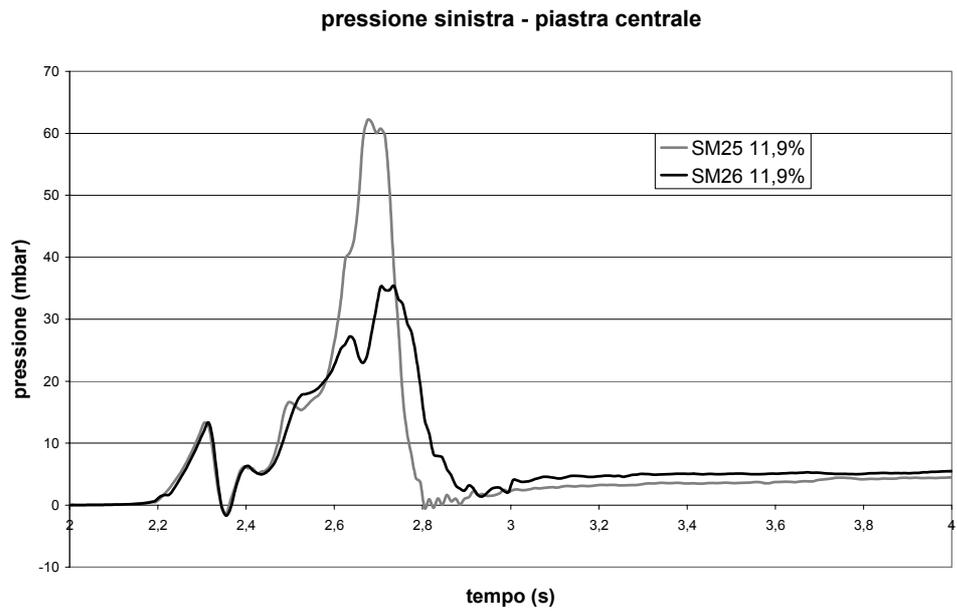


Figura 9.1.8 – Confronto tra due prove effettuate nelle stesse condizioni.

La variabilità maggiore è stata rilevata per le prove con ostacolo costituito da una sola piastra centrale posta fra il punto di ignizione ed il vent.

A parità di area occupata dagli ostacoli e di concentrazione, le pressioni interne sono più alte se le piastre occupano la parte inferiore dell'area tra i montanti rispetto a quando occupano la parte superiore (Figura 9.1.9).

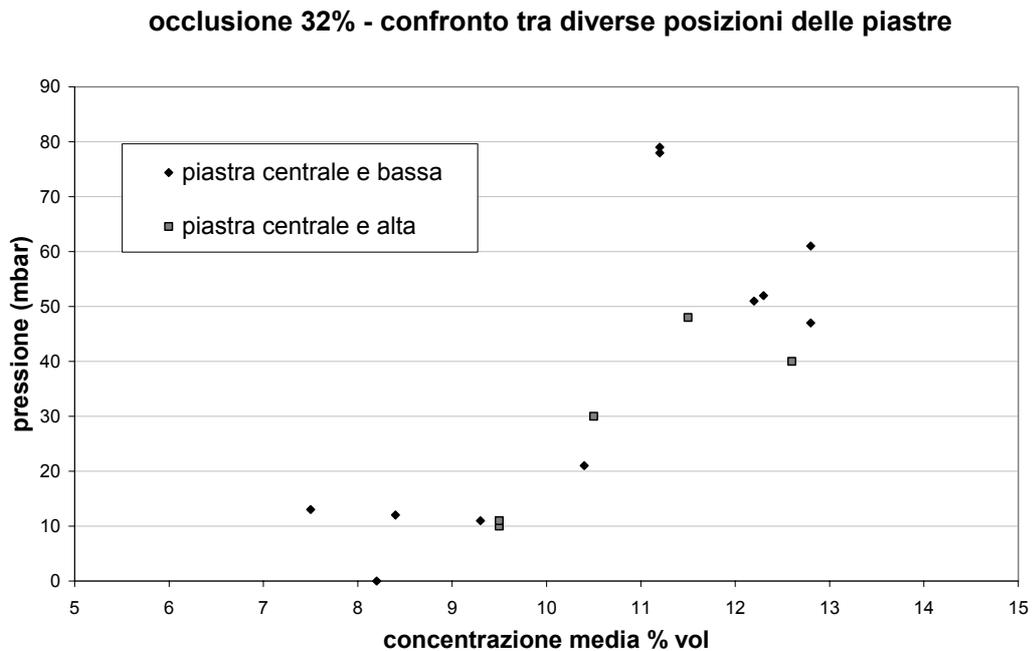


Figura 9.1.9 - Sovrapressioni massime raggiunte nelle due configurazioni di ostacoli che occludono un'area pari al 33% del totale.

