

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



**Tesi di Laurea in Ingegneria Nucleare:**

**Analisi ed utilizzo dei dati sperimentali relativi a  
prove di deflagrazione eseguite mediante  
l'apparecchiatura sperimentale CVE**

Il candidato:

**Simonetti Riccardo**

I relatori:

**Prof. Ing. F. Fineschi**

**Prof. Ing. M. Carcassi**

Anno Accademico 2004-2005

# INDICE

<b>INTRODUZIONE</b>	<b>7</b>
<b>CAPITOLO I</b>	<b>11</b>
<b>1.1 L'NFPA68: GUIDA PER IL VENTING DI DEFLAGRAZIONI</b>	<b>11</b>
<b>1.1.1 LA CRITICITA' DI APERTURA DELLO SFIATO</b>	<b>15</b>
<b>1.1.2 IL CODICE DEVENT</b>	<b>16</b>
<b>1.2 FILOSOFIA E LOGICA DEL LAVORO DI TESI</b>	<b>20</b>
<b>1.3 CONFRONTO TRA IL DEVENT E L'NFPA68</b>	<b>31</b>
<b>CAPITOLO II</b>	<b>40</b>
<b>2.1 DESCRIZIONE GENERALE DELL'APPARECCHIATURA</b>	<b>40</b>
<b>2.2. SISTEMA DI IMMISSIONE E MISURA DELLA CONCENTRAZIONE DI GAS</b>	<b>42</b>
<b>2.3. SISTEMA DI IGNIZIONE</b>	<b>47</b>
<b>2.4. STRUMENTAZIONE</b>	<b>48</b>
<b>CAPITOLO III</b>	<b>54</b>
<b>3.1. PROVE PRELIMINARI (SERIE SD) DI DEFLAGRAZIONE.</b>	<b>54</b>
<b>3.2 PROVE DELLA PRIMA CAMPAGNA SPERIMENTALE (SERIE CR) DI DEFLAGRAZIONE</b>	<b>57</b>
<b>3.3 CONCLUSIONI</b>	<b>61</b>
<b>CAPITOLO IV</b>	<b>63</b>
<b>4.1 VALUTAZIONE DEI PARAMETRI NECESSARI AL DEVENT</b>	<b>63</b>
<b>4.2. PROGRAMMAZIONE DELLA CAMPAGNA DI PROVE</b>	<b>66</b>
<b>CAPITOLO V</b>	<b>69</b>
<b>5.1 INTRODUZIONE ALLE PROVE RSD</b>	<b>69</b>
<b>5.2 ANALISI DELLE PROVE RSD</b>	<b>71</b>

<b>5.3 CONCLUSIONI SUI RISULTATI DELLE PROVE</b>	<b>80</b>
<b>CAPITOLO VI</b>	<b>83</b>
<b>6.1 MODELLO DI CALCOLO DEL <math>\Delta P</math> DA REALIZZARE</b>	<b>83</b>
<b>6.2 LE PROVE RSD E LA MODALITA' OPERATIVA PER L'OTTENIMENTO DELLA CONCENTRAZIONE VOLUTA</b>	<b>85</b>
<b>6.3 STIMA DELL'ENTITA' DEGLI ERRORI RELATIVI AL MODELLO DI CALCOLO DEL <math>\Delta P</math> DELLE BOMBOLE</b>	<b>86</b>
<b>6.5 PROPOSTA DI UN MODELLO PREDITTIVO PER IL CALCOLO DEL <math>\Delta P</math> NECESSARIO PER OTTENERE UNA CONCENTRAZIONE PREFISSATA NELLA CVE A SEGUITO DI UNA SINGOLA IMMISSIONE</b>	<b>102</b>
<b>6.6 CONCLUSIONI FINALI SUI MODELLI ESPOSTI</b>	<b>107</b>
<b>6.7 CONSIDERAZIONI SULLE TRE MISURE DI CONCENTRAZIONE</b>	<b>108</b>
<b>BIBLIOGRAFIA</b>	<b>116</b>

**APPENDICE A Report delle prove SD e CR**

**APPENDICE B Andamenti di pressione rilevati nelle prove SD e CR**

**APPENDICE C Valutazione di  $P_{stat}$  dalle prove CR**

**APPENDICE D Il codice DEVENT**

**APPENDICE E Report relativo alle prove RSD**

## INDICE DELLE FIGURE

Fig. 1.1.1 - Esempio illustrativo di applicazione del nomografo NFPA68 per l'idrogeno.....	12
Fig. 1.2.1 Diagramma a blocchi esplicativo della metodologia che si intende seguire .....	30
Fig. 1.3.1 Istogramma dei fattori di correzione necessari alle varie aree di vent .....	38
Fig. 1.3.2 Visione prospettica del fattore di correzione turbolento di tabella 1.3.10 in funzione di $A_v$ e $P_{stat}$ .....	39
Fig. 2.1.1. – Schema semplificato della CVE con posizione degli ignitori.....	42
Fig. 2.1.2 – Particolare del vent della parete di prova della CVE con porta e finestra in plastica	42
Fig. 2.2.1. – Sistema di immissione e di prelievo.....	44
Fig. 2.2.2. – Torretta di interfaccia tra la parte rigida e la parte flessibile della linea d'immissione in CVE .....	45
Fig. 2.2.3 – Misuratore di concentrazione di idrogeno e componenti annessi .....	46
Fig. 4.1.1 diagramma di dispersione di P per la prova Cr27 .....	64
Fig. 4.1.2 andamento filtrato di P per la prova CR27.....	65
Fig.5.2.1 Andamento della pressione della prova RSD04 con $H_2\%=12.2$ ed .....	72
$A_v= 0.71 \text{ m}^2$ ; tipico andamento del primo tipo.....	72
Fig.5.2.2 Andamento della pressione della prova RSD22 con $H_2\%=12.03$ ed.....	73
$A_v= 2 \text{ m}^2$ ; tipico andamento del secondo tipo .....	73
Fig. 6.3.1 FP in funzione della pressione iniziale per due sessioni di prove, una serale ed una diurna, della campagna CR.....	94
Fig.6.3.2 FP in funzione della pressione iniziale delle bombole per le prove RSD01-22, diurne e serali.....	96
Fig.6.3.4 Linearizzazione di FP in funzione di $P_{in}$ .....	97
Fig. 6.3.5 Istogramma della concentrazione misurata e di quella prevista dal modello isoterma con il fattore di perdita linearizzato; in verde il range del 10% nell'intorno della previsione del modello. ....	99
Fig. 6.5.1 Pressione finale misurata e valutata secondo i modelli isoterma ed adiabatico in funzione della pressione iniziale delle bombole utilizzando FP linearizzato. ....	106
Fig. 6.7.1 $\%H_2$ misurata dall'analizzatore di concentrazione a confronto con quella prevista dal flussimetro; in verde si riporta l'errore del 25% relativo alla % prevista dal flussimetro ..	114

## INDICE DELLE TABELLE

Tabella 1.3.1: previsioni di $P_{\max}$ DEVENT con $P_{\text{redNFPA68}}=0.2,0.6,1,1.5,2$ bar e scarto fra i due per un recipiente di $1 \text{ m}^3$ , $P_{\text{stat}}=0.1,0.2,0.5$ bar; $t_{\text{open}}^{(V)} 0.01$ sec .....	32
Tabella 1.3.2: previsioni di $P_{\max}$ DEVENT con $P_{\text{redNFPA68}}=0.2,0.6,1,1.5,2$ bar e scarto fra i due per un recipiente di $25.043 \text{ m}^3$ , $P_{\text{stat}}=0.1,0.2,0.5$ bar; $t_{\text{open}}^{(V)} 0.13$ sec .....	33
Tabella 1.3.3: previsioni di $P_{\max}$ DEVENT con $P_{\text{redNFPA68}}=0.2,0.6,1,2$ bar e scarto fra i due per un recipiente di $100 \text{ m}^3$ , $P_{\text{stat}}=0.1,0.2,0.5$ bar; $t_{\text{open}}^{(V)} 0.26$ sec .....	34
Tabella 1.3.4: $t_{\text{open}}^{(V)} 0.01$ ; revisione della tabella 1.3.1 con la correzione turbolenta per ottenere la congruenza tra i risultati del DEVENT ed il dimensionamento secondo la guida NFPA68	35
Tabella 1.3.5: $t_{\text{open}}^{(V)} 0.13$ ; revisione della tabella 1.3.2 con la correzione turbolenta per ottenere la congruenza tra i risultati del DEVENT ed il dimensionamento secondo la guida NFPA68	36
Tabella 1.3.6: $t_{\text{open}}^{(V)} 0.26$ ; revisione della tabella 1.3.3 con la correzione turbolenta per ottenere la congruenza tra i risultati del DEVENT ed il dimensionamento secondo la guida NFPA68	36
Tabella 1.3.10: Tabella riassuntiva dei risultati delle tabelle precedenti.....	37
Tabella 1.4.1 Tabella riassuntiva della strumentazione e geometria della CVE .....	49
Tabella 3.1.1. Dati relativi alle misure effettuate nelle prove preliminari di Shake Down .....	55
Tabella 3.1.2. Condizioni al contorno delle prove preliminari di Shake Down .....	56
Tabella 3.2.1. Valori rilevati nella campagna sperimentale serie CR .....	59
Tabella 3.2.2. Valori delle pressioni esterne e condizioni al contorno delle prove serie CR .....	60
Tabella 4.1.1 Stima di $P_{\text{stat}}$ e $t_{\text{open}}^{(V)}$ per la programmazione delle prove RSD .....	63
Tabella 4.2.1: condizioni di prova e pressioni massime attese secondo il codice DEVENT con i parametri $t_{\text{open}}^{(V)}=0.1$ sec e $P_{\text{stat}}=50$ mbar .....	68
Tabella 5.2.1 Confronto tra la pressione massima misurata e quella prevista dal DEVENT .....	77
Tabella 5.2.2 Valutazione dei coefficienti di correzione turbolenta per il DEVENT nelle prove RSD .....	79
Tabella 6.1.1 Sessione serale, $V_{\text{bomb}}=160.7$ l.....	84
Tabella 6.3.2 FP relativi a due sessioni di prove, una diurna, prove CR20-24 ed una serale, prove CR25-31.....	92
Tabella 6.3.3 Condizioni di prova ed FP per due sessioni di prove, una diurna ed una serale, della campagna CR.....	93
Tabella 6.3.4 Calcolo di FP dai dati delle prove RSD.....	95
Tabella 6.3.5 Tabella riassuntiva di $FP_{\text{mis}}$ ed $FP_{\text{calc}}$ in base alla linearizzazione proposta e di tutti i dati necessari per valutarli per tutte le prove precedentemente riportate.....	98

Tabella 6.4.1 Dati relativi alle perdite dal circuito di immissione della CVE.....	100
Tabella 6.5.1 Tabella riassuntiva di confronto tra $P_{fin\_bomb}$ , $P_{fin\_ADIAB}$ e $P_{fin\_isot}$ .....	105
Tabella 6.7.1 Volume di idrogeno misurato dal flussimetro .....	113

## INTRODUZIONE

Lo studio delle deflagrazioni in ambienti confinati, anche provvisti di sistema di *vent* di sicurezza, è da sempre complicato dalla diversa tipologia che il fenomeno assume in funzione di diversi parametri, quali:

- la distribuzione, non uniforme, di gas nell'ambiente
- la geometria del volume
- il punto di ignizione
- l'eventuale presenza di ignizioni multiple
- l'eventuale presenza di meccanismi che accelerano la fiamma
- la turbolenza e l'instabilità della fiamma

L'apparecchiatura CVE è stata concepita per avere la possibilità di analizzare il fenomeno, che di per sé è multidipendente, simulando un ambiente che nella forma somigliasse il più possibile ad un ambiente reale, domestico od industriale. La CVE possiede pertanto dimensioni tali da poter essere ragionevolmente paragonata ad un locale di stoccaggio di combustibile infiammabile, quali quelli presenti all'interno dell'area di un distributore di carburante, o anche ad un locale di uso domestico, quale una cucina.

L'intenzione di simulare un'esplosione in un ambiente dimensionalmente congruo con uno di uso civile, è stimolata dalla ricerca di eventuali leggi di scala che permettano la previsione del carico su strutture di forma analoga e dimensioni diverse. Il termine di paragone è dato, in termini sperimentali, dall'analisi di esplosioni effettuate sulla precedente apparecchiatura *Large View Facility (multichamber combustion)* di dimensioni e forma ridotte rispetto alla CVE.

Tutti gli ambienti confinati dove vi siano dispositivi, apparecchiature o condutture all'interno delle quali possa venirsi a trovare del materiale infiammabile rischiano in caso di perdita dalle stesse di trovarsi in condizioni di presenza simultanea di un combustibile e di un comburente e quindi in condizioni in cui può avvenire un'esplosione sia essa deflagrante o detonante.

In caso di detonazione, cioè di una propagazione del fronte di fiamma veloce quanto l'onda d'urto che esso stesso genera, non vi è modo di limitare i danni alle strutture se non quello di progettare le componenti importanti in modo che possano resistere alla forza impulsiva a cui vengono sottoposte quando vengono investite dall'onda di pressione oppure operare in modo da rendere sostanzialmente improbabile la detonazione (per esempio inertizzando l'atmosfera dell'ambiente, introducendo un sistema di ricambio forzato dell'atmosfera ecc.).

Molto più interessante da un punto di vista ingegneristico è il caso della deflagrazione; infatti in tali circostanze si possono significativamente ridurre i danni alle strutture di interesse utilizzando il concetto del venting.

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. I possibili metodi per mitigare gli effetti di una deflagrazione sono ascrivibili sostanzialmente a due filosofie, quella della prevenzione (inertizzatori, ricombinatori ecc.) e quella della mitigazione.

E' su quest'ultima che noi ci soffermeremo in questa tesi ed in particolare sulla mitigazione degli effetti delle deflagrazioni tramite venting di sicurezza.

Un modo semplice ed economico di ridurre il picco di pressione associato ad una deflagrazione -tipicamente dell'ordine degli 8 bar per un generico idrocarburo in un sistema adiabatico privo di qualsiasi sistema di mitigazione - è quello di fornire all'ambiente confinato un'opportuna superficie di resistenza sostanzialmente minore di quella della struttura da proteggere. Nelle fasi iniziali della deflagrazione questa cede e



permette lo “sfiato”(venting) dei gas combusti ed incombusti verso l’esterno, riducendo così il picco di pressione che si raggiunge all’interno della “struttura” (enclosure, ambiente) che si vuole proteggere. Associato allo sfiato dei gas, vi potrà essere un aumento di turbolenza e di superficie del fronte di fiamma che porterà ad un aumento del tasso di bruciamento.

Durante una deflagrazione ventata si avranno tre fasi: durante la prima il fenomeno sarà uguale a quello che avverrebbe in assenza di vent; raggiunta la pressione di rilascio del dispositivo di tenuta (se presente) comincerà la seconda fase durante la quale quest’ultimo verrà sbalzato mentre la pressione continua a crescere; quando l’area di vent sarà completamente libera comincerà la terza fase che può portare a differenti risultati. Potrà infatti succedere che la deflagrazione avvenga più velocemente dell’apertura del sistema di vent, rendendolo in sostanza inefficace, oppure che esso si apra correttamente durante una fase iniziale della deflagrazione. In quest’ultimo caso la pressione può continuare ad aumentare dopo l’apertura del vent indicando che la potenza che viene generata dalla combustione, incrementata dal maggior tasso di bruciamento e turbolenza indotte dal venting, è maggiore di quella che viene evacuata dal vent. Può succedere invece che la pressione non cresca ulteriormente dopo la completa apertura del vent, indicando dunque che la combustione è incapace di introdurre energia sufficiente a bilanciare la riduzione di pressione che dovrebbe avvenire per l’evacuazione dei gas attraverso il vent.

In relazione a ciò vi saranno tre tipici andamenti della pressione in funzione del tempo: nel primo il vent sarà influente presentando una tempistica di apertura molto più lenta della deflagrazione; nel secondo la pressione, dopo un iniziale cambiamento di curvatura o un flesso o, addirittura, una diminuzione, continuerà a crescere, raggiungendo però, salvo casi straordinari, un valore massimo inferiore a quello che si sarebbe registrato senza il sistema di sfiato; nel terzo vi sarà un picco più o meno ampio in corrispondenza della completa apertura del vent seguito dalla diminuzione di pressione.

Le principali variabili che influenzano e determinano tale fenomeno sono: la pressione di rilascio del dispositivo che tiene normalmente in posizione di chiusura il vent (in quanto per motivi pratici non è normalmente accettabile utilizzare vent privi di copertura, anche se sarebbe auspicabile per ridurre la pressione di picco nella struttura a seguito di una

deflagrazione e per evitare la necessaria manutenzione di tale copertura), la resistenza della più debole componente della struttura che si vuole proteggere (che a volte è un parametro di progetto su cui si opera); il volume e la forma dell'enclosure (parametrizzabile come rapporto tra superficie e volume) dell'enclosure, la turbolenza o la presenza di dispositivi o componenti che possano indurla (per esempio ventilatori, ricircolatori o sistemi di aerazione); il tipo di infiammabile, che può essere un gas come una polvere od una nebbia (fog), con cui si può avere a che fare; la pressione e la temperatura iniziali nell'enclosure; l'area di venting che solitamente è il parametro di progetto su cui si opera.

Negli anni '80 a Pisa è stato approntato dal prof. Fineschi un interessante codice di calcolo termodinamico teorico, il DEVENT, che affronta il problema della valutazione del picco di pressione in un ambiente confinato dotato di vent di sicurezza prevedendo un realistico andamento della pressione durante una deflagrazione; come si vedrà in seguito, questo programma può essere un utile strumento di dimensionamento delle aree di vent, se usato con oculatezza.

Attualmente lo stato dell'arte sulla protezione dalle deflagrazioni tramite venting di sicurezza è rappresentato dall'NFPA68, una guida americana della National Fire Protection Association a supporto della progettazione di tali sistemi.

# CAPITOLO I

## 1.1 L'NFPA68: GUIDA PER IL VENTING DI DEFLAGRAZIONI

La stesura dell'NFPA68 a cui si fa riferimento è quella del 1988 ed il suo scopo è quello di fornire una metodologia applicativa per il dimensionamento dei sistemi di venting atti alla mitigazione degli effetti delle deflagrazioni sulle strutture chiuse; nella guida è chiaramente sottolineata l'inefficacia di tali sistemi per mitigare esplosioni detonanti; è applicabile a polveri, sospensioni di infiammabili vari e gas.

Uno dei parametri fondamentali utilizzati in tale guida è il massimo rateo di aumento della pressione  $(dP/dt)_{\max}$  che viene assunto come caratteristica distintiva dei vari infiammabili e proposto come una interessante base per l'interpolazione in caso si avesse a che fare con un infiammabile non specificamente riportato ed analizzato dalla guida ma per il quale si disponga di tale dato.

Per i gas vengono riportate due procedure di dimensionamento.