Possiamo evidenziare inoltre che il picco di pressione massimo è maggiore a concentrazioni dell'ordine di 11,5% in volume di idrogeno in aria rispetto al 12,5%, per poi mostrare una tendenza ad aumentare nuovamente a concentrazioni vicine al 13%.

Questo comportamento è stato riscontrato per la prima volta nell'arco di queste prove e sembra quindi dovuto alla presenza degli ostacoli. Tale comportamento ha caratterizzato tutte le configurazioni adottate tranne quella caratterizzata dalla sola presenza dei montanti, sembra quindi imputabile alla disposizione delle piastre ed alla conseguente influenza che queste hanno sull'avanzamento del fronte di fiamma nelle configurazioni prese in considerazione. In generale è comunque possibile notare che il picco massimo di pressione interna aumenta all'aumentare della percentuale di occlusione dell'area (Figura 9.1.10) .

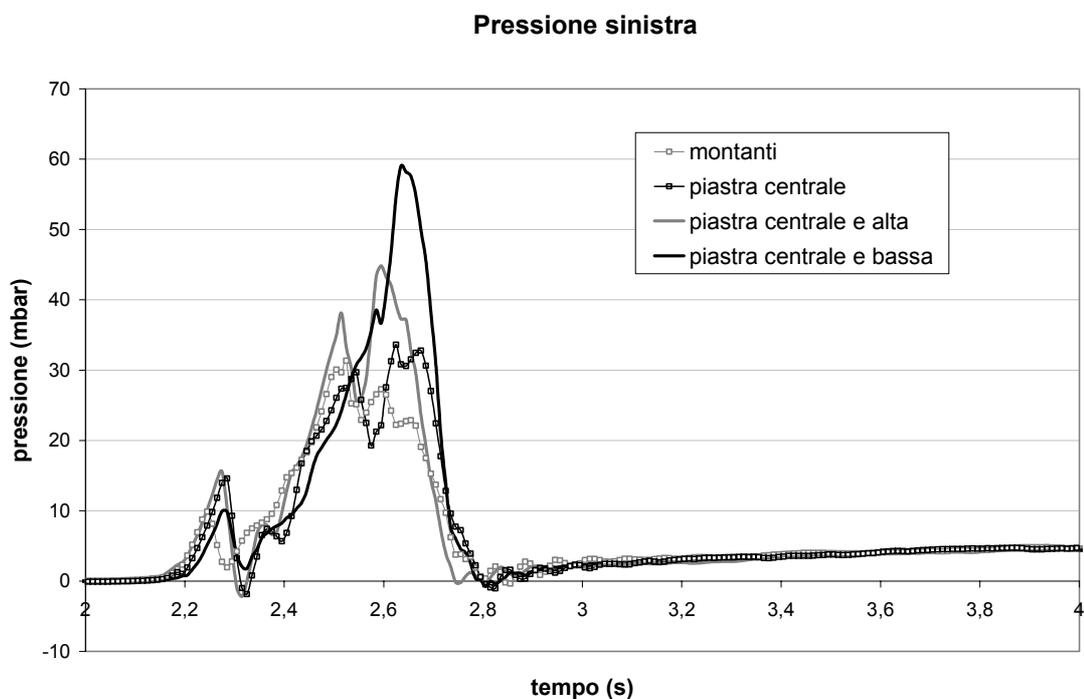


Figura 9.1.10 – Prove effettuate alla concentrazione del 12,5% con diverse configurazioni di ostacolo.

9.2 Pressioni esterne.

Le pressioni registrate dai sensori sono condizionate dalle pressioni dinamiche dovute dal passaggio dei prodotti della combustione nella zona occupata dal sensore. La pressione dinamica può essere espressa come:

$$P_{Dyn} = \frac{\rho \cdot u^2}{2}$$

ρ rappresenta la densità del flusso incidente e u la velocità.

Le prove della campagna sperimentale confermano questa ipotesi, le velocità di propagazione della perturbazione è infatti molto inferiore alla velocità di propagazione di un'onda di pressione nel mezzo considerato, inoltre il posizionamento di un trasduttore in posizione non in vista diretta del vent ha rilevato pressioni molto minori rispetto a quelli posizionati di fronte all'area di sfiato dei prodotti della combustione. L'andamento tipico delle pressioni esterne è simile a quello riportato nella figura seguente:

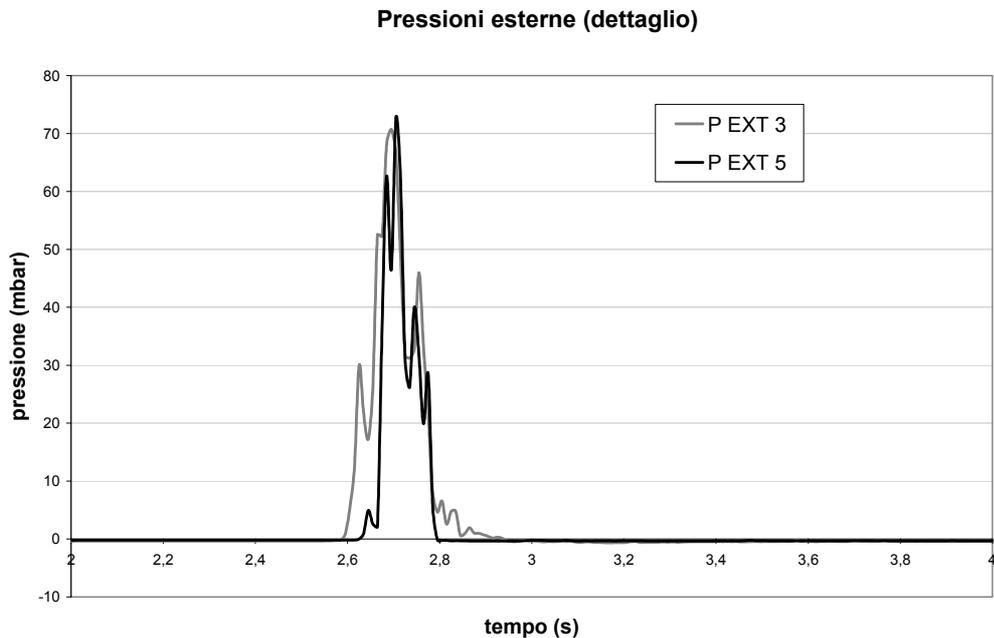


Figura 9.2.1 – Andamento delle pressioni esterne Prova SM25.

E' presente un primo picco di pressione che nel sensore a 3 metri risulta molto più accentuato rispetto a quello a 5 metri, questo è seguito da un secondo picco molto più pronunciato che presenta un'attenuazione molto limitata nel sensore successivo (Figura 9.2.1).

Tra le prove che hanno mostrato maggiore variabilità alle stesse concentrazioni l'andamento prima descritto è relativo a prove che hanno prodotto picchi di pressioni interna maggiori. Al contrario, quelle che hanno mostrato picchi interni minori, hanno un andamento delle pressioni esterne nel quale il primo picco si attenua molto meno nel passaggio dal primo al secondo sensore (Figura 9.2.2).