La prima è per strutture a bassa resistenza (cioè che possono resistere fino a pressioni interne minori od uguali di 0.1 bar), che riporta una formula empirica (qualitativamente comprensibile, ma quantitativamente non evidente) con cui valutare l'area di venting minima necessaria per proteggere la struttura:

$$A_v = \frac{C A_s}{\sqrt{P_{\text{red}}}} \quad (1.1.1.1)$$

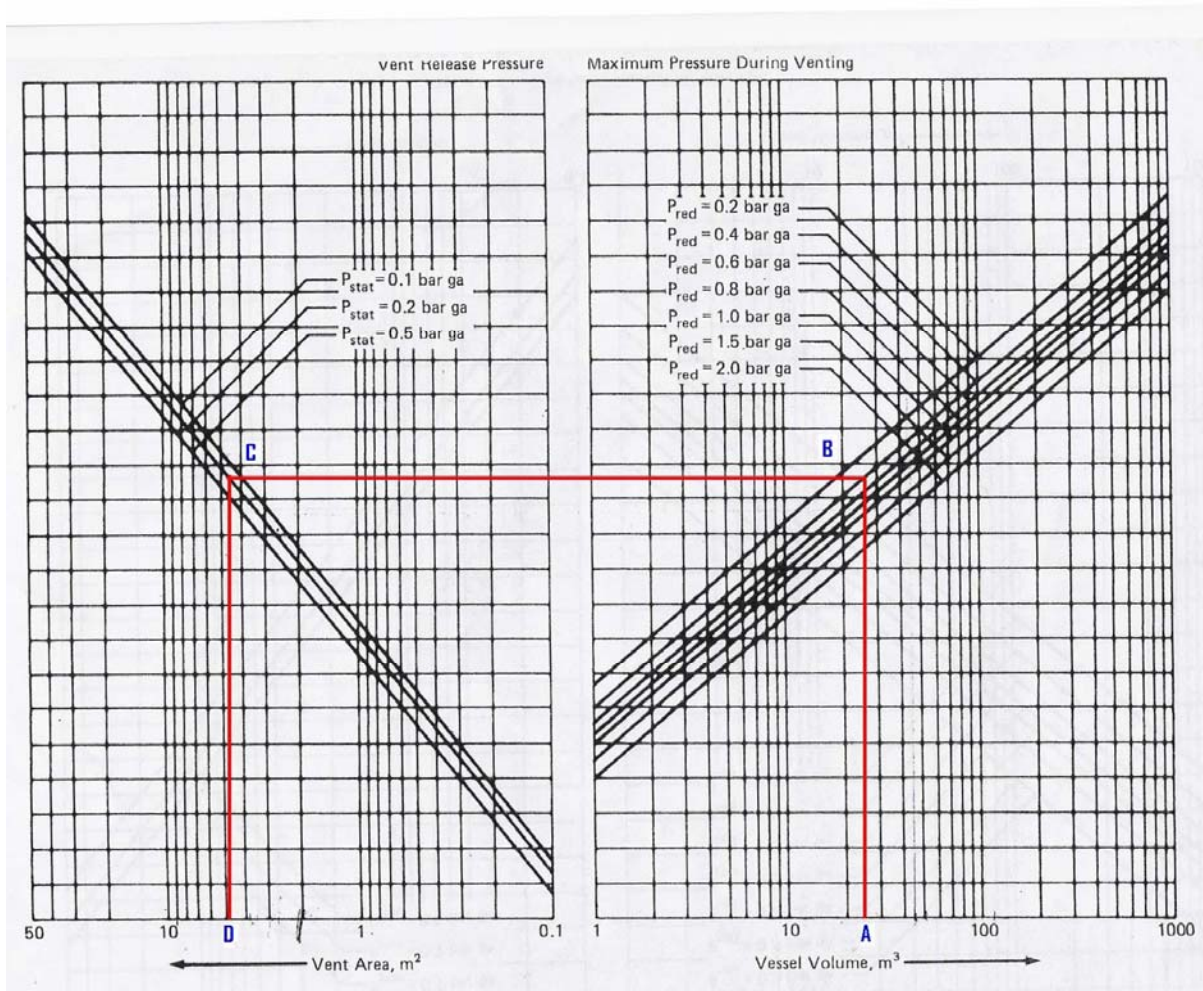
dove il significato delle varie grandezze è:

- $A_v$  area di venting minima necessaria perché la pressione interna, a seguito della deflagrazione non superi  $P_{\text{red}}$
- $A_s$  area della superficie interna del contenitore
- $P_{\text{red}}$  minima pressione di resistenza delle strutture importanti
- $C$  costante dipendente dal tipo di infiammabile in esame e più specificamente dalla sua  $(dP/dt)_{\max}$

Questo metodo semiempirico, come indicato in 4-3.3.2 della guida, è stato messo a punto attraverso i dati ricavati da incidenti reali e da campagne sperimentali, anche in presenza di turbolenza iniziale non nulla e di strutture interne che possano indurre turbolenza,

specificamente condotte per infiammabili con velocità di bruciamento laminari massime pari ad 1.3 volte quella del propano (46 cm/sec). Esso non può suggerire raccomandazioni riguardo a gas, quali l'idrogeno, caratterizzati da velocità di bruciamento laminari massime più elevate.

La seconda procedura di dimensionamento è per strutture con pressione di rottura  $P_{red}$  superiore a 0.1 bar. Essa riporta, per diversi infiammabili (metano, propano, coke ed idrogeno), dei nomografi a due piani cartesiani tra loro correlati (come quello di **Figura 1.1.1** per l'idrogeno).



**Fig. 1.1.1 - Esempio illustrativo di applicazione del nomografo NFPA68 per l'idrogeno**

Nel primo piano, quello di destra in figura, si riporta in ascisse il volume della struttura da proteggere e nel piano alcune rette per valori di  $P_{red}$  compresi tra 0.2 e 2 bar; nel secondo, quello di sinistra, si riportano alcune rette per valori di  $P_{stat}$  compresi tra 0.1 e

0.5 bar e sull'ascissa l'area di vent. Partendo dall'ascissa del volume scelto (punto A) si traccia una retta parallela all'asse delle ordinate fino ad intersecare la retta col  $P_{red}$  voluto (punto B). Da tale punto si traccia una retta parallela all'asse delle ascisse entrando nel secondo piano ed intersecando la retta col  $P_{stat}$  di interesse nel punto C. Dal punto C si traccia una retta parallela all'asse delle ordinate che interseca l'ascissa in un punto D, indicativo dell' area di vent necessaria per proteggere il volume selezionato con le corrispondenti  $P_{stat}$  e  $P_{red}$ .

La guida propone anche un'equazione sostitutiva ricavata semplicemente dai nomografi, senza alcuna base teorica e quindi non più precisa di questi ultimi, che è quella che noi abbiamo nel seguito usato per comodità e che qui riportiamo:

$$A_v = aV^b e^{cP_{stat}} P_{red}^d \quad A_v = aV^b e^{cP_{stat}} P_{red}^d$$

dove il significato delle varie grandezze è:

- a b c d costanti dipendenti dal tipo di gas
- V volume della struttura da proteggere
- e base del logaritmo naturale
- $P_{red}$  minima pressione di resistenza delle strutture importanti
- $P_{stat}$  pressione di rilascio del venting

La guida non fornisce altre indicazioni, oltre alla disposizione di non fare estrapolazioni all'esterno dei valori minimi e massimi indicati. Noi pensiamo che le tre  $P_{stat}$  indicate siano i valori effettivi che tale parametro assumeva per il vent usato nelle prove sperimentali eseguite e le  $P_{red}$  forniscano un involuppo superiore dei picchi di pressione raggiunti nelle varie prove sperimentali con i vari volumi ed  $A_v$  con i quali la guida è stata ricavata e che però non vengono meglio specificati. In 3-4.3 la guida giustifica il peso massimo per unità di superficie del vent usato, 2.5 lb/ft<sup>2</sup>, affermando che “l'esperienza ha mostrato che l'inerzia della chiusura del vent non è di solito importante se la chiusura pesa meno di 2.5 lb/ft<sup>2</sup> di area di vent libera”.

Per ulteriori dettagli nello specifico si rimanda alla guida stessa mentre qui si riportano le condizioni in cui sono state fatte le prove cui la guida fa riferimento e cioè: pressione e temperatura ambiente, turbolenza iniziale nulla ed assenza di strutture interne che possano promuovere la turbolenza, concentrazione degli infiammabili stechiometrica, peso della copertura del vent per unità di superficie ipotizzato da noi in 12.2 kg/m<sup>2</sup>. La

guida inoltre prevede la possibilità di estrapolare i dati ma facendo attenzione a non scendere mai sotto 0.1 bar per  $P_{red}$  e 0.05 bar per  $P_{stat}$ .

La guida afferma esplicitamente in “6-4 Use of the Nomographs with Hydrogen” che, nelle condizioni di prova, miscele aria-idrogeno hanno una significativa probabilità di detonare e questo fatto, secondo la guida, deve essere tenuto in considerazione ed investigato con test e consultazione con esperti dell’argomento poiché il sistema di venting in tale evenienza perde di significato.

Nella guida non sono ben definiti i riferimenti ai dati sperimentali ed in particolare la legge di scala usata per le variazioni del volume e quali e quanti recipienti, sia come forma che come dimensioni, siano stati usati; la guida pone anche l’accento sul fatto che in talune circostanze si è verificato un superamento delle pressioni previste anche proteggendo una struttura come essa raccomandava. Ciò in effetti mette in evidenza i principali limiti che si evincono nella guida: si può notare subito che accanto a delle assunzioni assolutamente conservative se ne fanno altre che non lo sono. Infatti si assume una deflagrazione stechiometrica in accordo col fatto che questa risulterà, a parità di altre condizioni, quella che genererà il massimo  $(dP/dt)_{max}$ . Tuttavia assumendo l’assenza di turbolenza iniziale e di strutture interne che possano promuoverla, si introduce un’ipotesi non conservativa, in quanto al crescere della turbolenza il  $(dP/dt)_{max}$  aumenta. Un altro punto da mettere in luce è che, basandosi la normativa su prove stechiometriche, essa è sostanzialmente troppo conservativa per gas, come l’idrogeno, (che, ad alte concentrazioni, hanno un’energia di ignizione estremamente bassa ed una significativa probabilità di detonare) e relativamente inapplicabile per strutture a bassa resistenza. Questo significa, in sostanza, la pretesa di proteggere le strutture da deflagrazioni estreme, in particolare per l’idrogeno, salvo poi far presente la possibilità che, anche a concentrazioni significativamente più basse, tale protezione potrebbe rivelarsi inefficace ed insufficiente consigliando di consultare un esperto sull’argomento.

In conclusione, ci appare più logico l’approccio presentato nel dimensionamento dei vent per strutture a bassa resistenza dove si è tenuto conto di una turbolenza iniziale non nulla e dell’eventuale presenza di strutture che possano indurre turbolenza a discapito della varietà dei gas con cui si può avere a che fare che è stata limitata ad i gas che hanno una velocità di bruciamento laminare minore di 59.8 cm/sec.

### 1.1.1 LA CRITICITA' DI APERTURA DELLO SFIATO

La criticità della variabile tempo nei sistemi di protezione tramite venting si evince dall'NFPA68 ma in tale normativa non ne sono messe chiaramente in luce le implicazioni. In effetti la guida in "3-4-3 Inertia of Vent Closure" prescrive l'applicabilità della stessa solo per chiusure del vent che hanno un peso per unità di superficie minore di  $2.5 \text{ lb/ft}^2$  ( $12.2 \text{ kg/m}^2$ ) sottolineando così come l'area di venting non si renda immediatamente disponibile al 100% per il deflusso dei gas ma sia caratterizzata dall'inerzia propria del dispositivo di posizionamento e rilascio del vent che riduce la sezione di passaggio disponibile durante la deflagrazione. Suggerisce dunque di utilizzare, per quanto possibile, vent liberi o con coperture meno pesanti possibili e con la  $P_{\text{stat}}$  minima possibile.

Il limite di  $2.5 \text{ lb/ft}^2$  non è, a parere di chi scrive, ben giustificato dalla normativa. Esso rappresenta il limite oltre il quale la guida non è più applicabile e al crescere dell'inerzia del sistema di vent cresce la  $P_{\text{max}}$  raggiunta durante la deflagrazione. Quindi tale limite dovrebbe essere un minorante del peso per unità di superficie del vent usato nelle prove sperimentali da cui si sono dedotti i nomografi dell'NFPA68.

## 1.1.2 II CODICE DEVENT

In questa breve descrizione del codice cui si fa riferimento in questa tesi si omette la descrizione dettagliata delle equazioni e del testo del codice rimandando per maggiori dettagli ad altri lavori al riguardo del DEVENT, primo fra tutti l'RL415(89) "DEVENT un codice per la valutazione dei transitori generati da deflagrazioni lente in ambienti parzialmente confinati" dei prof. Marco Carcassi e Fabio Fineschi, editrice ETS, fonte primaria per la stesura di questo breve lavoro.

Il DEVENT è un codice di calcolo teorico sviluppato in fortran77 negli anni '80, concepito allo scopo di predire transitori di pressione originati da deflagrazioni di gas in ambienti provvisti di sistemi di sfiato (venting). Richiede in input il tasso di bruciamento volumetrico.

Tale codice è già stato utilizzato per programmare altre campagne sperimentali.

Il codice completo, in realtà, è costituito da due parti, la prima fornita dall'utente, variabile a seconda della miscela combustibile e della geometria del contenitore ("pacchetto UTENTE"), l'altra fissa e incentrata sul modello termodinamico vero e proprio ("pacchetto DEVENT"). Per la risoluzione del sistema di equazioni differenziali, oggetto del modello matematico, viene utilizzato il "pacchetto LSODE" (Livermore Solver for Ordinary Differential Equations).

Il modello termodinamico si fonda sulle seguenti ipotesi:

- 1) Deflagrazione "debole" (velocità di fiamma piccola rispetto alla velocità del suono nel mezzo): i gradienti di pressione sono trascurati e la pressione è uniforme nell'ambiente ovvero a ciascun istante la combustione di ciascuna massa elementare avviene a pressione costante;
- 2) Trasformazioni adiabatiche;
- 3) Proprietà termodinamiche uniformi del gas all'interno di tutto il contenitore prima dell'innesco della combustione e in ciascuna delle due fasi, combusta ed incombusta, durante la deflagrazione;
- 4) Durante l'esplosione non c'è ingresso di gas nel contenitore;



L'aumento complessivo di 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 e 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 istante per istante al variare della pressione e della temperatura del gas incombusto.

Uno dei maggiori passi avanti del codice DEVENT rispetto ad altri codici dello stesso genere reperibili in letteratura consiste nella rimozione dell'ipotesi, tanto irrealistica quanto semplificativa della trattazione termodinamica, di isolamento termico e fisico di ogni singolo elemento di massa che, dopo la combustione, non subisce nessuno 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; il codice DEVENT considera invece il perfetto miscelamento, decisamente più realistico, anche in fase combusta.

L'analisi termodinamica si basa sui bilanci di massa ed energia nel gas incombusto, nella zona di fiamma e nel gas combusto; il bilancio della quantità di moto è implicito nell'assunzione dell'uniformità della pressione.

Altre ipotesi del codice DEVENT sono:

- a) Gas combusto ed incombusto ideali con calori specifici variabili con la temperatura secondo una funzione empirica
- b) Spessore della zona di fiamma trascurabile
- c) Combustione completa attraverso la fiamma (si suppone trascurabile la dissociazione dei prodotti di reazione, anche se presente ad una temperatura superiore a 1600°K);
- d) Pressione esterna costante

- e) Il sistema di vent è simulato come un rilascio di gas incombusto o combusto che inizia al di sopra di un prefissato valore di pressione e si arresta, se iniziato, al di sotto di un altro prefissato valore di pressione
- f) Non si tiene conto dell'effetto di diminuzione di efficienza del sistema di venting collegato alla sua inerzia

Il maggior limite del codice è che pretende di conoscere il tasso volumetrico di bruciamento (prodotto della velocità di fiamma per la superficie di fiamma) ad ogni valore del tempo.

Le variabili che influenzano il tasso volumetrico di bruciamento sono difficilmente analizzabili dal punto di vista quantitativo, quindi la conoscenza di questa grandezza critica ad ogni valore del tempo può essere anche molto approssimata; la correlazione che esprime la variazione del tasso volumetrico di bruciamento deve essere fornita dall'utente per esempio 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 della fiamma dipendente dalla geometria del sistema.

Per questo motivo il modello termodinamico di DEVENT risulta particolarmente interessante se utilizzato "all'inverso", cioè per stimare il tasso di bruciamento registrato in deflagrazioni reali confinate, di cui si conosca il transitorio di pressione nell'ambiente di confinamento.

Ricordiamo che il modello matematico alla base del codice di calcolo DEVENT descrive il transitorio di deflagrazione di una miscela di gas infiammabili in un recipiente ventato; lo scopo fondamentale è determinare la pressione massima ed il tempo in cui viene raggiunta. La flessibilità geometrica del codice è stata progettata per tener conto dell'evoluzione della superficie di fiamma nelle varie geometrie; l'andamento della pressione in seguito ad un'esplosione in un contenitore ventato dipende essenzialmente dalle proprietà della miscela di gas, dal tasso volumetrico di bruciamento, dall'area, dai tempi di apertura del vent.

### 1.1.2.1 POTENZIAMENTO DI DEVENT

Abbiamo introdotto un nuovo modulo che tenga in qualche modo conto dell'inerzia del sistema di venting (fattore molto influente come si evince dagli output del codice riportati in seguito) che ne causa una riduzione dell'efficienza appena si supera la sua pressione di apertura; l'NFPA68 mostra di tener conto di tale fenomeno dichiarando la sua inapplicabilità nel caso in cui si utilizzino vent la cui copertura ha una massa per unità di superficie superiore a  $2.5\text{lb/ft}^2$ : abbiamo interpretato questa affermazione come una dichiarazione del peso per unità di superficie della copertura del vent nelle prove sperimentali da cui la normativa è stata empiricamente ricavata.

Si è optato per il momento per un'apertura del vent progressivamente lineare in un determinato intervallo di tempo dal momento in cui si supera la pressione di rilascio e che impiega il detto intervallo prefissato per aprirlo completamente.

Si considererà che la combustione avvenga in un volume di geometria sferica equivalente a quello effettivo che, escludendo i fenomeni connessi con la turbolenza o con ignizioni molto energetiche, dovrebbe dare risultati conservativi in base alle assunzioni del modello.

Durante una breve fase di debugging del modello si è evidenziato che l'uso del modulo che implementava la correzione turbolenta alla velocità di bruciamento laminare portava a volte a degli errori di tempo di esecuzione o al crush del programma. Il principale limite del codice, a nostro avviso, risiede nell'integratore numerico di concezione antiquata e probabilmente ottimizzato per i computer dell'epoca in cui è stato concepito; l'arretratezza di tale componente porta ad una variazione significativa quando ci si avvicina al limite di infiammabilità inferiore e bisogna variare significativamente i parametri di integrazione per far convergere il processo.

Nelle esecuzioni di messa a punto del codice a basse concentrazioni di idrogeno, i risultati, a parità di tutte le altre condizioni di input e a seconda dei parametri di integrazione usati, presentano scostamenti massimi tra di loro significativi fino al fallimento dell'integrazione quando ci si avvicina troppo al limite di infiammabilità inferiore. Al crescere della concentrazione invece il comportamento matematico dell'integratore migliora sempre più, come si vedrà più avanti.

## 1.2 FILOSOFIA E LOGICA DEL LAVORO DI TESI

Il filo conduttore di questa tesi sarà quello di lavorare sul codice DEVENT in modo da renderlo utile ed efficace nella progettazione di sistemi di venting; si lavorerà in due direzioni, da una parte si confronterà il DEVENT con la normativa NFPA68, elaborandolo in modo da renderlo con essa congruente e dall'altra si cercherà di superare col codice, attraverso una campagna di prove sperimentali condotta con l'apparecchiatura CVE, quello che per noi è il principale limite della normativa quando si ha a che fare con l'idrogeno e cioè l'ipotesi di deflagrazione stechiometrica.

La guida ci appare troppo conservativa con l'assunzione della concentrazione stechiometrica; troppo oscura nel non rendere disponibili informazioni dettagliate sulle prove sperimentali condotte per metterla a punto (sarebbero necessarie almeno indicazioni riguardo ai volumi dei vari contenitori ed alle frazioni di venting usate). Ciò che, però, ci sembra più illogico e, in un certo senso, più pericoloso è il fatto che la guida, pretendendo di dimensionare sistemi di vent in grado di proteggere da deflagrazione stechiometriche contenitori che sicuramente non conterranno simili concentrazioni- che a parità di altre condizioni sono quelle che danno luogo ai massimi picchi di pressione - crea, secondo noi, una falsa illusione di sicurezza, salvo poi introdurre un fattore assolutamente non conservativo con l'ipotesi di turbolenza iniziale nulla ed assenza di strutture interne che possano indurre turbolenza, quando si sa che la turbolenza può accelerare la velocità di bruciamento aumentandola anche di un fattore cento.

Quindi riteniamo opportuno mettere a punto una metodologia di dimensionamento di sistemi di vent per proteggersi contro deflagrazioni di idrogeno a concentrazione più bassa dello stechiometrico tenendo conto di un minimo di turbolenza col DEVENT: è inutile cercare di proteggersi onerosamente da qualcosa che siamo sicuri che non si verifichi (la stechiometricità), sapendo di avere, invece, una probabilità non trascurabile che si registri, per la turbolenza elevata, se non una detonazione, una deflagrazione veloce.