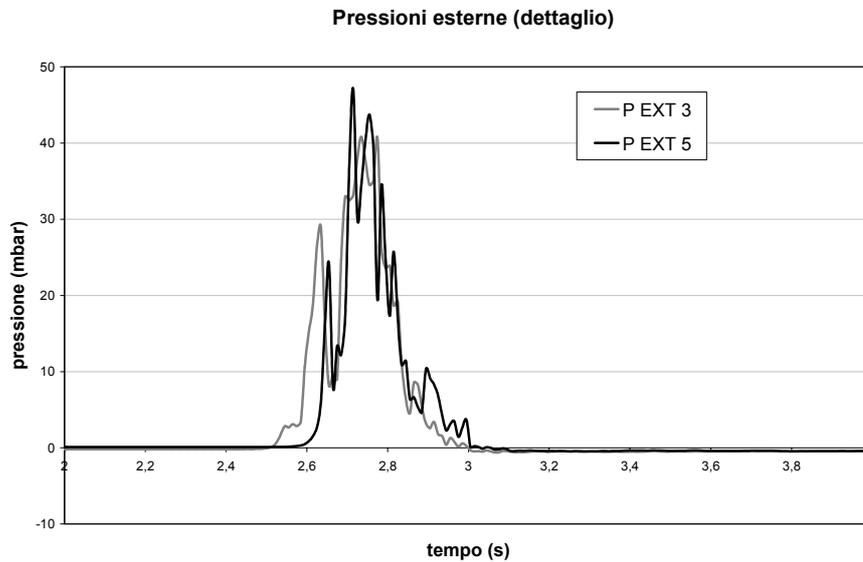


Figura 9.2.2 – Andamento delle pressioni esterne Prova SM26.

La velocità di propagazione della perturbazione che produce il primo picco è inoltre molto minore della successiva. Riportiamo di seguito i picchi di pressione esterna in funzione del picco massimo raggiunto internamente.

L'andamento dei picchi massimi delle pressioni esterne sembra comunque essere proporzionale ai picchi massimi raggiunti internamente (Figura 9.2.3).

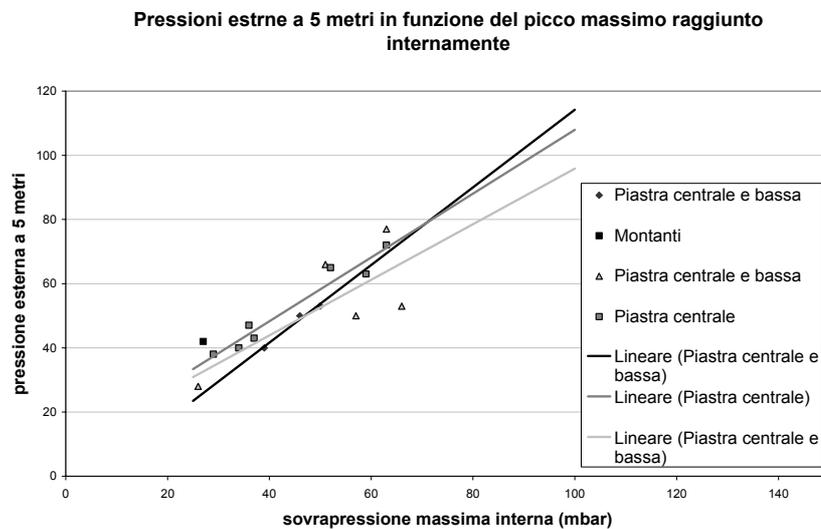


Figura 9.2.3 – Andamento delle pressioni esterne in funzione del picco massimo interno.

10. PRIME SIMULAZIONI COL CODICE FLACS.

Parallelamente alla conduzione delle prove sperimentali sono state eseguite anche delle simulazioni delle stesse mediante il codice CFD FLACS (*FLame ACceleration Simulator*). Il codice FLACS è un codice di simulazione tridimensionale di dispersione ed esplosione di gas che tiene conto dell'interazione del fenomeno della combustione con geometrie complesse come strutture o ostacoli posti lungo il percorso di fiamma. Il codice è così in grado di fornire risultati quantitativi come l'andamento delle pressioni nel tempo o l'impulso generato sulle strutture.

Tale codice CFD si presta infatti sia per analisi preliminari, ad esempio in fase di valutazione delle conseguenze di un evento incidentale, che per analisi a posteriori, ad esempio la verifica dell'efficienza delle misure di mitigazione atte a prevenire la generazione di pericolose sovrappressioni a seguito di fenomeni di deflagrazione (il FLACS è già stato utilizzato come strumento di indagine in più di 30 piattaforme offshore e anche per l'analisi incidentale di alcuni eventi catastrofici). Il codice si avvale di un'interfaccia grafica, il CASD (*Computer Aided Scenario Design*), per la definizione delle geometrie e delle condizioni di simulazione e di un visualizzatore dei risultati, il Flowvis [5].