Riepilogando pensiamo che sia più opportuno e logico, almeno per l'idrogeno, puntare a ridurre le concentrazioni di idrogeno a cui può avvenire la deflagrazione, per poi

proteggere efficacemente la struttura con il venting contro queste deflagrazioni. Infatti, esse

- 1) hanno molte più probabilità di avvenire di una deflagrazione stechiometrica poiché per l'energia di ignizione estremamente bassa che caratterizza l'idrogeno è altamente improbabile che quest'ultimo raggiunga lo stechiometrico prima che si avvii un fenomeno di combustione
- 2) più difficilmente presenteranno fenomeni di DDT

È possibile introdurre appropriati sistemi di protezione e/o seguire procedure adatte che garantiscano con un buon margine di sicurezza di non raggiungere la concentrazione stechiometrica (es: dimensionamento degli ambienti di stoccaggio in modo da non poter superare una certa concentrazione, uso di ignitori, ricombinatori, ecc.), ma, anzi, di tenerla al di sotto del 12%, in modo che anche eventuali forti turbolenze rendano praticamente irrealizzabile la transizione alla detonazione, come riportato da una sterminata letteratura e come verificato dalla ventennale attività di ricerca del DIMNP.

Per questi motivi, tale concentrazione è stata presa a riferimento come concentrazione massima anche per le nostre prove sperimentali.

Il nostro analizzatore di concentrazione di idrogeno, che si è rivelato lo strumento più accurato ed affidabile tra quelli usati per valutare la concentrazione, era progettato per funzionare nel campo 0-10% vol; tuttavia è stato possibile ricalibrarlo nel campo 0-15% vol con ottimi risultati, avendo verificato che i punti al 5% ed al 10% vengono riportati con notevole precisione (le tre bombole di calibrazione disponibili sono appunto al 5.03, 9.98 ,15.03) e la calibrazione si conserva senza problemi per tempi dell'ordine della settimana. Un limite superiore alle deflagrazioni effettuabili era poi quello dettato dalla necessità di non mettere a rischio l'apparecchiatura e di non rischiare l'apertura del vent di sicurezza, cosa che avrebbe bloccato la campagna di prove per un tempo significativo. Dalle prove della serie Cr si è stabilito empiricamente che è opportuno, in relazione a tali considerazioni, evitare di superare il 12.5% vol H<sub>2</sub> con A<sub>v</sub> minore o uguale di 0.35 m<sup>2</sup>; sempre in tali prove ci siamo resi conto che siamo in grado di raggiungere una concentrazione obiettivo dell'ordine del 10%vol con uno scarto nell'ordine dello 0.5%vol senza particolari difficoltà e con una buona ripetibilità.

Non è riportato dalla guida quanti fossero i contenitori con i quali sono state fatte le prove utilizzate per la messa a punto della guida né il loro volume o le frazioni di venting usate; tuttavia la logica e l'economia ci spingono a pensare che non siano stati, almeno nelle prove con l'idrogeno, né di troppi volumi diversi né troppo grandi poiché avere dei contenitori che resistano a delle deflagrazioni stechiometriche di tale gas ha un costo notevole in particolare quando le dimensioni crescono. Riteniamo quindi che i dati della guida non siano troppo "fitti" e questo ci fa pensare all'opportunità di basarsi su un codice di calcolo teorico, come il DEVENT, per ottenere un'opportuna legge di scala al variare dei parametri che influenzano il fenomeno. Ciò non traspare dai nomografi né dalla formula di interpolazione riportate nella guida per le strutture ad alta resistenza.

Un altro fenomeno che si potrà osservare effettuando il confronto precedentemente indicato, sarà la turbolenza che viene indotta nel contenitore dalla rottura stessa del vent. Tale turbolenza si manifesterà con una mancanza di conservatività del DEVENT rispetto alle rilevanze sperimentali della guida, quando questo fenomeno porti a velocità di bruciamento turbolente che superino in magnitudo le varie assunzioni conservative che si fanno nel DEVENT. Quando ci si trovi in campi di variazione dei diversi parametri in cui la guida non ha effettuato sperimentazioni potrebbe accadere invece l'opposto.

Si potrà utilizzare come fattore di sicurezza nel DEVENT una velocità di bruciamento turbolenta maggiore di quella che porta alla congruenza con i dati sperimentali per tenere in qualche modo in conto eventuali fenomeni di turbolenza iniziale in modo più logico e razionale rispetto ad un semplice fattore di ignoranza utilizzato eventualmente come moltiplicatore dell'area di vent prevista.

In sintesi questo confronto e la successiva messa a punto del DEVENT permetterà di utilizzare quest'ultimo per dimensionare i sistemi di venting in modo più accurato ma ancora congruente con la normativa utilizzando le leggi di scala generate dal codice stesso per poter eventualmente superare i limiti di estrapolabilità della guida e bypassare eventuali lacune nei dati su cui questa si basa che si rendessero evidenti dal confronto. Può accadere di trovarsi ad esempio di fronte a condizioni contigue nelle quali il DEVENT si mostri non conservativo tra cui vi sia poi una condizione intermedia che lo renda conservativo rispetto alla guida. Ciò può significare che le assunzioni del DEVENT sono sufficienti a renderlo conservativo con quel set di parametri oppure che ci si trovi in

un intervallo di variazione dei parametri coinvolti in cui potrebbe esserci una lacuna sperimentale della guida; sembra opportuno quindi affidarsi alle previsioni del DEVENT anziché alla guida laddove quest'ultimo risulti conservativo.

Abbiamo già sottolineato come l'assunzione di deflagrazione stechiometrica fornisca un'illusione di sicurezza che viene però compromessa dall'ipotesi di assenza di turbolenza iniziale e strutture interne che possano promuoverla. In sostanza la guida fornisce un dimensionamento che, volendo essere troppo conservativo, finisce per non poter essere garantito.

Quando si afferma che la guida è troppo conservativa non si intende dire che è opportuno, in assoluto, ridurre l'area di vent che essa propone poiché il problema della turbolenza, su cui non si ha un buon margine di confidenza, deve spingere ad utilizzare sempre la massima area di vent consentita dagli altri vincoli economici o tecnici. Piuttosto si intende che è opportuno ed onesto rendersi conto in fase di progettazione che se è vero che il dimensionamento fornito dalla guida protegge da una deflagrazione stechiometrica a turbolenza iniziale nulla è anche vero che esso protegge realisticamente da una deflagrazione a turbolenza non nulla di concentrazione notevolmente più bassa.

È dunque opportuno, se dettato dall'importanza della struttura da proteggere, mettere in campo altri sistemi di protezione -siano essi ignitori, riduzione dell'inventario presente sul sito, sistemi di ricambio forzato dell'atmosfera ecc.- per evitare di raggiungere la concentrazione stechiometrica avendo un discreto margine di sicurezza riguardo alla turbolenza su una deflagrazione che avvenga ad una concentrazione più bassa di quest'ultima. Tutto ciò cambia in sostanza non il dimensionamento dell'area di venting che deve essere, come sopra detto, sempre la maggiore possibile compatibilmente con i vincoli di natura tecnica ed economica, ma il suo significato. L'area di vent non deve più proteggere la struttura da una deflagrazione stechiometrica "ideale" ma può proteggerla da una deflagrazione a concentrazione più bassa "realistica" e si deve stimare quanto più accuratamente possibile tale concentrazione per poter mettere in gioco se ritenuto opportuno, come si diceva precedentemente, altri meccanismi e strumenti di protezione in relazione all'importanza della struttura.

Quando si ha poi a che fare con strutture a bassa resistenza, come per esempio edifici civili, perde sicuramente significato affermare che si sta provando a proteggere quella

struttura da una deflagrazione stechiometrica. Invece ha ancora un senso fornire indicazioni circa la minima area aperta che è opportuno lasciare per avere un certo margine di sicurezza su una deflagrazione a bassa concentrazione, valutando accuratamente tale concentrazione e tentare di ridurre eventualmente la probabilità di superarla. Come prima messo in luce, la guida propone il dimensionamento dell'area di vent per strutture a bassa resistenza solo per gas con velocità di bruciamento laminari minori di 59.8 cm/sec.

Per meglio illustrare il concetto dell'inapplicabilità della guida per le strutture a bassa resistenza (cosa accennata tra l'altro nel paragrafo 4-3-3-2) facciamo un esempio di una ipotetica cucina a metano di dimensioni realistiche pari a 3.5\*3m e di altezza pari a 2.4 m (dimensioni assimilabili a quelle tipiche di una cucina di un appartamento moderno, che si avvicinano molto a quelle della CVE):

$$L := 3.5 \quad P := 3 \quad H := 2.4$$

$$V := L \cdot P \cdot H \quad V = 25.2$$

$$A_s := L \cdot P \cdot 2 + (L + P) \cdot 2 \cdot H$$

$$C_{CH_4} := 0.37 \quad \text{kPa} \quad P_{red} := 3.45 \quad \text{kPa}$$

$$A_v := \frac{C_{CH_4} \cdot A_s}{P_{red}^{\frac{1}{2}}} \quad A_v = 10.398$$

Se invece fosse una “cucina ad idrogeno” ci troveremmo in un “buco” della normativa in quanto tale struttura non rientrerebbe nei dimensionamenti secondo la metodologia per strutture ad alta resistenza poiché la normativa indica il limite di estrapolabilità inferiore di  $P_{red}$  in 0.1 bar pari a 10 kPa e non si potrebbe dimensionare secondo la metodologia per strutture a bassa resistenza poiché l'idrogeno è un gas con velocità di bruciamento laminare pari a 312 cm/sec ben al di sopra dei 59.8 cm/sec che sono il limite superiore dei gas previsti da tale metodologia. Possiamo comunque affermare che l'area di vent necessaria sarebbe molto maggiore di quella prevista per il metano.



Una cucina con balcone presenterà tipicamente due aperture, una porta interna (0.8\*2.15m) ed una porta a doppia anta sul balcone (1.6\*2.15 m) che forniranno complessivamente un'area di vent massima di 5.16 m<sup>2</sup>(senza tener conto che si potrà considerare area di vent probabilmente la sola parte in vetro), molto minore di quella necessaria secondo l'NFPA68. Sarebbe invero molto difficile raggiungere le aree di vent suggerite dalla guida soddisfacendo nel contempo le esigenze abitative di una cucina.

Col DEVENT, opportunamente corretto con un fattore di correzione di turbolenza empirico, si potrebbe invece vedere in queste condizioni quale sia la concentrazione la cui deflagrazione potrebbe essere realisticamente sopportata da tale struttura e cercare dei sistemi per ridurre la probabilità di deflagrazioni a concentrazione più alta di quest'ultima.

In conclusione relativamente al secondo punto per tutti i ragionamenti sopra fatti si cercherà di effettuare una campagna di prove sperimentali in condizioni realistiche allo scopo di mettere a punto il DEVENT in modo da poterlo utilizzare, non solo come si diceva in precedenza per effettuare dei dimensionamenti più accurati ma ancora congruenti con la guida, ma anche per effettuare dimensionamenti accurati dell'area di venting per proteggersi da deflagrazioni di idrogeno "realistiche" a concentrazioni più basse dello stechiometrico.

Abbiamo in precedenza descritto il codice DEVENT e messo in luce come uno dei suoi principali limiti consista nel fatto che esso necessita della conoscenza, istante per istante, del tasso di bruciamento che può essere fornito attraverso la definizione della velocità di bruciamento. In esso è implementato il calcolo della velocità di bruciamento laminare secondo la relazione di Liu e MacFarlane ed un modulo di incremento della stessa per ottenere una velocità di bruciamento turbolenta secondo una relazione binomia con un fattore di proporzionalità a quella laminare ed un fattore di proporzionalità ad una potenza della frazione di volume bruciato. L'operazione che si compirà sarà quella di confrontare il risultato fornito dal DEVENT con quello analogo sperimentale, sia esso derivato dalla guida o dalle prove sulla CVE e, ove il risultato del codice risulti non conservativo, far crescere progressivamente il fattore di proporzionalità (inizialmente uguale ad uno essendo fissato a zero l'altro fattore della formula binomia) tra la velocità di bruciamento turbolenta e quella laminare fino ad ottenere dal codice un risultato

conservativo. Fatto ciò ci si potrà avvalere del pacchetto termodinamico del DEVENT come generatore della legge di scala per prevedere approssimativamente, con l'opportuno fattore di correzione turbolenta di derivazione sperimentale, il valore del picco di pressione massimo atteso quando ci si trovi all'interno dei campi di variabilità dei diversi parametri testati ed ipotizzarlo quando i nostri parametri escano dagli intervalli testati tenendo presente in tali casi l'incertezza del fattore di correzione turbolenta.

Sottolineiamo come il principale fenomeno da cui deriva la non conservatività del DEVENT in questi confronti sarà la turbolenza indotta dallo sfiato, che dipenderà dalla geometria e volume del contenitore e dalla frazione di vent usata, di cui esso non tiene conto e che invece influenza naturalmente le misure sperimentali. Questo sarà assolutamente vero nel confronto con la guida per le assunzioni che essa fa, e relativamente vero per il confronto con i dati sperimentali ricavati dalla CVE dove in verità la turbolenza iniziale non sarà nulla e vi sarà almeno la scatola del ventilatore che può indurre turbolenza, altri fattori di cui il DEVENT non tiene conto.

Il grosso neo che presenta tale approccio e che obbligherà a fare diverse ipotesi che si ritengono realistiche ma che sono comunque fonte di notevole incertezza è che sarà necessario stimare alcuni parametri necessari al codice DEVENT.

Per quanto riguarda il confronto con l'NFPA68 la guida parametrizza l'inerzia del venting in forma di massimo peso per unità di volume consentito al vent che si dovrà tradurre nella corrispondente variabile del DEVENT che è il  $t_{open}^{(V)}$  cioè il tempo impiegato dal vent per aprirsi completamente una volta che sia stata superata la corrispondente  $P_{stat}$  all'interno della struttura. Si sottolinea qui come questo fattore sia da una parte molto influente -rendendo in pratica inefficaci eventuali vent "grossi" ma "lenti" che durante tutta la deflagrazione potrebbero fornire un'area libera per lo sfiato molto minore di quella massima risultando agli effetti pratici più "piccoli"- e dall'altro di difficile stima. Si sarebbe potuto implementare un modulo che stimasse in qualche modo la forza motrice presente come differenza di pressione per accelerare il vent, ma tutto ciò sarebbe stato piuttosto complesso a livello numerico e sarebbe comunque risultato altamente irrealistico essendo i tipici sistemi di chiusura del vent sistemi attivi a molla di rilascio, a rilascio magnetico ecc. che non si basano sulla pura differenza di pressione per sbalzare il vent. In una struttura civile il vent sarà invece tipicamente rappresentato da

porte e finestre le cui superfici di vetro fungeranno da dispositivo di chiusura caratterizzate dalla rottura fragile più che dall'inerzia meccanica a spostarsi e quindi ben parametrizzabili con un tempo necessario alla rottura. Quindi si è ritenuto più utile dotare il DEVENT di un parametro temporale puro da stimare od ipotizzare fermo restando che una sua sovrastima ci metterà sempre in condizioni di sicurezza. Lo stesso problema si ripresenterà ingigantito dal fatto che in questo caso è necessario stimare anche  $P_{stat}$ , quando si effettuerà il confronto del codice con le prove sperimentali: qui saranno di ausilio i filmati che si effettueranno durante le prove che permetteranno di stimare se non il valore preciso, almeno un ordine di grandezza conservativo di  $P_{stat}$  e  $t_{open}^{(v)}$ .

Riassumendo la logica che si seguirà per confrontare l'NFPA68 ed il DEVENT sarà la seguente: si selezioneranno un certo numero di insiemi di dati dal nomografo dell'NFPA68 relativo all'idrogeno a diversi volumi tra 1-100 m<sup>3</sup> e parametrizzati su  $P_{stat}$  e  $P_{red}$ . Per comodità di lettura si utilizzerà nelle nostre valutazioni la relazione che approssima i nomografi fornita dalla guida salvo verificare la capacità della formula di interpolare il nomografo confrontando per qualche punto i due valori forniti dalla guida; successivamente si confronterà la  $P_{red}$  che -per come è concepita la normativa di derivazione sperimentale- è la minima resistenza richiesta ad una struttura nelle corrispondenti condizioni di prova (volume,  $A_v$ ,  $P_{stat}$ , concentrazione stechiometrica, inerzia del venting) con i file di uscita del DEVENT che utilizzano gli stessi input, a meno di  $t_{open}^{(v)}$ , che è la variabile di DEVENT corrispondente all'inerzia del sistema di venting, per la quale si ipotizzerà un valore realistico crescente con il volume in accordo con la realistica ipotesi che a parità di altre condizioni  $A_v$  crescerà col volume e così pure il tempo che il sistema di copertura del vent impiega per essere rimosso completamente. Si verificherà lo scarto che esiste tra la previsione teorica del DEVENT ed il massimante delle rilevanze sperimentali presentato dall'NFPA68 come  $P_{red}$ . Il passo successivo sarà quello di far crescere progressivamente il coefficiente di correzione turbolenta del DEVENT in ogni condizione in cui esso abbia fornito un risultato non conservativo rispetto all'NFPA68 (quando cioè  $P_{devent} < P_{redNFPA68}$ ), ottenendo i fattori di correzione che portano i risultati del DEVENT alla congruenza con quelli della normativa, restando però in tutti i casi conservativi. Otterremo così una serie di coefficienti di correzione turbolenta per il DEVENT che -al variare di  $P_{stat}$ , del volume e di  $A_v$ - potremo utilizzare

per un eventuale dimensionamento nelle condizioni confrontate ottenendo risultati progettuali congruenti con la normativa ed in ogni caso conservativi. Questi fattori di correzione permetteranno in sostanza al DEVENT di tener conto di quei fenomeni di turbolenza intimamente connessi con il fenomeno della deflagrazione ventata di cui esso non può tener conto utilizzando la sola velocità di bruciamento laminare. Si potrà poi incrementare eventualmente tali fattori di correzione per tenere in qualche modo in conto di una eventuale turbolenza iniziale non nulla o della presenza di strutture che possano promuovere la turbolenza che non sono presenti per ipotesi nei dati sperimentali cui la guida fa riferimento.

Per quanto riguarda la campagna di prove essa verrà condotta in condizioni ambientali che possono essere ritenute realistiche e rappresentative di una varietà di situazioni differenti. Si effettueranno infatti prove in condizioni di forte insolazione e notturne tra i mesi di luglio ed agosto, con ventilatore acceso fino a pochi secondi prima della deflagrazione nell'ambiente della CVE rappresentativo di una tipica cucina di volume approssimativamente pari a  $25 \text{ m}^3$  ( $L*P*H = 2.752*3.232*2.814$ ,  $A_s=50.5 \text{ m}^2$ ), forma pressoché cubica e frazione di venting compresa approssimativamente tra 0.007 e 0.04.

La turbolenza nell'ambiente sarà sicuramente significativa ma non potendo riportare dati che ne forniscano una qualche misura quantitativa, si procederà considerandola nulla ottenendo così dati sicuramente conservativi per la concentrazione voluta in assenza di turbolenza iniziale; sarà interessante, tra l'altro, vedere il margine di sicurezza che ci sarà –a parità di altre condizioni- tra la previsione ottenuta in condizioni stechiometriche e turbolenza nulla dell'NFPA68 ed il picco di pressione che otterremo nelle nostre condizioni sperimentali realistiche a concentrazione di idrogeno più bassa.