Il primo passo consiste quindi nel generare un modello geometrico dell'impianto o dello scenario oggetto dell'esplosione. Nella geometria devono poi essere inserite tutte le condizioni al contorno quali l'estensione della nube di gas e la sua composizione, il punto di ignizione ed eventuali turbolenze inizialmente presenti. Anche le grandezze che si desiderano monitorare debbono essere settate a priori.

Le simulazioni sono state condotte per l'analisi, sia a livello qualitativo che quantitativo, dell'andamento delle pressioni nel tempo in funzione della concentrazione media di sostanza infiammabile, del livello di congestione interno ad un volume ventato e della pressione di apertura del vent.

Qui di seguito sono riportati alcuni dei risultati delle prove sperimentali a confronto con i risultati delle simulazioni effettuate per le medesime condizioni di prova.

No.	X	Y	Z	Status
1	0.03	1.62	1.39	Open
2	1.36	0.03	1.39	Open
3	1.34	6.24	1.32	Open
4	1.34	8.23	1.32	Open

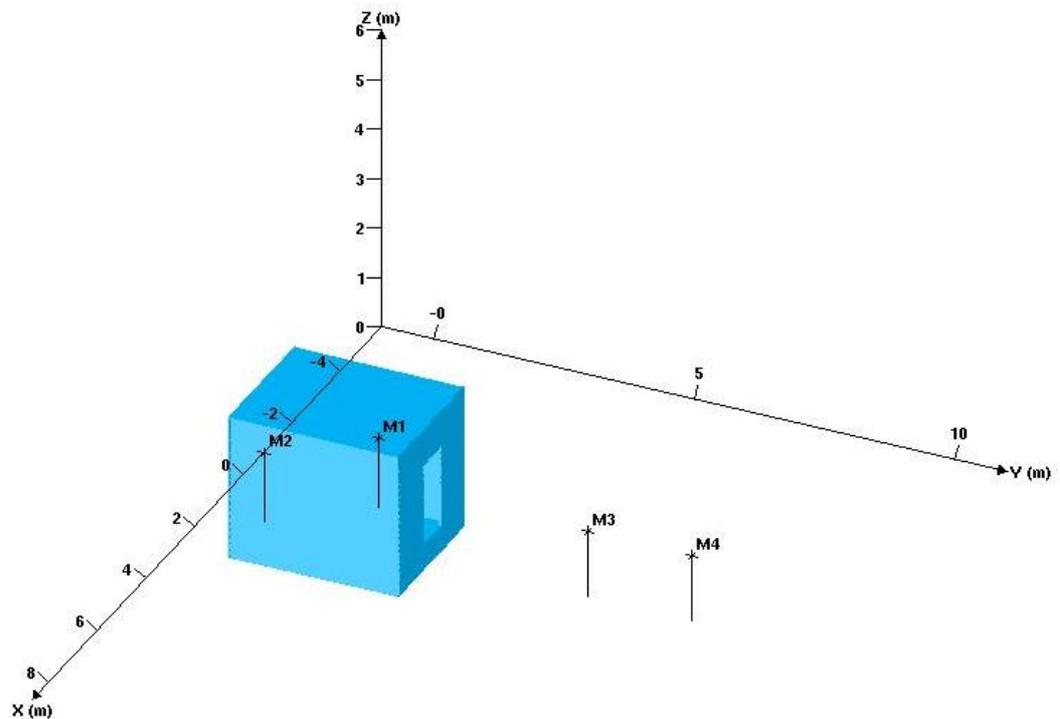


Figura 10.1 - Localizzazione dei punti di monitoraggio (FLACS).

Per effettuare le simulazioni col codice FLACS è stato prima necessario riprodurre la geometria della CVE, sono stati impostati quindi le posizioni dei punti interni ed esterni di rilevamento della pressione e le caratteristiche di apertura del vent (figura 10.1).

Per quanto riguarda in particolare questo dettaglio il vent è stato idealizzato come un pop-up cioè un vent che viene sbalzato via al raggiungimento della pressione di apertura, la densità è stata presa dello stesso ordine di grandezza di quella della plastica utilizzata, molto leggera. La pressione di apertura è stata presa per ogni prova pari alla pressione di aperture rilevata sperimentalmente.

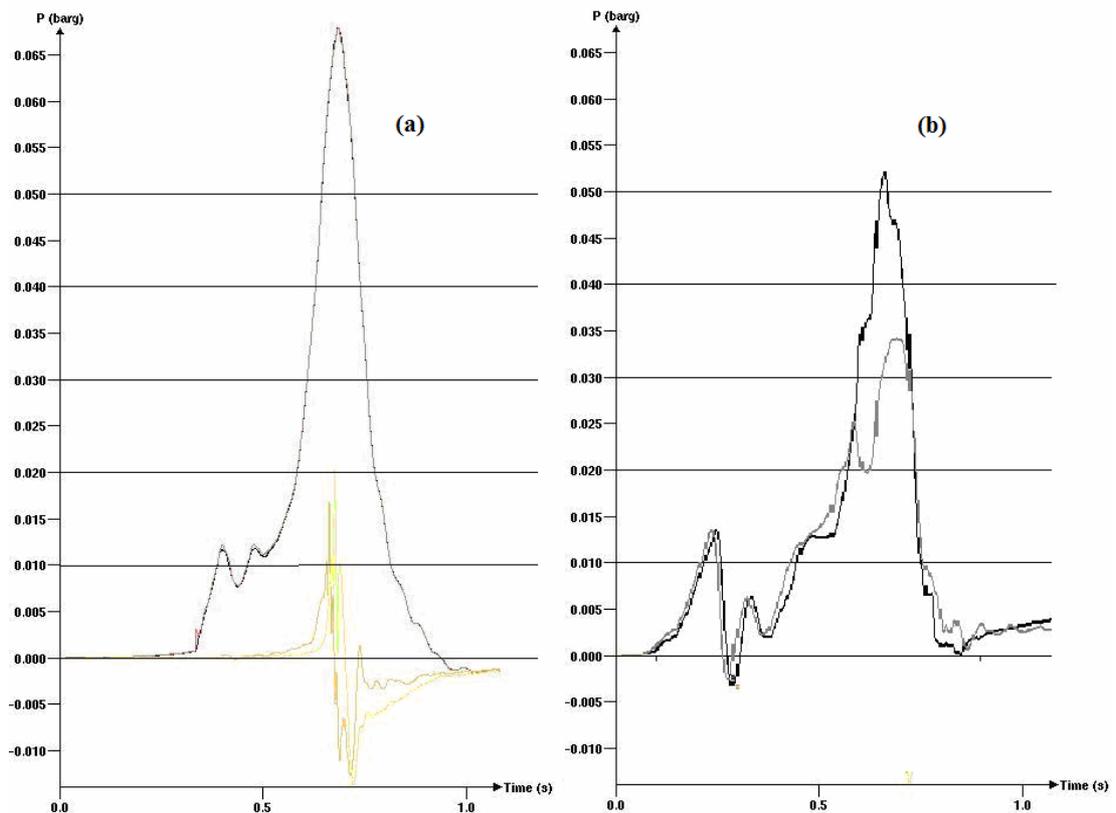


Figura 10.2 - Simulazione al FLACS della condizioni delle prove SM27 e SM29 (a) comparata con l'andamento sperimentale delle pressioni nei due casi (b).

Il codice predice la presenza di un secondo picco dopo quello d'apertura del vent e di ampiezza comparabile col primo, nelle prove effettuate il transitorio è più complesso e genera due oscillazioni (figura 10.2).

E' stata effettuata un'analisi di sensitività per quanto riguarda la dimensione del volume di integrazione. L'intero volume all'interno del quale viene simulato l'evento è infatti di dimensioni finite ed è diviso in un determinato numero di celle elementari per ognuna delle quali vengono eseguite risolte istante per istante le equazioni che regolano il fenomeno.

Per la prova SM25 i dati sperimentali riscontrano il picco di apertura del vent dopo 0,3 secondi dal momento dell'ignizione ed una pressione differenziale massima di 63 mbar rilevata dopo 0,71 secondi.

Il codice, su un volume elementare di calcolo di forma cubica con lato 150 mm, predice l'apertura del vent a 0,35 secondi ed un picco massimo di 78 mbar raggiunto dopo 0,63 secondi dal momento dell'ignizione.