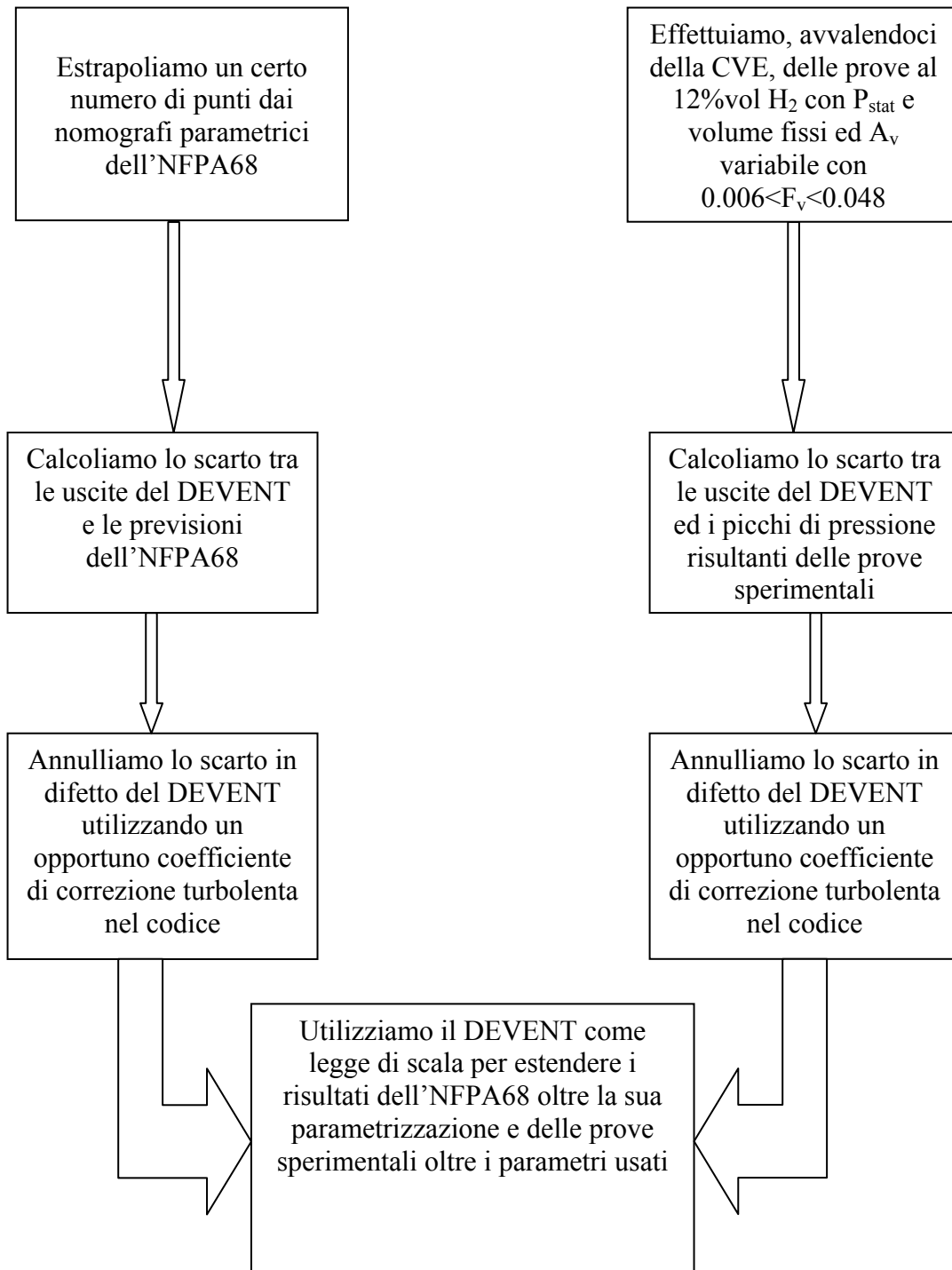
I risultati che si otterranno saranno poi utilizzati in modo analogo a quelli estrapolati dall'NFPA68 verificando come e se variano i coefficienti di correzione turbolenta del DEVENT per una concentrazione più bassa dello stechiometrico e di nuovo ottenere un'insieme di fattori correttivi che permettano il dimensionamento dei venting di sicurezza con le correzioni ottenute da questo confronto sperimentale per la concentrazione scelta: a questo punto si potranno effettuare dei dimensionamenti conservativi –utilizzando eventualmente come ulteriore fattore di sicurezza un aumento del necessario fattore di correzione turbolenta calcolato- alla concentrazione sperimentata

per l'idrogeno per il quale la normativa è, come detto in precedenza, di difficile applicazione, garantendosi un buon margine di sicurezza fino ad una deflagrazione della succitata concentrazione a meno di fenomeni connessi con la turbolenza particolarmente intensi, dei quali tra l'altro neppure l'NFPA68 tiene conto.

Anche qui possiamo interpretare il senso fisico dei fattori di correzione turbolenta introdotti: essi permetteranno di tener conto della turbolenza iniziale e di quella indotta dalla deflagrazione ventata insite nelle misure sperimentali di cui il DEVENT non tiene conto utilizzando la sola velocità di bruciamento laminare. Anche qui si potrà poi incrementare eventualmente tali fattori di correzione per tenere in qualche modo in conto di una eventuale turbolenza iniziale superiore e della presenza di strutture che possano promuovere la turbolenza.

Dopo aver fatto tutto ciò il DEVENT, semplice codice di calcolo implementabile anche su calcolatrici programmabili, potrà essere utilizzato come strumento di progettazione in ausilio all'NFPA68 nelle condizioni di validità ed estrapolabilità dei dati di quest'ultima e di ipotesi di progetto all'esterno di tali campi. Risulterà inoltre particolarmente utile per l'idrogeno consentendo di dimensionare sistemi di vent per la concentrazione scelta inferiore a quella stechiometrica prevista dall'NFPA68 che può risultare in taluni casi estremamente onerosa (addirittura inapplicabile per strutture a bassa resistenza).

Visualizziamo meglio il nostro modo di procedere avvalendoci di un diagramma a blocchi:



**Fig. 1.2.1 Diagramma a blocchi esplicativo della metodologia che si intende seguire**

### 1.3 CONFRONTO TRA IL DEVENT E L'NFPA68

Si vuole verificare la possibilità di congruenza del codice DEVENT nei confronti del NFPA68. Si farà girare il codice nelle condizioni riportate nei nomografi della normativa per il gas H<sub>2</sub> in modo da verificare la possibilità di poter ottenere, con un uso accorto del DEVENT, le stesse risultanze di derivazione sperimentale dell'NFPA68. La concentrazione sarà impostata allo stechiometrico (29.6%VOI). Si faranno variare A<sub>v</sub>, P<sub>stat</sub>, il volume della camera e si otterranno i massimanti di P<sub>red</sub> in uscita come massima pressione prevista dal codice con velocità di bruciamento laminare. Se ne confronterà il valore con la P<sub>red</sub> letta nelle medesime condizioni dal NFPA68. Si cercherà di ottenere poi, in una seconda fase, la congruenza tra i due introducendo nel DEVENT il fattore di correzione di velocità di bruciamento turbolenta opportuno.

Le condizioni di input del codice e la massima pressione risultante si riportano nelle tabelle seguenti, come indicato nelle legenda.

Da sottolineare la notevole influenza che ha l'inerzia del vent sul valore del picco nel codice DEVENT. Per esempio nella prima condizione della tabella 1 con il tempo di apertura del venting settato al valore zero il picco risulta essere di soli 111.46 kPa assoluti mentre con tempo di apertura settato per esempio a 0.1 secondo risulta essere di 157.6 kPa assoluti. Ciò si spiega facilmente considerando che nel caso di vent "pesanti", cioè "lenti" ad aprirsi, non tutta l'area massima risulta disponibile per l'efflusso del gas durante la deflagrazione: si ipotizza che l'NFPA 68 faccia uso di vent con inerzia pari a 2.5lb/ft<sup>2</sup>, per avere un confronto accurato si dovrebbe avere una stima della tempistica di apertura associata a tale specifico vent che non è nota per cui si ipotizzeranno dei tempi ritenuti realistici e tenendo presente che, a parità di altre condizioni, al crescere del volume dell'apparecchiatura cresceranno le dimensioni del vent sarà incrementato il tempo che questo impiega per aprirsi. Avendo un più realistico tempo di apertura si potrebbe ripetere il tutto trovando delle correzioni turbolente lievemente diverse e più accurate.

Per poter eseguire dei calcoli attendibili dobbiamo dunque tener presente la tempistica di apertura del vent che si assume in 0.01 secondi per il volume di 1 m<sup>3</sup> e crescente al crescere del volume come sarà indicato nelle legenda delle singole tabelle.

Si evidenzia ancora il fatto che il significato di P<sub>red</sub> dell'NFPA68 è che con il corrispondente P<sub>stat</sub> ed inerzia del sistema di venting inferiore a 2.5 lb/ft<sup>2</sup>(12.2 Kg/m<sup>2</sup>), concentrazione stechiometrica e volume corrispondenti si sono svolte delle prove sperimentali durante le quali la pressione non ha mai superato il valore di P<sub>red</sub>. Perché il DEVENT risulti congruente conservativamente è necessario che con la correzione di velocità di bruciamento turbolenta esso fornisca dei valori di P che approssimino P<sub>red</sub> ma risultino ad esso superiore.

Dopo aver confrontato i risultati del DEVENT con i nomografi NFPA68 di derivazione sperimentale ed essendo fissati i parametri che rendono il DEVENT conservativo in tali condizioni si potrebbe, volendo, utilizzare quest'ultimo anziché l'NFPA68 in fase di dimensionamento delle aree di vent.

**Tabella 1.3.1: previsioni di P<sub>max</sub> DEVENT con P<sub>redNFPA68</sub>=0.2,0.6,1,1.5,2 bar e scarto fra i due per un recipiente di 1 m<sup>3</sup>, P<sub>stat</sub>=0.1,0.2,0.5 bar; t<sup>(V)</sup><sub>open</sub> 0.01 sec**

Volume	P <sub>stat</sub>	A <sub>v</sub>	P <sub>redNFPA68</sub>	P <sub>maxDevent</sub>	Scarto
1	0.1	0.566	0.2	0.11465	0.08535
1	0.1	0.368	0.6	0.12225	0.47775
1	0.1	0.301	1	0.12965	0.87035
1	0.1	0.257	1.5	0.16825	1.33175
1	0.1	0.229	2	0.21635	1.78365
1	0.2	0.397	0.6	0.23625	0.36375
1	0.2	0.324	1	0.24415	0.75585
1	0.2	0.277	1.5	0.25085	1.24915
1	0.2	0.247	2	0.25705	1.74295
1	0.5	0.497	0.6	0.57185	0.02815
1	0.5	0.407	1	0.58695	0.41305
1	0.5	0.347	1.5	0.60495	0.89505
1	0.5	0.310	2	0.62085	1.37915



**Tabella 1.3.2: previsioni di  $P_{\max}$  DEVENT con  $P_{\text{redNFPA68}}=0.2,0.6,1,1.5,2$  bar e scarto fra i due per un recipiente di  $25.043 \text{ m}^3$ ,  $P_{\text{stat}}=0.1,0.2,0.5$  bar;  $t_{\text{open}}^{(V)} 0.13$  sec**

<b>Volume</b>	<b><math>P_{\text{stat}}</math></b>	<b><math>A_v</math></b>	<b><math>P_{\text{redNFPA68}}</math></b>	<b><math>P_{\text{maxDevent}}</math></b>	<b>Scarto</b>
25.043	0.1	5.236	0.2	0.16465	0.03535
25.043	0.1	3.459	0.6	0.23855	0.36145
25.043	0.1	2.830	1	0.34025	0.65975
25.043	0.1	2.413	1.5	0.43895	1.06105
25.043	0.1	2.155	2	0.56045	1.43955
25.043	0.2	3.730	0.6	0.41875	0.18125
25.043	0.2	3.051	1	0.56705	0.43295
25.043	0.2	2.602	1.5	0.71355	0.78645
25.043	0.2	2.324	2	0.84555	1.15445
25.043	0.5	4.678	0.6	0.95085	-0.35085
25.043	0.5	3.827	1	1.14855	-0.14855
25.043	0.5	3.263	1.5	1.35835	0.14165
25.043	0.5	2.915	2	1.53065	0.46935

**Tabella 1.3.3: previsioni di  $P_{\max}$  DEVENT con  $P_{\text{redNFPA68}}=0.2,0.6,1,2$  bar e scarto fra i due per un recipiente di  $100 \text{ m}^3$ ,  $P_{\text{stat}}=0.1,0.2,0.5$  bar;  $t_{\text{open}}^{(V)} 0.26$  sec**

<b>Volume</b>	<b><math>P_{\text{stat}}</math></b>	<b><math>A_v</math></b>	<b><math>P_{\text{redNFPA68}}</math></b>	<b><math>P_{\text{maxDevent}}</math></b>	<b>Scarto</b>
100	0.1	12.974	0.2	0.20065	-0.00065
100	0.1	6.893	1	0.54855	0.45145
100	0.1	5.249	2	0.90225	1.09775
100	0.2	9.086	0.6	0.62715	-0.02715
100	0.2	7.433	1	0.84605	0.15395
100	0.2	5.661	2	1.29715	0.70285
100	0.5	11.396	0.6	1.22675	-0.62675
100	0.5	9.323	1	1.52845	-0.52845
100	0.5	7.1	2	2.00515	-0.00515

Per tentativi successivi dalle precedenti tabelle se ne ricavano delle altre in cui si utilizza l'opportuna correzione turbolenta per ottenere la congruenza tra le previsioni del DEVENT e quelle del NFPA68; dove lo scarto è negativo le previsioni del DEVENT sono già conservative per cui non si introducono correzioni; alla fine di ciò si potrà definire una tabella dove si riporterà la correzione turbolenta necessaria per essere conservativi in relazione al volume a  $P_{\text{stat}}$  ed alla superficie di venting.

È da sottolineare comunque che questo è solo un calcolo esemplificativo essendo ogni risultato altamente influenzato dalla  $t_{\text{open}}^{(V)}$  cui si è dato un valore senza dubbio realistico, ma sicuramente affetto da una notevole incertezza.

**Tabella 1.3.4:  $t_{\text{open}}^{(V)}$  0.01; revisione della tabella 1.3.1 con la correzione turbolenta per ottenere la congruenza tra i risultati del DEVENT ed il dimensionamento secondo la guida NFPA68**

<b>Volume</b>	<b>P<sub>stat</sub></b>	<b>A<sub>v</sub></b>	<b>P<sub>redNFPA68</sub></b>	<b>P<sub>maxDevent</sub></b>	<b>Scarto</b>	<b>Corr.turb.</b>
1	0.1	0.566	0.2	0.20835	-0.00835	2.3
1	0.1	0.368	0.6	0.61665	-0.01665	2.45
1	0.1	0.301	1	1.04565	-0.4565	2.65
1	0.1	0.257	1.5	1.55185	-0.05185	2.75
1	0.1	0.229	2	2.02995	-0.02995	2.95
1	0.2	0.397	0.6	0.61385	-0.01385	2.20
1	0.2	0.324	1	1.01775	-0.01775	2.32
1	0.2	0.277	1.5	1.50515	-0.00515	2.50
1	0.2	0.247	2	2.04465	-0.04465	2.75
1	0.5	0.497	0.6	0.60125	-0.00125	1.17
1	0.5	0.407	1	1.00725	-0.00725	1.86
1	0.5	0.347	1.5	1.53165	-0.03165	2.06
1	0.5	0.310	2	2.01625	0.01625	2.30

**Tabella 1.3.5:  $t_{open}^{(V)}$  0.13; revisione della tabella 1.3.2 con la correzione turbolenta per ottenere la congruenza tra i risultati del DEVENT ed il dimensionamento secondo la guida NFPA68**

<b>Volume</b>	<b>P<sub>stat</sub></b>	<b>A<sub>v</sub></b>	<b>P<sub>redNFPA68</sub></b>	<b>P<sub>maxDevent</sub></b>	<b>Scarto</b>	<b>Corr.turb.</b>
25.043	0.1	5.236	0.2	0.20555	-0.00555	1.20
25.043	0.1	3.459	0.6	0.61535	-0.01535	1.30
25.043	0.1	2.830	1	1.02115	-0.02115	1.41
25.043	0.1	2.413	1.5	1.50195	-0.00195	1.50
25.043	0.1	2.155	2	2.05635	-0.05635	1.58
25.043	0.2	3.730	0.6	0.60165	-0.00165	1.13
25.043	0.2	3.051	1	1.00195	-0.00195	1.21
25.043	0.2	2.602	1.5	1.52675	-0.02675	1.30
25.043	0.2	2.324	2	2.01695	-0.01695	1.41
25.043	0.5	4.678	0.6	0.95085	-0.35085	1
25.043	0.5	3.827	1	1.14855	-0.14855	1
25.043	0.5	3.263	1.5	1.50755	-0.00755	1.04
25.043	0.5	2.915	2	2.04085	-0.04085	1.15

**Tabella 1.3.6:  $t_{open}^{(V)}$  0.26; revisione della tabella 1.3.3 con la correzione turbolenta per ottenere la congruenza tra i risultati del DEVENT ed il dimensionamento secondo la guida NFPA68**

<b>Volume</b>	<b>P<sub>stat</sub></b>	<b>A<sub>v</sub></b>	<b>P<sub>redNFPA68</sub></b>	<b>P<sub>maxDevent</sub></b>	<b>Scarto</b>	<b>Corr.turb.</b>
100	0.1	12.974	0.2	0.20065	-0.00065	1
100	0.1	6.893	1	1.00475	-0.00475	1.20
100	0.1	5.249	2	2.04145	-0.04145	1.38
100	0.2	9.086	0.6	0.62715	-0.02715	1
100	0.2	7.433	1	1.00965	-0.00965	1.06
100	0.2	5.661	2	2.04165	-0.04165	1.25
100	0.5	11.396	0.6	1.22675	-0.62675	1
100	0.5	9.323	1	1.52845	-0.52845	1
100	0.5	7.1	2	2.00515	-0.00515	1

Dalle precedenti tabelle si nota che, a parità di  $P_{red}$  e di volume, al crescere di  $P_{stat}$  le previsioni del DEVENT tendono ad essere più vicine al valore previsto dalle rilevanze

sperimentali del NFPA68 anche senza la correzione turbolenta. Visto in funzione di un'altra variabile si può fare la medesima osservazione al crescere di  $A_v$ .

Si ricorda che si è scelto di utilizzare la sola correzione proporzionale per rendere più chiari i trend e comunque la massima correzione turbolenta necessaria è stata pari a 2.95 anche se mediamente si tratta di valori decisamente più bassi.

Si nota poi come i fattori di correzione turbolenta che in questo caso dovrebbero mettere in conto nel DEVENT la turbolenza inerente alla deflagrazione ventata, tendono a diminuire notevolmente al crescere del volume; chiaramente questo potrebbe essere correlato ad una erronea stima di  $t_{open}^{(V)}$ .

Tuttavia si ritiene che le stime ipotizzate siano conservative; in particolare per il volume di 25 m<sup>3</sup> poiché per tale volume nelle prove utilizzando un vent di peso assolutamente trascurabile il tempo di rottura è stato stimato in circa 0.12 sec.

In conclusione di questa breve analisi di congruenza si sottolinea come sia possibile stabilire degli intervalli di variazione della correzione turbolenta al variare del volume, di  $A_v$  e di  $P_{stat}$  come riportato nella tabella riassuntiva sottostante. Si riporta inoltre nella figura 1.3.1 l'istogramma dell'andamento della correzione turbolenta in funzione di  $A_v$ .