La stessa simulazione eseguita su un volume cubico con lato raddoppiato rispetto al precedente, 300 mm, predice un'apertura del vent dopo 0,42 secondi dall'ignizione ed un picco massimo di pressione di 120 mbar dopo 0,7 secondi (Tabella 10.1).

Tabella 10.1 – Confronto tra la prova SM25 e le simulazioni al FLACS

Forma ostacolo		Prova	Conc. (% vol)	Tempo apertura vent (s)	Tempo presentazione picco massimo (s)	Apertura vent (mbar)	Pressione massima (mbar)
 		SM25	11,9	0,305	0,685	13	62
		FLACS 0,3	11,9	0,425	0,695	13	120
		FLACS 0,15	11,9	0,35	0,635	10	78

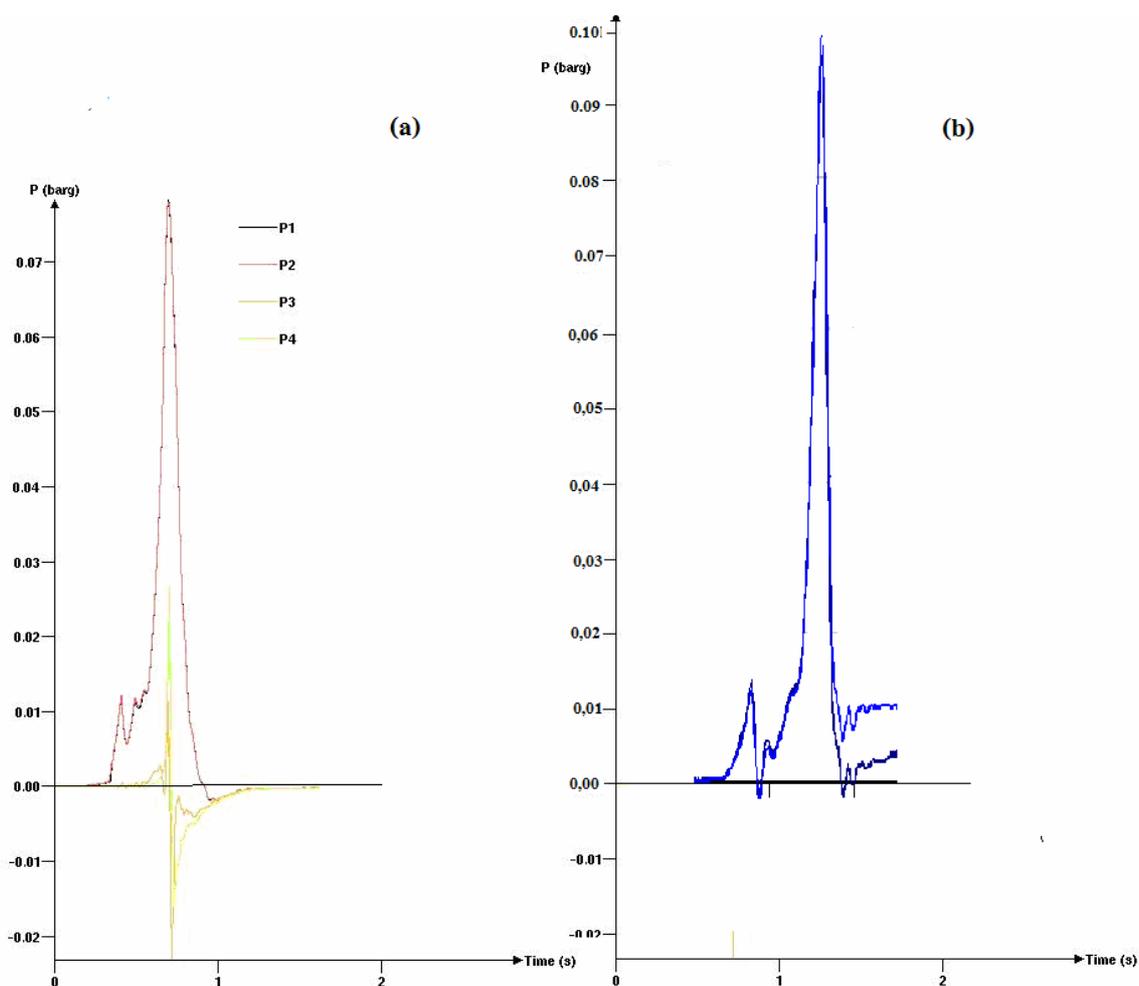


Figura 10.3 - Simulazione al FLACS nelle condizioni delle prove SM17 e SM18 (a) comparata con l'andamento sperimentale delle pressioni nei due casi (b).