**Tabella 1.3.10: Tabella riassuntiva dei risultati delle tabelle precedenti**

Volume 100 m <sup>3</sup>		Volume 25 m <sup>3</sup>		Volume 1 m <sup>3</sup>		$P_{stat}$	$P_{red}$
$A_v$	Corr. turb.	$A_v$	Corr. turb.	$A_v$	Corr. turb.		
12.974	1	5.236	1.20	0.566	2.3	0.1	0.2
		3.459	1.30	0.368	2.45	0.1	0.6
6.893	1.20	2.830	1.41	0.301	2.65	0.1	1
		2.413	1.50	0.257	2.75	0.1	1.5
5.249	1.38	2.155	1.58	0.229	2.95	0.1	2
9.086	1	3.730	1.13	0.397	2.20	0.2	0.6
7.433	1.06	3.051	1.21	0.324	2.32	0.2	1
		2.602	1.30	0.277	2.50	0.2	1.5
5.661	1.25	2.324	1.41	0.247	2.75	0.2	2
11.396	1	4.678	1	0.497	1.17	0.5	0.6
9.323	1	3.827	1	0.407	1.86	0.5	1
		3.263	1.04	0.347	2.06	0.5	1.5
7.1	1	2.915	1.15	0.310	2.30	0.5	2

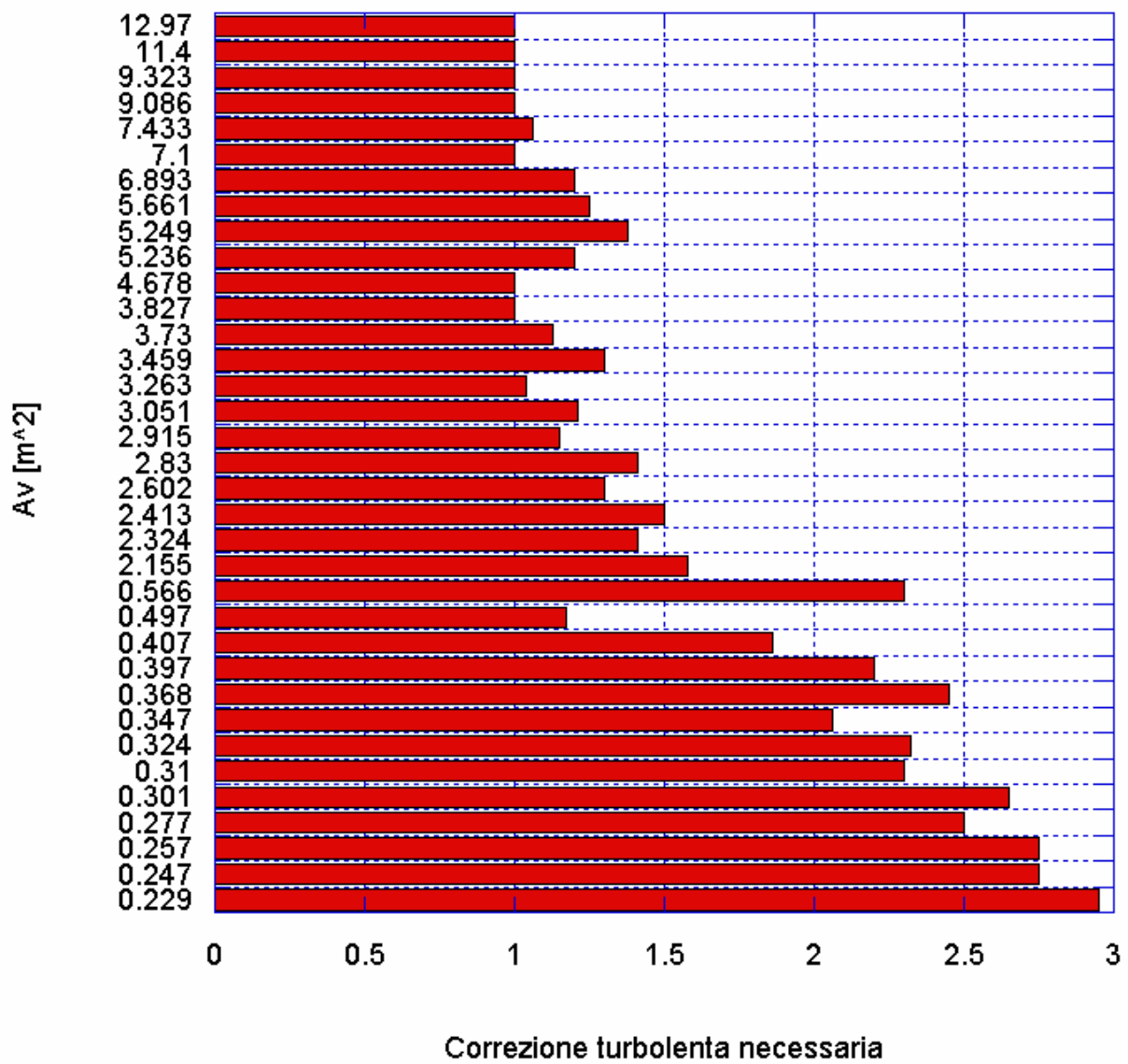
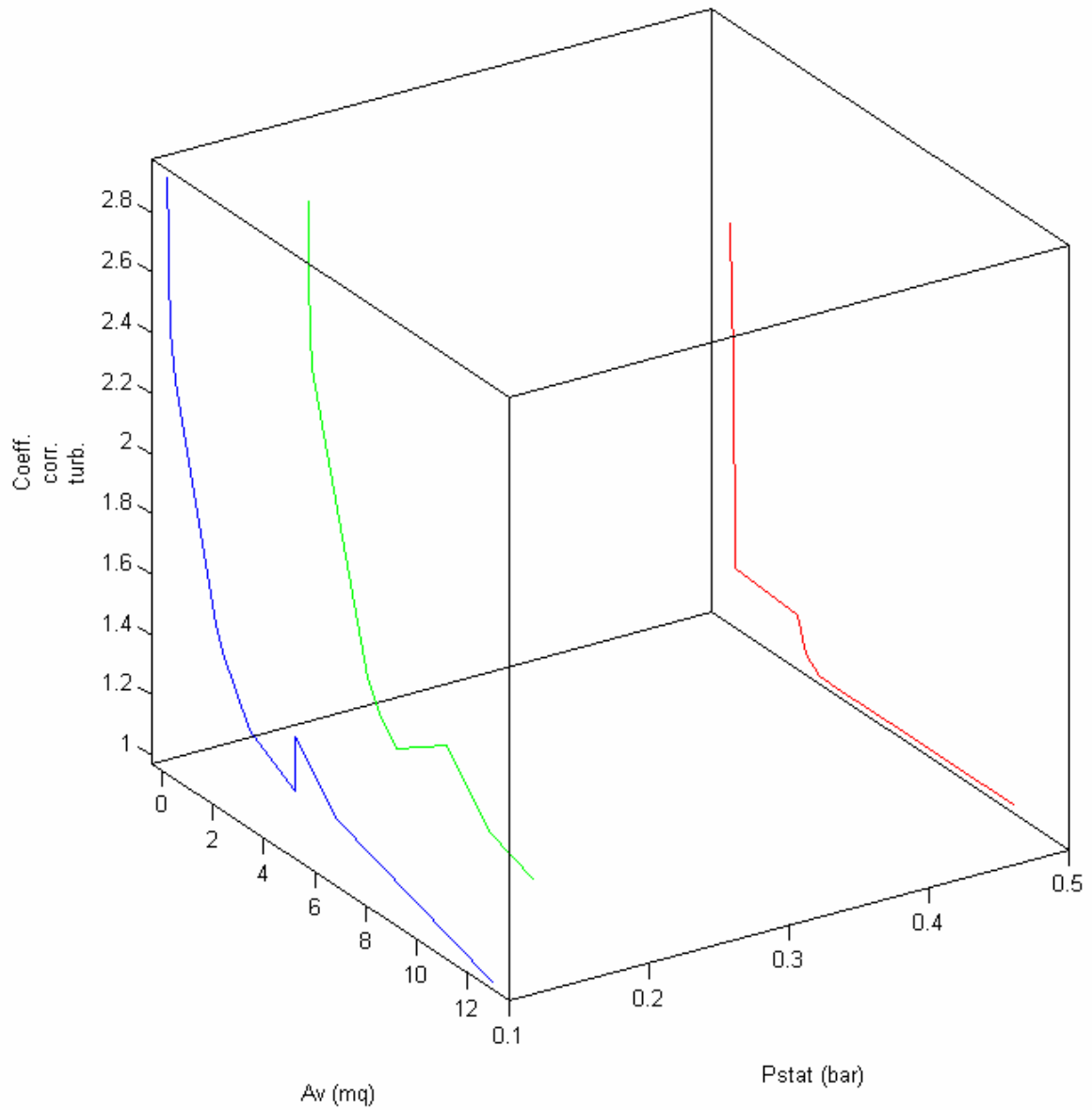


Fig. 1.3.1 Istogramma dei fattori di correzione necessari alle varie aree di vent



**Fig. 1.3.2** Visione prospettica del fattore di correzione turbolento di tabella 1.3.10 in funzione di  $A_v$  e  $P_{stat}$

## CAPITOLO II

### 2.1 DESCRIZIONE GENERALE DELL'APPARECCHIATURA

L'apparecchiatura sperimentale CVE (*Chambre View Explosion*), concepita per lo studio dell'evoluzione di deflagrazioni con miscele infiammabili di aria-idrogeno e aria-metano in ambienti confinati, ha un volume di circa 25 m<sup>3</sup> ed è costituita da una struttura di forma circa cubica, realizzata mediante telaio metallico al quale sono stati collegati, mediante viti, dei moduli rettangolari provvisti di cornici che permettono il montaggio di pannelli sia metallici che di vetro, pareti con aperture per il *vent* necessario all'esecuzione della prova (parete di "test") e pareti per un ulteriore *vent* (*vent* di sicurezza). Quindi, ogni parete della macchina è costituita da pannelli collegati alla struttura ed aventi ciascuno una propria funzionalità; nel dettaglio l'apparecchiatura è così organizzata (vedere figura 1.1.1. e figura 1.1.2.):

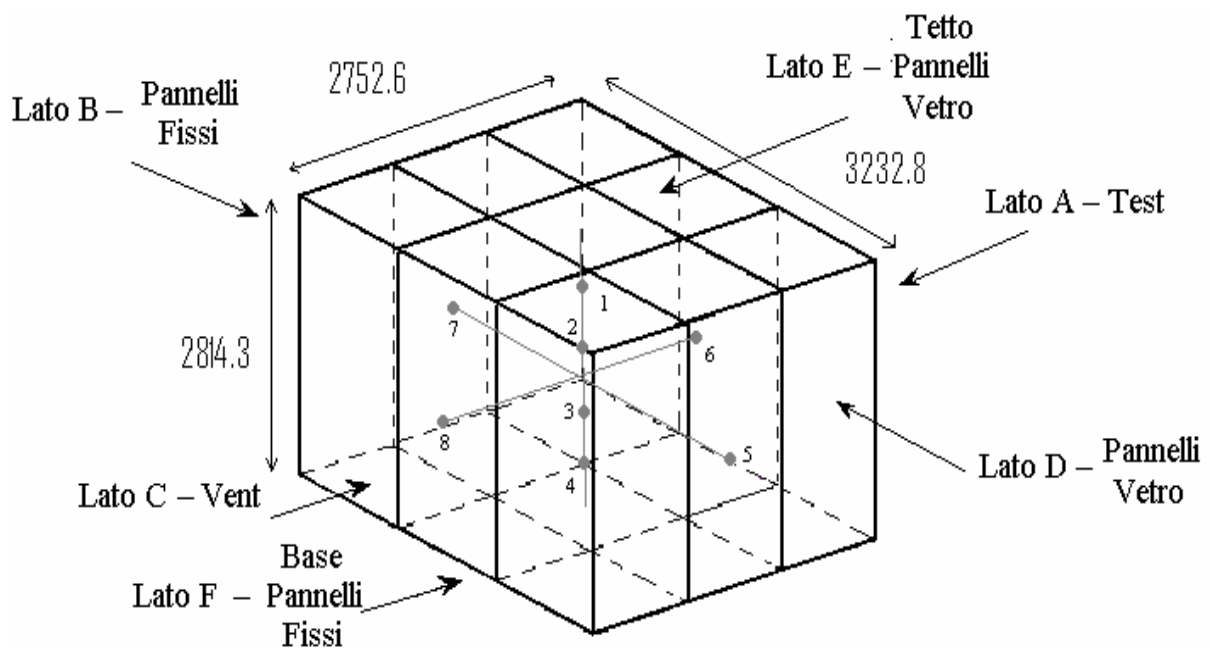
- Parete (A): parete laterale di test, chiusa con un pannello di acciaio contenente al suo interno il passo d'uomo, per permettere l'accesso all'interno dell'apparecchiatura, e con due pannelli, anch'essi di acciaio, dotati di alloggiamenti che permettono il montaggio di una porta e di una finestra in telo di plastica (almeno per le prime prove di deflagrazione previste; successivamente se l'apparecchiatura risponde in modo corretto è stata predisposta l'eventuale sostituzione dei teli di plastica con dei pannelli) per la simulazione di un locale domestico o di qualsiasi altro "*locale ventato*", quale appunto potrebbe essere 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 vogliano testare separatamente la porta e la finestra. In figura 1.1.2. è riportato il particolare del montaggio dei pannelli di prova in plastica
- 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, per far sì che si stacchino dall'apparecchiatura al raggiungimento di un picco di sovrappressione interna pari a 150 mbar.
- Parete (D): parete laterale dotata di pannelli in vetro speciale, intelaiati in profilati di acciaio collegati alla struttura portante dell'apparecchiatura; in questo modo si ha la possibilità di osservare e di riprendere l'evoluzione della deflagrazione mediante 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

È prevista anche una struttura di appoggio per il supporto e la movimentazione della macchina.

In figura 2.1.1. è riportato uno schema semplificato della CVE con la posizione degli ignitori; in figura 2.1.2. è visibile il particolare del vent della parete di prova della CVE con porta e finestra in plastica



**Fig. 2.1.1. – Schema semplificato della CVE con posizione degli ignitori**



**Fig. 2.1.2 – Particolare del vent della parete di prova della CVE con porta e finestra in plastica**

## **2.2. SISTEMA DI IMMISSIONE E MISURA DELLA CONCENTRAZIONE DI GAS**

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 o metano 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.

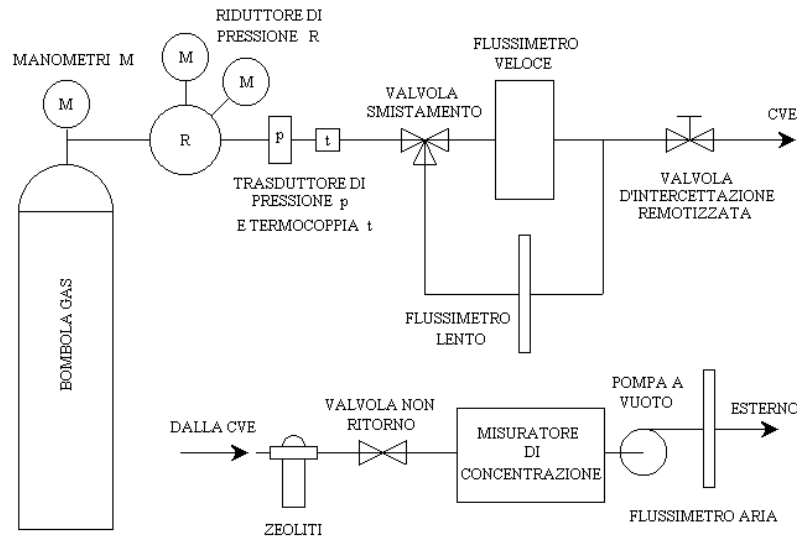
Il circuito di immissione è costituito dai seguenti componenti (figura 2.2.1.):

- una o più bombole di gas (fino a quattro di idrogeno o metano a seconda delle specifiche di prova) con una pressione iniziale prossima ai 200 bar; per motivi di sicurezza non è in vista diretta della CVE. La valvola di testa della bombola è protetta da un lucchetto che può essere rimosso solamente dall'operatore addetto alla procedura di immissione
- un riduttore di pressione a due stadi, che porta il gas da 200 bar a 3 bar;
- una valvola rompifiamma, montata in serie al riduttore;
- una termoresistenza ed un trasduttore di pressione immediatamente a valle della valvola rompifiamma. Tale strumentazione è necessaria per la misura della portata di gas immesso;
- un sistema di due flussimetri in parallelo: uno veloce a doppia scala tarato per H<sub>2</sub> fino a 56 l/s e per CH<sub>4</sub> fino a 19 l/s; uno lento con portata fino a 17 l/min. I due flussimetri sono azionati in modo esclusivo a seconda delle specifiche di prova;
- una valvola micrometrica per la regolazione fine della portata;
- una valvola di non ritorno in serie alla valvola pneumatica che apre il circuito di immissione in CVE;
- una valvola di non ritorno e due valvole di intercettazione pneumatica a comando remotizzato. La seconda, posta all'interfaccia con la CVE, permette di isolare l'apparecchiatura dal circuito di immissione prima della prova.

Il circuito di misura della concentrazione di gas interna all'apparecchiatura è costituito come mostrato in figura 3:

- 3 linee di aspirazione dell'atmosfera interna della CVE, costituiti da tubicini di acciaio inossidabile AISI 304 NPA49-117, secondo le indicazioni delle Norma 1072 UNI 8-10; i punti di prelievo sono regolabili in modo indipendente l'uno dall'altro. Attualmente sono stati collocati in modo da poter effettuare il campionamento dell'atmosfera interna a diverse altezze sull'asse centrale dell'apparecchiatura: un primo punto di prelievo è nel sottotetto a 23 cm dal soffitto

(punto critico per l'accumulo di gas leggeri quali idrogeno e gas naturale), un secondo punto è a metà altezza a 104 cm dal soffitto ed infine l'ultimo punto è in basso a 21 cm dal pavimento;



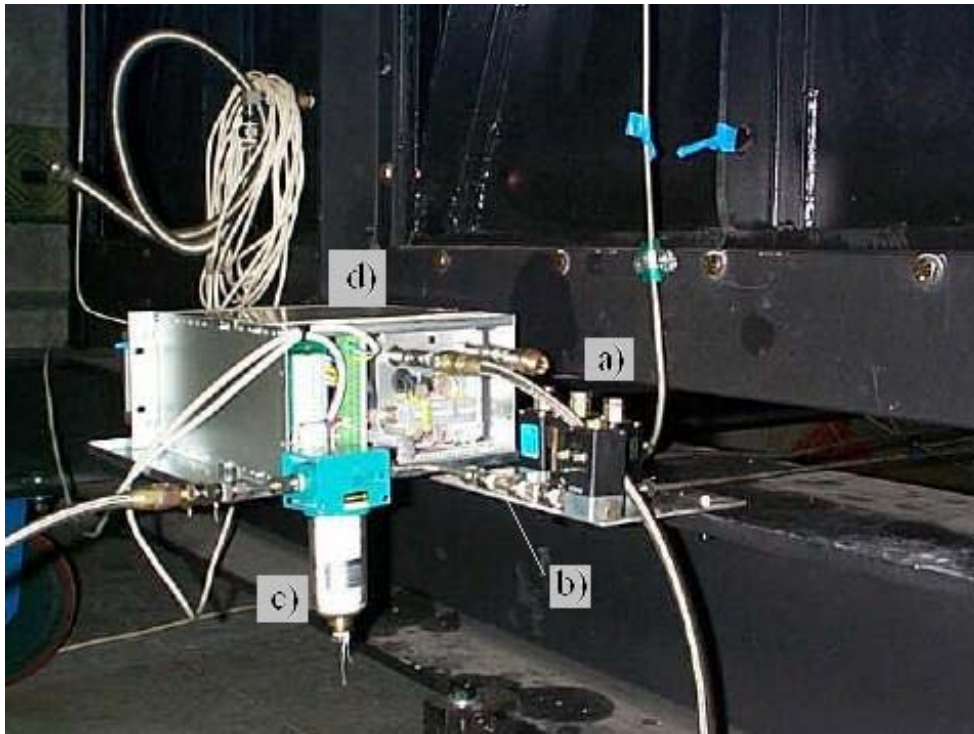
**Fig. 2.2.1. – Sistema di immissione e di prelievo**

- quattro elettrovalvole di commutazione per le tre linee di prelievo: un'elettrovalvola per ogni linea, in posizione “normalmente chiusa”, ed una quarta che entra in funzione ad inizio aspirazione prelevando aria dall'esterno dell'apparecchiatura per stabilizzare e verificare lo zero dell'analizzatore di concentrazione;
- valvola di non ritorno montata sulla tubazione che esce dal collettore con lo scopo di proteggere l'analizzatore di concentrazione gas;
- essiccatore a zeoliti per eliminare l'umidità dal campione di gas aspirato, condizione necessaria per far lavorare l'analizzatore in condizioni ottimali;
- analizzatore di concentrazione di idrogeno e gas naturale posto adiacente al lato completamente costituito da pannelli metallici dell'apparecchiatura (lato b figura 2.1.1.); tale posizionamento dello strumento si è reso necessario per ridurre significativamente i ritardi di lettura dovuti alla lunghezza del percorso che il campione deve eseguire nella linea CVE – misuratore;

- pompa a vuoto per l'aspirazione del campione di atmosfera interna alla CVE; all'ingresso della pompa è stato posizionato un filtro di carta per abbattere l'eventuale aerosol di cloruro di sodio;
- flussimetro che fornisce una verifica della portata aspirata dall'interno della CVE che deve essere circa pari ad un litro al minuto per il corretto funzionamento dell'analizzatore di concentrazione;



**Fig. 2.2.2. – Torretta di interfaccia tra la parte rigida e la parte flessibile della linea d'immissione in CVE**



**Fig. 2.2.3 – Misuratore di concentrazione di idrogeno e componenti annessi**

- a) elettrovalvole di commutazione tra le tre linee di prelievo
- b) valvola di non ritorno
- c) essiccatore a zeoliti
- d) misuratore di concentrazione di idrogeno

- sistema di scarico del campione prelevato in aria a circa 5 m di altezza dal livello del suolo e non in vista diretta dell'apparecchiatura; tale altezza è stata ritenuta sufficiente a garantire la dispersione della miscela infiammabile dato che lo scarico avviene in ambiente totalmente aperto e con portata ridotta: 1 l/min.
- un ventilatore, con annesso sportellino ad apertura asservita, da intendersi come sistema di evacuazione di emergenza del gas in caso non si volesse effettuare l'ignizione o sistema per il lavaggio dell'atmosfera interna, che dall'esterno immette 1340 m<sup>3</sup>/h di aria.
- Un ventilatore interno alla CVE atto ad omogeneizzarne l'atmosfera interna.

Infine è previsto un sistema di generazione di aerosol d'acqua e cloruro di sodio che ha lo scopo di rendere visibile la fiamma (soprattutto quella di idrogeno che non è visibile nel campo visivo umano) grazie alla combustione del sodio.

La generazione avviene tramite l'utilizzo di quattro becchi di Luskin, montati a coppie di due, che impiegano l'effetto Venturi tramite una strozzatura a monte dello stretto canale immerso nella soluzione liquida. La nebulizzazione risultante produce un aerosol di dimensioni medie di 0.7  $\mu\text{m}$ .

La normativa di riferimento per l'aerosol considerato è la UNI EN 1822-2, "*Filtri aria a particelle per alta ed altissima efficienza (HEPA e ULPA) – Produzione di aerosol, apparecchiature di misura, conteggio statistico delle particelle*".

### **2.3. SISTEMA DI IGNIZIONE**

Il sistema di ignizione è stato realizzato attraverso l'impiego di elettrodi collegati ad un circuito a scarica capacitiva telecomandato e concepito in modo tale da impedire eventuali scariche accidentali.

Gli elettrodi in totale sono otto e sono stati così posizionati (figura 2.1.1.):

- un ignitore al centro di ogni parete laterale della CVE ad un metro dal pavimento (quindi quattro in totale);
- quattro ignitori posizionati su un filo che scende dal soffitto proprio al centro della CVE, gli elettrodi sono applicati in modo equidistante uno dall'altro ed in modo che il primo sia a 15 cm da terra e l'ultimo sia a 15 cm dal soffitto. Le distanze degli elettrodi sono comunque regolabili.

Ogni ignitore può essere escluso dal sistema di accensione della miscela infiammabile in modo tale da poter programmare diverse tipologie di accensione: per esempio volendo simulare con la CVE un ambiente domestico questo sistema permette di verificare le conseguenze di un accensione avvenuta al centro della stanza, oppure in un punto vicino al pavimento o ancora vicino ad una finestra.

## 2.4. STRUMENTAZIONE

Il sistema di acquisizione dati prevede la lettura dei seguenti parametri tra i quali quelli asteriscati vengono registrati:


- \*misura del flusso di gas
- concentrazione media di gas nella stanza, calcolata sulla portata indicata dal flussimetro integrata sul tempo di immissione;
- \*concentrazione puntuale di gas nella stanza misurata dall'analizzatore (basato sul principio della variazione della conducibilità termica) in grado di rilevare concentrazioni di gas fino a 12%vol con un errore dello 0.1%vol
- \*un trasduttore di pressione piezoelettrico sulla bombola per il calcolo dei litri di gas erogati alla CVE ed uno sulla linea di immissione per misurare la pressione a monte del flussimetro che deve essere pari a 3 bar come da dati di targa;
- \*due trasduttori di pressione piezoelettrici posti su due lati perpendicolari della CVE per il rilevamento dell'andamento della sovrappressione interna; il campo di misura è 4-500 mbar;
- una termoresistenza per il rilevamento della temperatura interna alla CVE;
- una termocoppia all'interno della linea di immissione per la misura della temperatura del flusso di gas durante l'immissione ed un'altra posta su una bombola per la misura della differenza di temperatura tra queste e l'apparecchiatura;

È da sottolineare l'importanza, dal punto di vista della sicurezza sperimentale, di avere una ridondanza sul dato di concentrazione che viene ricavato in tre modi: dall'analizzatore di concentrazione come misura netta, dal flussimetro e dal salto di pressione delle bombole come misura lorda indiretta che tiene conto di tutto il gas fuoriuscito dalle bombole. Una notevole incongruenza tra le ultime due e la prima di queste misure può significare la presenza di dispersioni e perdite di idrogeno significative. Un notevole disaccordo tra le tre misure può invece indicare il guasto di uno dei tre strumenti di misura dei quali il solo trasduttore di pressione delle bombole è ridondante.



Si riporta qui di seguito una tabella riassuntiva di tutti i dispositivi presenti nella CVE con le loro dimensioni [2].

**Tabella 1.4.1 Tabella riassuntiva della strumentazione e geometria della CVE**

Name/test-ID	Picture(s)
<p><b>CVE Apparatus / vent test</b></p>	
<p><b>Description of test setup</b></p>	<p>Vented explosion experiments have been carried out in a cubic structure made of steel section bars with an internal volume of 25 m<sup>3</sup>. The CVE's roof and one side face are entirely covered with panes of glass in order to see and video-recorder with digital cameras the behaviour of the explosion; all the other faces are covered with steel panels having different functions: the bottom and one side faces are entirely made of steel strengthened panels which are not removable, while the other two lateral faces, on opposite side, are the test vent and the safety vent respectively (see the above picture).</p> <p>The design internal overpressure's value is 200 mbar (20 kPa), and so the opening of the security vent was settled at 150 mbar (15 kPa).</p> <p>The hydrogen gas is sent inside the CVE through stainless steel pipes from three 200 bar cylinders (there is a pressure reducer mounted on the hydrogen bottles manifold). Before the immission phase an aerosol stream is injected in the CVE internal volume in order to see the hydrogen flame (the aerosol makes the flame red).</p> <p>A three channel hydrogen concentration analyser sample the CVE's internal atmosphere during and after the immission in order to stop that phase at a predetermined value of concentration.</p> <p>Three pressure transducer located inside the CVE measure and register the explosion overpressure; other three pressure transducer located outside the CVE and arranged in front of the vent area</p>

	measure the pressure outside the vent discharge cone.																
<b>Describe means of mitigation</b>	<p>The CVE apparatus tests the effect of the vent area upon the pressure build-up during deflagrations of hydrogen/air, or methane/air or mixtures of the two gases, both in uniform and non uniform conditions.</p> <p>The way of proceeding is: fixed hydrogen concentration level in the apparatus and variable vent area. In this case what is under study is the vent area's influence upon internal pressure build-up.</p>																
<b>Describe instrumentation</b>	<p>The CVE is a 2752.6 X 3232.8 X 2814.3 mm<sup>3</sup> cubic structure, with an internal volume of 25 m<sup>3</sup>.</p> <p>On the basis of the following scheme, these are the CVE internal instrumentations:</p> <div style="text-align: center;"> <p><b>CVE simplified scheme</b></p> </div> <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th style="text-align: center;">INSTRUMENT TYPE</th> <th style="text-align: center;">LOCATION</th> <th style="text-align: center;">(X, Y, Z) INSIDE THE CVE [mm]</th> <th style="text-align: center;">RANGE</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td style="text-align: center;">Two stages pressure reducer</td> <td>Outside the CVE. It is mounted on the hydrogen bottles (200 bar) manifold</td> <td></td> <td style="text-align: center;">200-1.5 bar</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">Flow meter</td> <td>Outside the CVE. It is mounted on the piping to the CVE just after the pressure reducer</td> <td></td> <td style="text-align: center;">6-100 Nm<sup>3</sup>/h</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">An aerosol generator</td> <td>Just outside the CVE.  The aerosol immission point inside the CVE is a circular hole of 45 mm in diameter; these are the coordinate of its central point.</td> <td style="text-align: center;">(340, 0, 2714.3)</td> <td></td> </tr> </tbody> </table>	INSTRUMENT TYPE	LOCATION	(X, Y, Z) INSIDE THE CVE [mm]	RANGE	Two stages pressure reducer	Outside the CVE. It is mounted on the hydrogen bottles (200 bar) manifold		200-1.5 bar	Flow meter	Outside the CVE. It is mounted on the piping to the CVE just after the pressure reducer		6-100 Nm <sup>3</sup> /h	An aerosol generator	Just outside the CVE.  The aerosol immission point inside the CVE is a circular hole of 45 mm in diameter; these are the coordinate of its central point.	(340, 0, 2714.3)	
INSTRUMENT TYPE	LOCATION	(X, Y, Z) INSIDE THE CVE [mm]	RANGE														
Two stages pressure reducer	Outside the CVE. It is mounted on the hydrogen bottles (200 bar) manifold		200-1.5 bar														
Flow meter	Outside the CVE. It is mounted on the piping to the CVE just after the pressure reducer		6-100 Nm <sup>3</sup> /h														
An aerosol generator	Just outside the CVE.  The aerosol immission point inside the CVE is a circular hole of 45 mm in diameter; these are the coordinate of its central point.	(340, 0, 2714.3)															

	<p>Three channel concentration analyser</p>	<p>Just outside the CVE.</p> <p>It measures hydrogen samples taken from the CVE internal volume during the immission phase.</p> <p>These are the sample taking points:</p> <p>1. Bottom point</p> <p>2. Medium point</p> <p>3. Upper point</p>	<p>(1690, 1300, 130)</p> <p>(2935, 2655, 1015)</p> <p>(220, 2575, 2694.3)</p>	<p>0-20 %vol.</p> <p>0-20 %vol.</p> <p>0-20 %vol.</p>
	<p>Two pressure transducer</p>	<p>Inside the CVE:</p> <p>1. one on the opposite test vent face</p> <p>2. one on one lateral face</p>	<p>(0, 1365, 1430)</p> <p>(1630, 0, 1430)</p>	<p>0.004 - 5 bar</p> <p>0.004 - 5 bar</p>
	<p>One temperature transducer</p>	<p>Inside the CVE</p>	<p>(2877.8, 1962.6, 1000)</p>	<p>-70 °C ÷+ 350 °C</p>
	<p>Eight ignition points</p>	<p>Inside the CVE:</p> <p>- one on each CVE lateral side (four in total)</p> <p>- four on the CVE central axis</p>	<p>(0, 1305, 1060)</p> <p>(1565, 0, 1060)</p> <p>(3232.8, 1865, 1030)</p> <p>(1110, 2752.6, 1045)</p> <p>(1616.4, 1376.3, 150)</p> <p>(1616.4, 1376.3, 1000)</p> <p>(1616.4, 1376.3, 1650)</p> <p>(1616.4, 1376.3, 2593.3)</p>	<p>Supply: 12 V</p> <p>Distance between electrodes: 3 mm</p>
	<p>One fan for the concentration homogenisation</p>	<p>Inside the CVE.</p> <p>The fan in a parallelepiped of 740 X 280 X 745 mm<sup>3</sup> (x, y, z)</p> <p>These are the coordinate of its location inside the CVE (central point of the parallelepiped):</p> <p>On the parallelepiped posterior side, there is a cylindrical projecting grating of 650 mm in diameter and 85 mm thick. At its centre there is a projecting cylinder for the fan motor's housing of 110 mm in diameter and 140 mm thick.</p>	<p>(2087.8, 377, 372.5)</p>	
	<p>One fan for the CVE</p>	<p>Just outside the CVE.</p>		

	<p>washing</p> <p>When it is activated, the fresh air enters from an opening provided with a remote control system that lets it open as soon as the fan starts to operate.</p> <p>The opening has an area of 181 X 170 mm<sup>2</sup> and it is located on the CVE floor.</p> <p>These are the coordinates of its central point (346.5, 1499.6, 0)</p> <p>A washing window. On the CVE lateral side.</p> <p>It has been designed for hydrogen discharge and CVE cleaning. The window has an area of 290 X 291 mm<sup>2</sup>.</p> <p>These are the coordinates of its central point. (2902.8, 0, 2598.8)</p>
<b>Available results</b>	<p>Data about preliminary check down test of vented explosions carried out with hydrogen-air atmospheres at different concentration, in dishomogeneous conditions and with different position of the ignition point.</p> <p>Here a list of available datas in digital and electronic form:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ hydrogen's concentrations as a function of time in three points of measurement (see the instrumentation table)</li> <li>▪ pressure trend during the hydrogen's combustion phase</li> <li>▪ two digital cameras registrations of the flame propagation's transient behaviours: one from the upper point of view and one from the lateral one</li> </ul>
<b>Data availability</b>	All the data are owned by UNIPI and are reserved. No publications.
<b>Source of data</b>	UNIPI internal documents.
<b>Reason for choosing this dataset</b>	<p>Time development of internal overpressure waves generated by the hydrogen-air atmosphere explosions both with uniform and non-uniform initial conditions.</p> <p>Time development of external overpressure waves generated after the opening of the test vent area both with uniform and non-uniform initial conditions.</p> <p>Validation of 3D-codes related to gas deflagration behaviour: in particular the 3D validation of the flame shape.</p>
<b>Quality and relevance of data</b>	<p>The CVE apparatus is now under improvements especially about the instrumentations: more measurement points and more reliable instrumentations.</p> <p>We will upgrade this version as soon as possible; moreover we would check the expected repeatability and quality of the tests.</p>
<b>Add additional explanations, pictures or comments</b>	<p>The CVE apparatus could have relevancies to the project purposes: it can address separate phenomena, which is of great importance for the project purposes and can be useful also for studying the safety of other hydrogen applications. By introducing an element (H<sub>2</sub> sensor, fuel cell and so on) in the CVE we can measure hydrogen leakages, pressure waves generated in case of explosion, etc.</p>

Volendo ottenere una stima accurata del volume della CVE si è proceduto ad effettuare una misura delle dimensioni della CVE utilizzando un metro laser (Misuratore Laser Leica DISTO WH15 a raggio infrarosso e con puntamento laser con portata 20 cm-100m e precisione  $\pm 0 - 1.5$  mm). La procedura di misurazione che si è seguita è stata quella di scegliere tre pareti della CVE e misurare separatamente le distanze dei tre pannelli che costituiscono ogni parete da quelli posti di fronte ad essi. Per ogni pannello si sono effettuate tre misure equispaziate lungo l'asse principale dello stesso ottenendo alla fine 9 misure per ogni parete. Si è fatta la media delle tre misure per ognuno dei pannelli ottenendo la distanza media del pannello da quello di fronte. Si sono così ottenute le stime delle tre dimensioni principali della CVE trascurando la presenza delle nervature dei pannelli e di altre strutture di connessione tra le pareti. Il volume, leggermente sovrastimato poiché si è trascurata la presenza di nervature e propaggini varie nella CVE, è risultato essere di 25.043 m<sup>3</sup> che si pensa essere molto vicino al volume reale dell'apparecchiatura (una misura precisa del quale potrebbe essere fatta solo attraverso un metodo di misura idraulico).

## CAPITOLO III

### 3.1. PROVE PRELIMINARI (SERIE SD) DI DEFLAGRAZIONE.

Le prove preliminari di deflagrazioni ventate finora eseguite con la CVE sono relative a miscele di idrogeno/ aria a varie concentrazioni. Vengono di seguito riportati i risultati di tutte le prove, nel numero di 11, che sono state eseguite in condizioni di disomogeneità di concentrazione interna all'apparecchiatura e con la combustione effettuata da diversi punti di ignizione.

Tali prove hanno avuto lo scopo di esplorare limiti e possibilità dell'apparecchiatura, l'accuratezza della strumentazione e testare il sistema di acquisizione dati oltre che per prendere confidenza con il sistema CVE nel suo complesso.

Le prove sono state eseguite cercando di variare in un ampio range i valori delle variabili coinvolte. Comunque, data la mancanza di confidenza con il sistema CVE, si è deciso di conservare sempre ampi margini di sicurezza per cui si è optato per fissare l'area di vent al valore di  $2.7 \text{ m}^2$ .

I risultati verranno presentati in forma tabellare per mostrare una panoramica generale dell'andamento dei valori dei picchi di sovrappressione raggiunti in funzione degli altri parametri quali concentrazione della miscela combustibile, temperatura della CVE ecc.

Le caratteristiche comuni alle prove in esame sono l'assenza di turbolenza interna indotta in modo forzato, i tempi di prova, gli intervalli di campionamento dell'acquisizione dei dati, l'energia di ignizione, la posizione in alto del punto di prelievo per l'analisi del campione della miscela. Quest'ultima scelta è basata su considerazioni di sicurezza poiché è in alto che, in caso di stratificazione, l'idrogeno raggiungerà la concentrazione più alta e, per gli scopi di queste prove, non si è ritenuto necessario avere informazioni dettagliate sulla stratificazione dello stesso ma solo l'informazione sulla massima concentrazione raggiunta e, dal  $\Delta P$  e dal flussimetro, la possibilità di ricavare i dati sulla quantità di idrogeno fuoriuscita dalle bombole.

Le variabili su cui si è agito sono state la posizione dell'ignizione, il numero di ignitori coinvolti e la concentrazione di idrogeno.

A seguire si mostrano i dati relativi ad ogni singola prova in funzione dei parametri interni ed esterni rilevanti, nello specifico nella tabella 1 sono riportate le informazioni di interesse per quanto concerne le condizioni interne alla CVE, nella tabella 2 sono evidenziate invece le condizioni esterne in cui le prove sono state effettuate. I valori di umidità non sono stati riportati in quanto ogni prova è stata preceduta da una fase di immissione di aerosol che saturava l'atmosfera interna alla CVE per rendere visibile la fiamma seguente l'esplosione, sicché si può considerare un alto valore dell'umidità media all'interno dell'apparecchiatura.

**Tabella 3.1.1. Dati relativi alle misure effettuate nelle prove preliminari di Shake Down**

<b>Numero Prova</b>	<b>Tempo imm. (sec)</b>	<b>Litri immessi (flussim.)</b>	<b>Conc. %vol</b>	<b>P(mbar) Ril.1 Lat</b>	<b>P(mbar) Ril.2 Poster.</b>	<b>T.in. Stanza (°C)</b>	<b>T.fin Stanza (°C)</b>	<b>Area venting (m<sup>2</sup>)</b>
SD01	146	N.D.	Alto:4.5	N.D.	N.D.	22.3	23.4	2.7
SD02	82	N.D.	Alto:6.8	46.9	50.8	28.8	28.7	2.7
SD03	73	2062	Alto:7.6	13.9	11	32.2	34.7	2.7
SD04	126	2095	Alto:8.3	13.9	11.5	11.5	14.7	2.7
SD05	112	2800	Alto:9.4	12.3	10.2	11.2	48.2	2.7
SD06	115	3627	Alto:11.2	48	46	11.7	62	2.7
SD07	138	N.D.	Alto:6.7	N.D.	N.D.	5.7	N.D.	2.7
SD08	121	N.D.	Alto:9.7	N.D.	N.D.	5.2	24.8	2.7
SD09	110	2668	Alto:10	9	6	5.4	31.1	2.7
SD10	281	N.D.	Alto:10.7	53	49	10.9	112	2.7
SD11	154	3170	Alto:9	43	42	18.5	68.5	2.7

**Tabella 3.1.2. Condizioni al contorno delle prove preliminari di Shake Down**

<b>Denominazione prova</b>	<b>Punto di ignizione</b>	<b>Temp est. Stanza (bombole)</b>	<b>Pressione atm.</b>
SD01	N.D.	N.D.	N.D.
SD02	N.D.	17.7	766
SD03	N.D.	19.9	766
SD04	N.D.	11.8	764
SD05	2	11	766
SD06	5	10.3	765
SD07	N.D.	5.3	766
SD08	2	4.9	765
SD09	5	4.1	770
SD10	2	10.6	756
SD11	4	16.4	767

I dati riportati nella tabella 3.1.1. sono, in sequenza il tempo di immissione ricavato da un timer interno al programma di acquisizione (elaborato col Virtual Designer), i litri immessi sono calcolati in base dall'abbassamento di pressione delle bombole che alimentano il flusso, il dato di concentrazione è acquisito dal misuratore apposito, i picchi di pressione interna sono acquisiti tramite i due misuratori precedentemente indicati, le temperature di inizio e fine prova sono ricavate tramite una termoresistenza interna all'apparecchiatura.

In tabella 3.1.2. la temperatura esterna è misurata tramite una termocoppia sulla linea di immissione.

I dati riportati con la sigla N.D. sono non disponibili per momentanee starature della strumentazione, malfunzionamenti o assenza di deflagrazione riportati nella cronistoria di ogni prova in appendice A.

I valori più elevati dei picchi di pressione, a parità di area di venting effettivamente coinvolta (circa  $1\text{m}^2$ ), si sono avuti per concentrazioni intorno all'11% e sono pari a 50 mbar.

Ad una analisi più attenta si può notare che alcune prove hanno avuto forti deviazioni dalle condizioni suddette, ciò è dovuto alla presenza di plurignizioni o ignizioni successive che hanno nella maggior parte dei casi abbassato il valore del picco.



L'intervallo di tempo in cui si sono svolte le esplosioni, anche se è molto variabile, è sempre risultato essere superiore ai due secondi, in generale la fase di combustione può essere considerata lenta soprattutto per quanto riguarda la parte finale.

Le condizioni di disomogeneità favoriscono la tendenza all'allungamento dei tempi della suddetta fase.

Alcune prove sono state eseguite in condizioni di quasi omogeneità grazie alla turbolenza indotta dall'effetto del riscaldamento solare durante le prove diurne oppure, in minor misura da tempi di attesa prima dell'ignizione abbastanza brevi.