Dai dati ottenuti è stata rilevata una grande sensibilità del programma rispetto alla dimensione del volume di integrazione. Infatti, come riportato in tabella 10.1, la dimensione della griglia utilizzata influenza sia la tempistica che la pressione massima. E' possibile notare come i risultati ottenuti mostrano una vicinanza maggiore dei dati sperimentali alla simulazione con cella più piccola. In alcune delle prove considerate il codice ha predetto risultati inferiori in termini di pressione massima rispetto all'effettivo risultato delle prove sperimentali, (figura 10.3).

11. CONCLUSIONI.

Le configurazioni adottate nella presente campagna sperimentale sono state giudicate idonee per poter essere indagate nell'intero intervallo di concentrazioni definite inizialmente. Le prove effettuate, pur sfruttando semplici configurazioni degli ostacoli, hanno confermato la validità delle scelte adottate per iniziare uno studio relativo alla turbolenza.

La maggiore tra le evidenze sperimentali che possiamo individuare in questa fase della ricerca è senz'altro la singolarità del picco di pressione per combustione all'11,5% di idrogeno maggiore del picco di pressione generato dalla combustione di concentrazioni maggiori (12% e 12.5%) nelle stesse condizioni sperimentali.

A parità di area occlusa dagli ostacoli e di concentrazione di H_2 , le pressioni generate risultano maggiori quando la posizione degli ostacoli occupa la parte bassa dell'area interessata dal passaggio del fronte di fiamma. La particolare configurazione che prevede la presenza di un ostacolo posto di fronte al vent ha inoltre mostrato un'ampia variabilità nelle pressioni massime raggiunte.

12. ATTIVITA' FUTURA.

La presente campagna sperimentale prevede una prosecuzione che avverrà sistemando il secondo set di montanti per permettere lo studio dell'evoluzione del fenomeno in geometrie più complicate rispetto a quelle prese in esame in questo lavoro.

Dal punto di vista dell'acquisizione dei segnali una delle possibili migliorie potrebbe essere costituita dalla ricerca della possibilità di acquisire nuovi segnali, in particolare l'interesse potrebbe essere concentrato sull'acquisizione di maggiori informazioni sulle pressioni esterne a distanze maggiori rispetto a quelle monitorate ed in posizioni anche non in linea diretta dell'area di vent. Altri segnali da acquisire potrebbero riguardare la mappatura della temperatura interna alla CVE e del suo andamento temporale in uno o più punti durante la prova.

In futuro un intenso lavoro di modellazione col codice FLACS permetterà anche un maggior studio sulla turbolenza indotta dagli ostacoli tenendo conto dei modelli di turbolenza presenti nel codice stesso. In questo lavoro la possibilità di filmare le prove con riprese video sarà di fondamentale aiuto.

BIBLIOGRAFIA.

- [1] BJERKETVEDT, BAKKE, VAN WNGERDEN 1997 Journal of hazardous material, (Gas explosion handbook - Deflagration) 1997 pp 41-46.
- [2] ANDREWS, BRADLEY, LWAKABAMBA, 1975. Combustion and flame (Turbulence and turbulent flame propagation – A critical appraisal) Giugno 1975 pp 285-303
- [3] CHRITOPH HEINZ Vented Explosions- Formation and propagation of blast waves Pisa Luglio 2003
- [4] SIMONETI R. 2005 Analisi ed utilizzo dei dati sperimentali relativi a prove di deflagrazione eseguite mediante l'apparecchiatura sperimentale CVE Tesi di Laurea in Ingegneria Nucleare, Università degli studi di Pisa, anno accademico 2004-2005.
- [5] BJERKETVEDT, BAKKE, VAN WNGERDEN 1997 Journal of hazardous material, (Gas explosion handbook – Flacs simulation) 1997 pp 125-136.