Variazioni del vent sono dovute al materiale utilizzato per la copertura che, essendo elastico, ha contribuito anche ad offrire una certa resistenza nella fase iniziale della deflagrazione che ha portato ad un innalzamento del picco interno di entità non quantificabile in maniera rigorosa.

Non si sono riscontrate variazioni sostanziali dovute a differenti valori di pressione atmosferica registrati in tabella 3.1.2.

In appendice B sono mostrati per ogni prova gli andamenti della pressione interna dai due misuratori in funzione del tempo.

### **3.2 PROVE DELLA PRIMA CAMPAGNA SPERIMENTALE (SERIE CR) DI DEFLAGRAZIONE**

Al fine di indagare sull'andamento e la magnitudo degli effetti di pressione provocati all'esterno dal flusso di sfiato di un locale in cui avvenga una deflagrazione è stato definito di effettuare delle prove sperimentali con l'ausilio della CVE. Tali prove si utilizzeranno inoltre come estensione delle prove della serie SD e dunque con le finalità precedentemente indicate.

I dati relativi a tali prove saranno da noi utilizzati come base per la programmazione delle prove successive per la quale è necessario avere una stima di massima di  $t_{open}^{(V)}$  e  $P_{stat}$  ed in questa ottica si deve vedere la breve descrizione di tale campagna qui riportata; per ulteriori dettagli su questa campagna si rimanda ad altri testi specifici al riguardo [5].

Le prove in questione consistono nella misura tramite sensori di pressione posti a distanza ed angolazione variabile volta per volta a seconda delle esigenze sperimentali rispetto all'asse del vent di test.

Dalle prove si è evinto che la deflagrazione provoca piuttosto che un'onda di pressione che si propaga in maniera sferica, un flusso diretto i cui effetti sono limitati all'area che investe e influenzano in maniera trascurabile le zone ad essa limitrofe.

La tabella in cui le prove sperimentali sono riassunte riferisce il nome della prova, la durata dell'immissione, i litri immessi, la percentuale di idrogeno raggiunta dalla miscela, i valori del picco di pressione interna misurato dai due sensori, la temperatura all'interno della CVE dopo la deflagrazione e l'area di venting.

Come per la serie SD alcuni dati sono indisponibili. Il dato relativo ai litri immessi nell'apparecchiatura derivato dal flussimetro non è stato più rilevato dalla prova CR#22 a causa di un malfunzionamento dello stesso; da tale prova in poi, essendo le prove effettuate in condizioni di omogeneità, ci si è affidati al solo misuratore di concentrazione. Ciò è stato possibile in quanto si è proceduto alla taratura del misuratore di concentrazione da 0-10%vol a 5-15%vol ed all'omogeneizzazione della miscela utilizzando, dalla prova CR#20 in poi, un ventilatore all'interno dell'apparecchiatura.

Le prime prove sono state di messa a punto dei sensori di pressione esterna e per stabilire un intervallo di concentrazioni, in relazione all'area di venting, che permettesse di ottenere dei picchi di pressione interna tra i 100 mbar e i 200 mbar per avere valori significativi misurabili di pressione esterna.

I sensori utilizzati per questa misura sono quattro, di tipo estensimetrico, uno dei quali realizzato presso il laboratorio "Scalbatraio". L'evento di pressione investe un piatto di area fissata e modificabile misurando tramite quattro estensimetri la forza impressa.

Il sensore realizzato in laboratorio possiede un piatto di dimensioni maggiori ed è atto a rilevare sovrappressioni molto basse a grande distanza (fino a 11m) dal vent della CVE.

In appendice A sono riportati per ogni prova i valori di pressione esterna rilevati e le distanze corrispondenti. Tutte le prove sono state realizzate facendo partire la deflagrazione dallo stesso punto di ignizione (n°6) e per le prime 10 prove i rilevatori sono andati in saturazione consentendone la messa a punto. Inoltre dalla prova CR#20 in

poi è stato utilizzato un ventilatore interno per omogeneizzare la miscela prima della deflagrazione.

**Tabella 3.2.1. Valori rilevati nella campagna sperimentale serie CR**

Numero Prova	Tempo imm.(sec)	Litri immessi	Conc. %vol	P(mbar) Ril.1 Lat	P(mbar) Ril.2 Poster.	T.in Stanza (°C)	T.fin Stanza (°C)	Area venting (m <sup>2</sup> )
CR01	93	2356	6	N.D.	N.D.	30.3	31.4	0.7
CR02	83	1982+270	7.5	190	131	30.2	35.6	0.7
CR03	94	2501	5.2	25	24	60	39.2	0.35
CR04	101	2870	10	15.2	15	41.6	75.6	0.35
CR05	113	3232	11.4	48(2pic)	52(2pic)	43.8	111.8	0.35
CR06	107	3174	11.1	40(2pic)	41(2pic)	39.2	109.2	0.35
CR07	120	3576	13	150(2pic)	151(2pic)	41.6	118.8	0.35
CR08	130	3290	12	251	254.78	37.5	104.5	0.35
CR09	135	3250	11.2	143	141.5	42.9	108.7	0.35
CR10	131	3030	11.2	65	62	40.2	104.5	0.35
CR11	137	3396	12.2	N.D.	N.D.	41.9	120	0.35+V.S.
CR12	726	3013	11.1	22(2pic)	23.8(2pic)	41.4	106	0.35
CR13	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	42.6	N.D.	0.35
CR14	706	3029	11.2	37.5	38	42	96.8	0.35
CR15	616	2943	11	21.5	16.5	26.1	85.2	0.35
CR16	620	2950	11	29.5	25	23	87	0.35
CR17	630	N.D.	11.5	61	56	24.5	89.4	0.35
CR18	630	3011	11.75	100	99.5	24.4	92.7	0.35
CR19	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.
CR20	619	3300	11.7	258	253	33.9	106.8	0.35
CR21	339	2926	11.5	240	238	39.9	112.1	0.35
CR22	335	N.D.	11.4	240	238	41.7	113	0.35
CR23	N.D.	N.D.	10	56(2pic)	56(2pic)	46.6	121.8	0.35
CR24	309	N.D.	10.5	78(2pic)	80.5(2pic)	48.3	123	0.35
CR25	225	N.D.	11.7	8.3	3.99	27.9	91.3	0.70
CR26	380	N.D.	11.7	176	177	28.8	83.3	0.70
CR27	422	N.D.	11.5	52.7	53.8	29.4	81.1	0.70
CR28	402	N.D.	11.7	87.1	92	29.2	86.8	0.70
CR29	382	N.D.	11.7	150.7	154.7	29	81.5	0.70
CR30	350	N.D.	11.7	84	87	29.5	82.9	0.70
CR31	330	N.D.	11.7	93	97.6	29.5	81.1	0.70

Nelle tabelle delle prove trattate si è indicato la presenza di due picchi con la dicitura (2pic) nonché l'avvenuta saturazione del sensore con (sat).

**Tabella 3.2.2. Valori delle pressioni esterne e condizioni al contorno delle prove serie**

**CR**

Numero Prova	Punto di ignizione	Temp est. Stanza (°C)	Pressione atm. (mmHg)	P. est. Ril.1 Distanza(m)	P. est. Ril.2 Distanza(m)	P. est. Ril.3 Distanza(m)	P. est. Ril.esten Dist(m)
CR01	6	23.5	764	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.
CR02	6	25.2	764	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.
CR03	6	25.2	764	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.
CR04	6	25.8	764	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.
CR05	6	26.5	764	5m, 7(sat)	7m,6.5(sat)	9m, 6.4	N.D.
CR06	6	27.2	764	5m,13.9(sat)	7m,8.3	9m,3.9	N.D.
CR07	6	27.5	764	5m,13.9(sat)	7m,13.8(sat)	9m,13.6(sat)	N.D.
CR08	6	25.7	764	5m,27.5(sat)	7m,27(sat)	9m,26.5(sat)	N.D.
CR09	6	25.7	764	7m,20(sat)	9.5m,17.2(sat)	12m,6.8(sat)	N.D.
CR10	6	26.6	764	7m,N.D.	9.5m,9.8(sat)	12m,3.3(sat)	N.D.
CR11	6	27.7	764	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.
CR12	6	28.52	763	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.
CR13	6	27.98	763	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.
CR14	6	27.47	763	7m,5.1	9.5m,3.9	12m,2.8	N.D.
CR15	6	27.1	764	7m,4.3	9.5m,2	12m,1	N.D.
CR16	6	24.2	764	7m,5.4	9.5m,3.4	12m,1.8	N.D.
CR17	6	22.33	764	7m,12.2	9.5m,7.8	12m,4.8	9.5m,N.D.
CR18	6	20.97	764	7m,25.2	9.5m,18.8	12m,10.5	9.5m,0.8
CR19	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.
CR20	6	25.38	766	7m,14.8(sat)	9.5m, 15.1	12m,10.5	11m16.5
CR21	6	25.1	766	7m,14.6	11m,9.7	15m,4	11m,8.2
CR22	6	24.9	766	7m,14.8(sat)	11m,11	15m,4.8	9.5m,8
CR23	6	29.6	766	7m,3.7	11m,1.14	15m,N.D.	11m,1.1
CR24	6	26.9	766	7m,3.33	11m,N.D.	15m,N.D.	11m,0.5
CR25	6	29.8	764	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.
CR26	6	27.6	764	7m,14.8(sat)	11m,15.19	15m,5.55	11m,19.4
CR27	6	25.3	764	7m,10.0	11m,4.5	15m,0.86	11m,4.05
CR28	6	23.5	764	7m,13.48	9.5m,12.53	12m,5.27	11m,10.3
CR29	6	22.34	764	7m,14.8(sat)	9.5m,15.2	12m,8.63	11m,15.49
CR30	6	21.22	764	7m,14.54	7m,15°,1.05	7m,30°,N.D.	7m,15°,0.65
CR31	6	20.71	764	7m,10.5	5m,15°,3.25	3m,30°,N.D.	5m,15°,3.34

### 3.3 CONCLUSIONI

Le prove preliminari di deflagrazione condotte con l'apparecchiatura CVE hanno evidenziato che le attuali dimensioni del vent sono sufficienti a garantire un abbattimento del picco di pressione interna conseguente l'esplosione per concentrazioni di idrogeno in aria fino a 12.5%vol. con area di vent pari a 0.35 m<sup>2</sup>, in condizioni di omogeneità interna. Infatti a tale valore di concentrazione si è verificata l'apertura di un pannello del vent di sicurezza.

Sono disponibili per alcune delle prove eseguite, dei filmati che evidenziano in generale la lentezza delle combustioni e da cui è possibile trarre interessanti informazioni.

Tramite una sincronizzazione dei suddetti filmati con l'andamento temporale dei picchi di pressione è possibile stabilire una correlazione diretta tra evoluzione del fenomeno della combustione e apertura del vent. Sarà proprio su questo che si lavorerà per effettuare una stima di  $t_{open}^{(V)}$  e  $P_{stat}$ .

Il margine di sicurezza, in termini di carico sulla struttura, raggiunto durante le esplosioni, ha dimostrato che l'efficacia del vent è tale da poter sopportare valori maggiori di 11%vol concentrazione di gas infiammabile in camera al momento dell'esplosione.

Attualmente è sotto studio una matrice di prove sperimentali tesa ad indagare gli effetti della variazione delle dimensioni dell'area del vent sul valore del massimo picco di sovrappressione interno, anche utilizzando il codice Devent.

Tale matrice sarà relativa alla quantità di idrogeno immessa, si studierà l'influenza dell'area di vent sul transitorio tenendo fissi la quantità di gas immesso e la posizione dell'ignitore rilevando nel contempo i valori di pressione esterna a varie distanze. Tale problematica è estremamente interessante perché riguarda gli effetti che tale fenomeno può provocare su strutture/componenti posti nelle vicinanze di un locale ove si può accumulare una miscela esplosiva (effetto domino). Per questo fenomeno la letteratura è abbastanza lacunosa soprattutto in relazione della enorme letteratura relativa al fenomeno del venting.

Si utilizzerà più diffusamente il ventilatore per poter uniformare la concentrazione del gas entro la stanza; in questo modo potranno essere ripetute le prove con stesse condizioni di immissione, posizione di ignitore e ampiezza del vent ma con concentrazione di gas uniforme nella stanza. Questo permetterà di apprezzare in seguito, effettuando una nuova campagna, la differenza fra esplosioni in ambiente con concentrazione di gas uniforme e stratificata in termini di tempistica e sovrappressione massima.

Nel futuro saranno anche effettuate prove strumentate sulla distribuzione dei gas entro l'apparecchiatura utilizzando anche il flussimetro lento che permette tempi di immissione lunghi (tipicamente 20 minuti contro i 200 secondi del flussimetro veloce). Tali prove potrebbero essere utilizzate per la verifica dei codici CFD che possono simulare tale transitorio di immissione.

Per quanto riguarda la strumentazione si deve sottolineare che l'analizzatore di concentrazione si è dimostrato accurato ed affidabile oltre che capace di conservare la calibrazione senza problemi per tempi dell'ordine della settimana ed oltre; inoltre lo strumento ha dimostrato di poter essere ricalibrato e rispondere correttamente oltre il suo range di funzionamento di progetto (0-10%vol H<sub>2</sub>). Si sono dimostrati invece inaccurati i metodi di valutazione della concentrazione indiretti basati sul flussimetro e sulla pressione delle bombole, per taratura il primo e per modellazione matematica del metodo di valutazione indiretta il secondo. Si ritiene opportuno per la prossima campagna ricalibrare il flussimetro ed indagare in modo più approfondito su tali misure.

## CAPITOLO IV

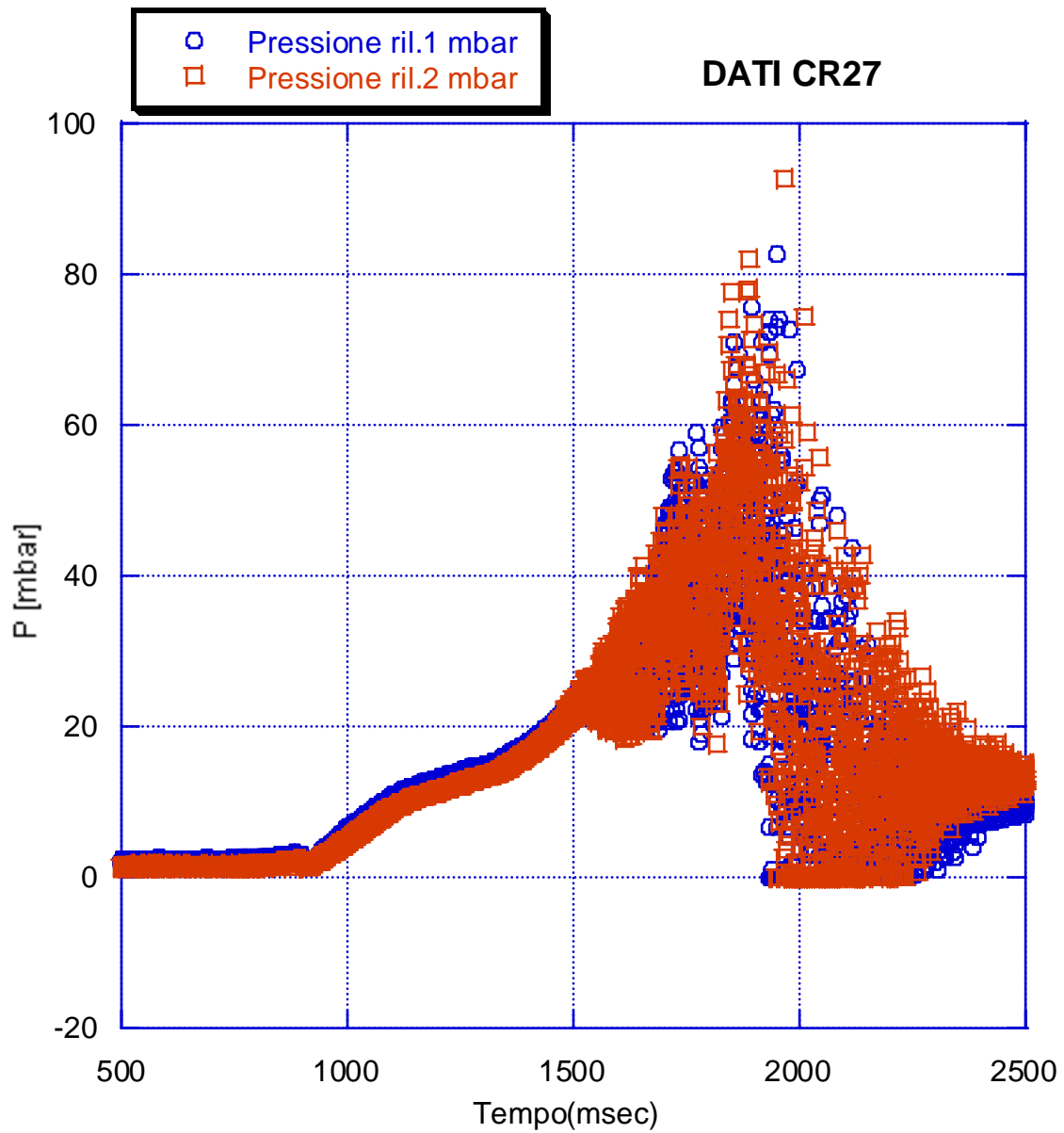
### 4.1 VALUTAZIONE DEI PARAMETRI NECESSARI AL DEVENT

Nell'appendice C si riportano nel dettaglio la metodologia e l'analisi con cui si è stimato  $P_{stat}$  e  $t_{open}^{(v)}$ . Qui si riportano una breve descrizione dell'analisi svolta e le stime ottenute. Quello che si è fatto è stato di affiancare l'andamento della pressione e della sua derivata (ove questa avesse numericamente un andamento accettabile) per le prove CR26-CR31 ad i rispettivi filmati effettuati avvalendoci di un segnale di sincronia che registra il momento in cui si effettua lo spark. Fatto ciò si sono cercate tracce di rottura del vent visualizzate direttamente nel filmato o evidenziate da una brusca discesa della pressione nella CVE od ancora dalla presenza di un massimo relativo nella derivata di P. Le analisi degli andamenti di P e dP/dt sono notevolmente complicate dalla presenza di notevole rumore, prodotto in massima parte dalla vibrazione della struttura della CVE, che ci impone di filtrare notevolmente i dati; si riportano a titolo esemplificativo in figura 4.1.1 e 4.1.2 il diagramma di dispersione di P ed un suo andamento filtrato per la prova CR27. Si riporta una tabella riassuntiva dell'appendice C che mostra le  $P_{stat}$  ed i  $t_{open}^{(v)}$  stimati.

**Tabella 4.1.1 Stima di  $P_{stat}$  e  $t_{open}^{(v)}$  per la programmazione delle prove RSD**

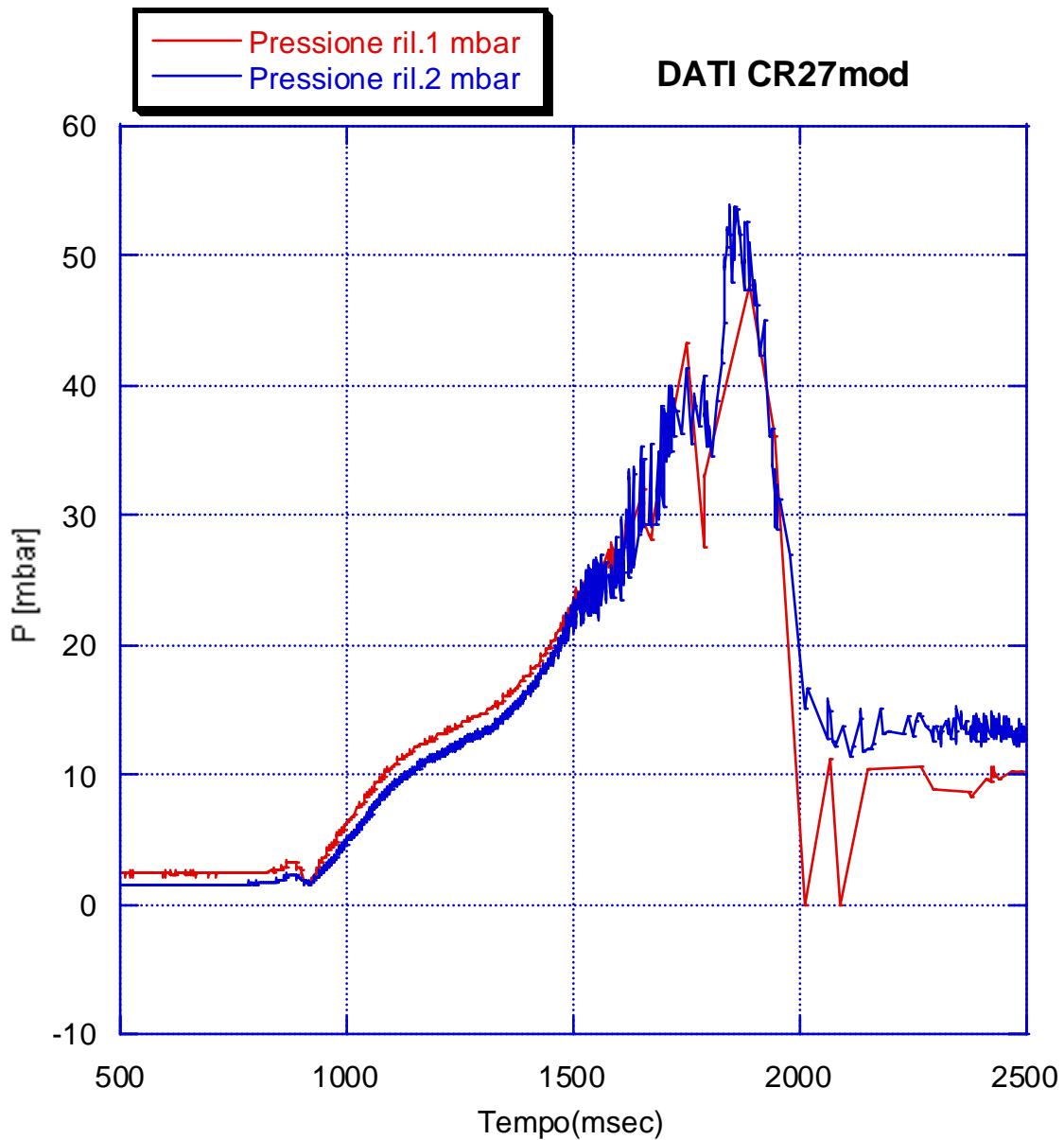
Prova	Range di $P_{stat}$ stimato (nei due fotogrammi consecutivi)	Stima di $P_{stat}$ (mbar)	Stima di $t_{open}^{(v)}$ in frames (1 frame=1/25 sec)	Commenti
Cr26	50-120	70	2	A
Cr27	40-50	45	2-3	Leggibile
Cr28	40-58	50	2	Leggibile
Cr29	50-100	70	2	A
Cr30	120-120	120	2-3	A
Cr31	50-60	55	2	Leggibile

L'indicazione "A" indica che probabilmente tale valore è poco accurato; infatti nelle deflagrazioni che raggiungono i picchi di pressione più alti si notano irregolarità varie e l'eccessivo gradiente di pressione rende poco leggibile la pressione di apertura del vent che sembra decisamente più alto che negli altri casi; ciò potrebbe essere in realtà dovuto al fatto che il vent è già lacerato ma la bassa luminosità e la veloce dinamica della deflagrazione in concomitanza con le relative lentezza e poca ricchezza di dettaglio della telecamera non permettono di osservare correttamente tale rottura.



**Fig. 4.1.1** diagramma di dispersione di P per la prova Cr27





**Fig. 4.1.2 andamento filtrato di P per la prova CR27**

In definitiva si è concluso che la rottura del vent avviene a cavallo del singolo picco principale che si vede in tutte e sei le prove. Si sovrastimano -per programmare in sicurezza le successive prove- i due parametri cercati con i valori 0.1 sec per  $t_{open}^{(V)}$  e 50 mbar per  $P_{stat}$ . Restano in dubbio due fenomeni: la presenza di piccoli talloni nella zona

precedente il picco che potrebbero rappresentare la rottura del vent ma in corrispondenza dei quali non si evincono tracce nei filmati ed alcune ombreggiature che compaiono nei filmati poco prima della rottura del vent e che potrebbero essere connessi con quest'ultima o potrebbero essere un semplice gioco di luce. Durante la prossima campagna si effettueranno delle prove atte a risolvere tali dubbi.

## 4.2. PROGRAMMAZIONE DELLA CAMPAGNA DI PROVE

Si presenta in tabella 4.2.1 una matrice di programmazione della campagna di prove che si intende condurre indicando per ogni prova l'unico parametro su cui si agirà che sarà l'area di venting e la pressione attesa calcolata con il codice DEVENT utilizzando i valori di  $t_{\text{open}}^{(V)}$  (0.1 sec) e  $P_{\text{stat}}$  (5 kPa) precedentemente stimati poiché si utilizzeranno gli stessi materiali e procedure operative della campagna precedente. Tali grandezze verranno poi stimate con maggiore accuratezza a posteriori nella fase di analisi dei risultati delle prove. I parametri che si terranno fissi saranno la concentrazione di  $H_2$  al 12%Vol omogeneo, il volume a  $25 \text{ m}^3$  e la posizione del punto di ignizione che sarà di fronte alla parete del vent. L'ultimo parametro, che fornirà il massimo picco di pressione relativamente alle ignizioni a parete, sarà cambiato nelle ultime prove con la posizione centrale dell'ignitore per avere un'idea della differenza di pressione di picco che si ha in tale caso rispetto ad un'ignizione a parete.

Riguardo a  $P_{\text{stat}}$  si deve sottolineare il fatto che il DEVENT prevede che al crescere dell'area di vent i picchi di pressione che si raggiungono si avvicinano asintoticamente a tale valore. La cosa risulta evidente se si pensa al fenomeno fisico che sta avvenendo: quanto più aumenta la frazione di venting  $F_v=(A_v/A_s)$  più aumenta la capacità di evacuare energia da parte del vent una volta che questo sia pienamente attivo -si sia cioè superato  $P_{\text{stat}}$  e sia passato  $t_{\text{open}}^{(V)}$  per il DEVENT ovvero sia stata spostata completamente la copertura nell'evento reale- il che comporta che oltre una certa  $F_v$  ci sarà un abbattimento completo della pressione una volta che il venting è stato completamente aperto essendo l'energia da questo evacuata maggiore di quella che viene prodotta dalla deflagrazione

all'interno dell'enclosure. Questo fatto sarà utilizzato per valutare più accuratamente  $P_{stat}$  programmano prove con  $F_v$  molto alta per le quali il DEVENT prevede che la pressione supererà di poco la  $P_{stat}$ . Durante le prove si effettueranno anche dei filmati che permetteranno di risolvere i dubbi messi in evidenza nella valutazione di  $P_{stat}$  e  $t_{open}^{(V)}$  e di verificare l'eventualità che l'attuale vent di plastica non si rompa tanto per effetti meccanici quanto per effetti termici

Si inizierà la campagna con una serie di prove di check-up dell'apparecchiatura e della strumentazione a concentrazione crescente con  $A_v$  iniziale di  $0.75 \text{ m}^2$  per raggiungere il 12 %vol  $\text{H}_2$  progressivamente, aumentando il vent al crescere della concentrazione di idrogeno se ritenuto opportuno: queste prove serviranno anche per mettere appunto una procedura che permetta, con delle immissioni multiple, di raggiungere una concentrazione omogenea prestabilita con errori inferiore all' 0.1%vol  $\text{H}_2$  basandosi sull'affidabilità ed l'accuratezza del misuratore di concentrazione.

Concluse con successo queste prove di messa a punto si passerà alla campagna di prove vera e propria.

Si propongono 5 condizioni di prova suggerendo di ripetere ogni condizione per più volte per ottenere almeno due risultanze corrette cioè monoaccensione senza problemi di fuori scala, di imprecisioni di strumentazione, di errori di immissione o di omogeneità dell'idrogeno. Si sottolinea il fatto che per le prove con  $A_v$  più alto si dovrà aprire oltre alla porta anche la finestra per superare gli  $1.5 \text{ m}^2$  che sono la dimensione della porta, il che, portando ad un vent non simmetrico potrebbe inficiare i risultati portando all'apertura di uno solo dei due o ad altri problemi impreveduti; si verificherà ciò in fase di analisi post-prove.

Per agire in sicurezza sarebbe opportuno che le prove si svolgessero partendo da quella con area di venting maggiore per ridurre la probabilità di apertura del venting di sicurezza in caso di errore di sottostima della pressione massima tramite il codice DEVENT; tuttavia avendo nella scorsa campagna effettuato diverse prove con  $A_v$  di  $0.35\text{-}0.7\text{m}^2$  e concentrazione prossima a quella qui programmata si ritiene trascurabile il rischio di apertura del vent di sicurezza e si opta per iniziare con la prova con apertura di  $0.75 \text{ m}^2$  per procedere poi verso  $A_v$  maggiori.

**Tabella 4.2.1: condizioni di prova e pressioni massime attese secondo il codice**

**DEVENT con i parametri  $t_{open}^{(v)}=0.1$  sec e  $P_{stat}=50$  mbar**

$A_v$ (m <sup>2</sup> )	$P_{attesa}$ (DEVENT)(mbar)
0.35*	1259.0
0.75	1069.8
1	1068.1
1.5	1066.6
2 m <sup>2</sup>	1066.1

\* Una prova in tali condizioni è stata già effettuata durante la campagna CR (prova CR08) e sarà pertanto possibile assumere un dato relativo a tale condizione dalla campagna precedente

Si allegano in appendice D i calcoli che permetterebbero di stabilire l'andamento delle pressioni esterne, secondo la relazione di Hattwig che meglio si accordava con gli andamenti registrati nella campagna CR.

La scelta delle aree di venting minime e massime è stata dettata dai limiti intrinseci dell'apparecchiatura che può avere un vent massimo pari a 2 m<sup>2</sup> e che è opportuno non ridurre al di sotto di 0.35 m<sup>2</sup> quando la concentrazione supera il 12%vol H<sub>2</sub>. Tali aree sono state incluse nella programmazione poiché si ritiene opportuno far variare quanto più è possibile  $F_v$  per ottenere dati in un ampio campo di variabilità di tale parametro. Il passo è stato fissato a 0.5 m<sup>2</sup> poiché ritenuto accettabile come compromesso per avere dati sufficientemente fitti senza impiegare tempi eccessivi per predisporre un gran numero di volte la parete di vent; sarà comunque possibile effettuare ulteriori prove più o meno complete con passo minore, per esempio a 0.25 m<sup>2</sup>.

## **CAPITOLO V**

### **5.1 INTRODUZIONE ALLE PROVE RSD**

Dall'analisi dei report della campagna CR si evince la necessità di stilare per ogni prova sperimentale un riassunto breve e leggibile comprendente anche i parametri ambientali rilevati preliminarmente. Fondamentale è anche la necessità di disporre di una accurata check-list in formato cartaceo ed una tabella, che, inclusa alla fine della stessa, permette di svolgere la prova acquisendo tutti i dati ritenuti importanti in formato cartaceo; la tabella si riporterà poi in formato digitale.

Si riporta qui un'analisi critica di confronto tra le previsioni del DEVENT ed i risultati delle prove RSD; le tabelle relative alle singole prove [con allegate, per ogni prova, alcuni diagrammi ricavati dai file di dati dai quali si sono letti alcuni valori che sono riportati nelle tabelle e brevi note sull'esecuzione della stessa] con i dati sull'immissione e gli andamenti della pressione nella CVE si allegano in appendice.

Per ottenere il valore di concentrazione desiderato sono state realizzate immissioni a più stadi prevedendo la possibilità di ridurre il flusso di idrogeno laddove ritenuto necessario. Seguendo questo metodo sono stati ottenuti valori di concentrazione con uno scarto minore dello 0.5% vol dal valore desiderato.

Nelle prove di bilancio è sorto un problema riguardante il misuratore di concentrazione, il quale ha fornito valori, durante le aspirazioni dai canali alto e basso, decisamente minori di quelli riscontrati dal canale medio. Nella scorsa campagna tale misuratore mostrava, mettendo in funzione il ventilatore con le stesse logiche usate per questa campagna, differenze dello 0.1% vol tra i tre canali, con concentrazione crescente con l'altezza. Per spiegare questo fenomeno si sono ipotizzate la presenza di impurità accumulate nella linea e/o tenute difettose delle elettrovalvole di selezione dei canali, oppure una perdita di tenuta lungo la linea stessa. Le misure dai due canali alto e basso sono dunque risultate inaffidabili. Non essendo cambiate rispetto alla campagna CR le condizioni in cui si effettua la prova e fermo restando il fatto che il ventilatore omogeneizzi correttamente il gas nella CVE, si è deciso di affidarsi inizialmente al solo dato del canale di aspirazione

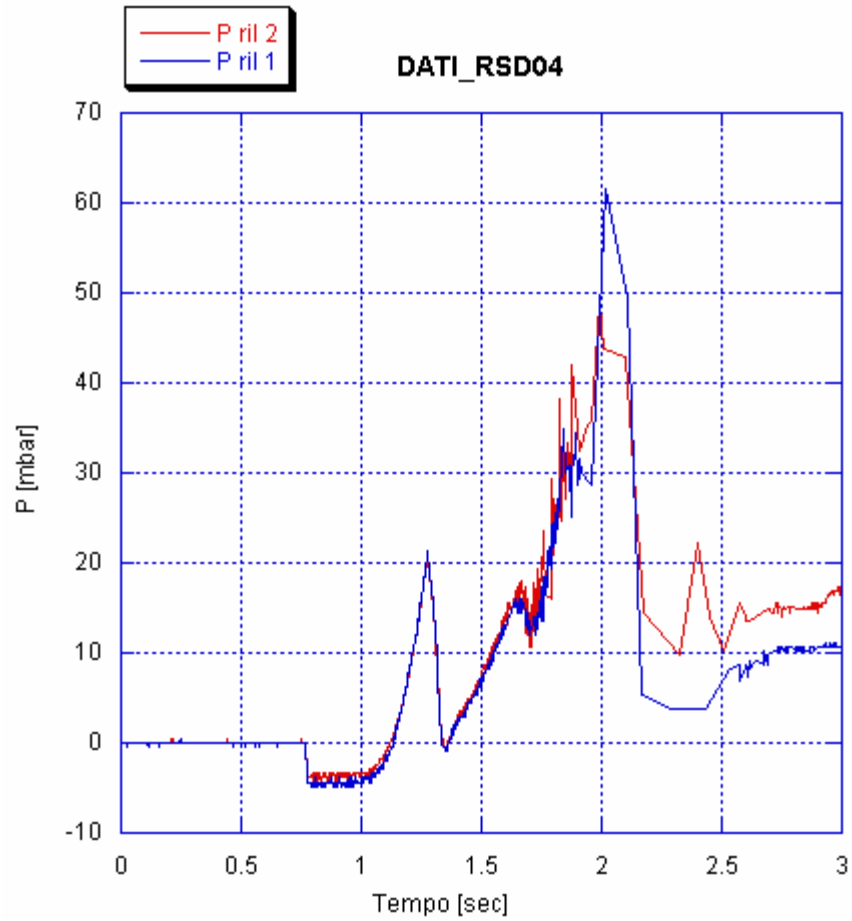
media; questo dato è più alto degli altri due in accordo con l'ipotesi che l'aria aspirata dagli altri due canali venga miscelata con una frazione di aria esterna prima di giungere al misuratore di concentrazione a causa del malfunzionamento delle valvole relative ai due canali. Nel corso della campagna si è provveduto a verificare le due linee di aspirazione e si è riscontrato, come ipotizzato, il malfunzionamento delle valvole di aspirazione dai canali basso ed alto trovandole incrostate di cristalli salini; dopo l'operazione di ripristino effettuata nel corso delle prove sperimentali tutti e tre i canali hanno ripreso a funzionare correttamente.

Si sottolinea inoltre il fatto che nelle prove si è riscontrata la presenza di un rumore collegato col segnale di sincronia degli sparks, di ampiezza pari a circa 5 mbar e durata pari al tempo di scintillazione degli stessi, sulle misure dell'andamento della pressione interna che nella serie di prove precedenti non era presente. Tale problema era dovuto ad un isolamento non perfetto di tale segnale dall'ingresso proveniente dai trasduttori di pressione interni alla CVE. Il problema è stato compreso e temporaneamente risolto con l'ausilio del supporto tecnico del laboratorio. Come informazione degna di nota si riporta poi il fatto che l'analizzatore di concentrazione ha mantenuto inalterata la calibrazione per quasi due mesi, essendosi effettuata una verifica della stessa in data 27-09-04 in occasione della prova di verifica della tenuta della CVE per la quale in sede di verifica è stato sufficiente azzerare l'offset per ottenere l'accordo della misura con le bombole di calibrazione, dopo aver effettuato l'ultima calibrazione per le prove del 30-07-04.

## 5.2 ANALISI DELLE PROVE RSD

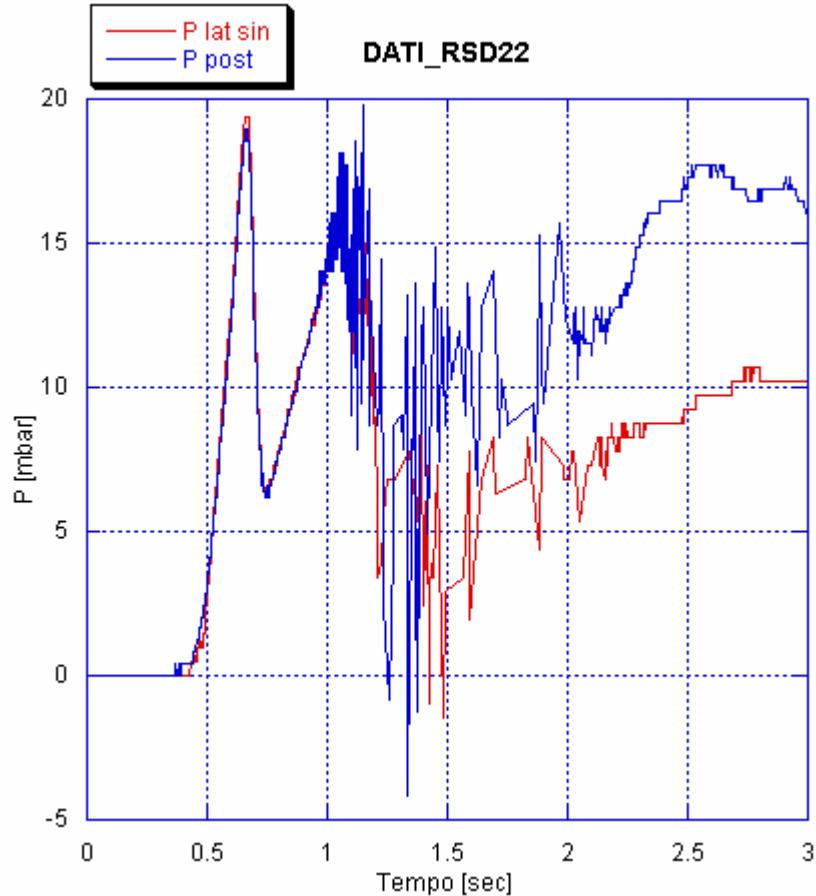
Nel report delle prove si riportano per ogni prova gli andamenti rilevati della pressione nella CVE; tali andamenti, escludendo le prove RSD01-02-03-05-13-14-15 che, per diversi motivi non rispettano la programmazione prevista, presentano tipicamente due andamenti diversi. Tipicamente le prove con area di vent più piccola tendono a presentare un tallone sull'andamento della pressione misurato più o meno accentuato seguito da un solo picco ben distinto; al crescere dell'area di vent il tallone cresce fino a divenire, nelle prove con area di vent più grande, il picco principale sempre seguito da un secondo picco. A seguito del secondo picco è sempre presente un'avvallamento del diagramma seguito da un incremento di pressione che poi si stabilizza ad un certo valor medio, pur presentando notevoli oscillazioni ad alta frequenza. Le prove con area di vent più grande presentano spesso più di due picchi dello stesso ordine di grandezza. Nel report vengono riportati anche gli andamenti della pressione previsti dal DEVENT con i parametri necessari letti da ogni singola prova. Il parametro  $t_{open}^{(V)}$ , la cui stima è stata piuttosto complicata, è stato valutato anche in base al fatto che migliora l'accordo tra le previsioni del DEVENT e gli andamenti di pressione registrati. Nella stima del parametro si è cercato di avvalersi dei filmati per trovare una qualche conferma alle stime fatte, ma tale tentativo è stato infruttuoso.

Presentiamo, a titolo esemplificativo, due andamenti della pressione nella CVE rappresentativi delle due tipologie sopra brevemente descritte.



**Fig.5.2.1 Andamento della pressione della prova RSD04 con  $H_2\%=12.2$  ed  $A_v=0.71\text{ m}^2$  ; tipico andamento del primo tipo**

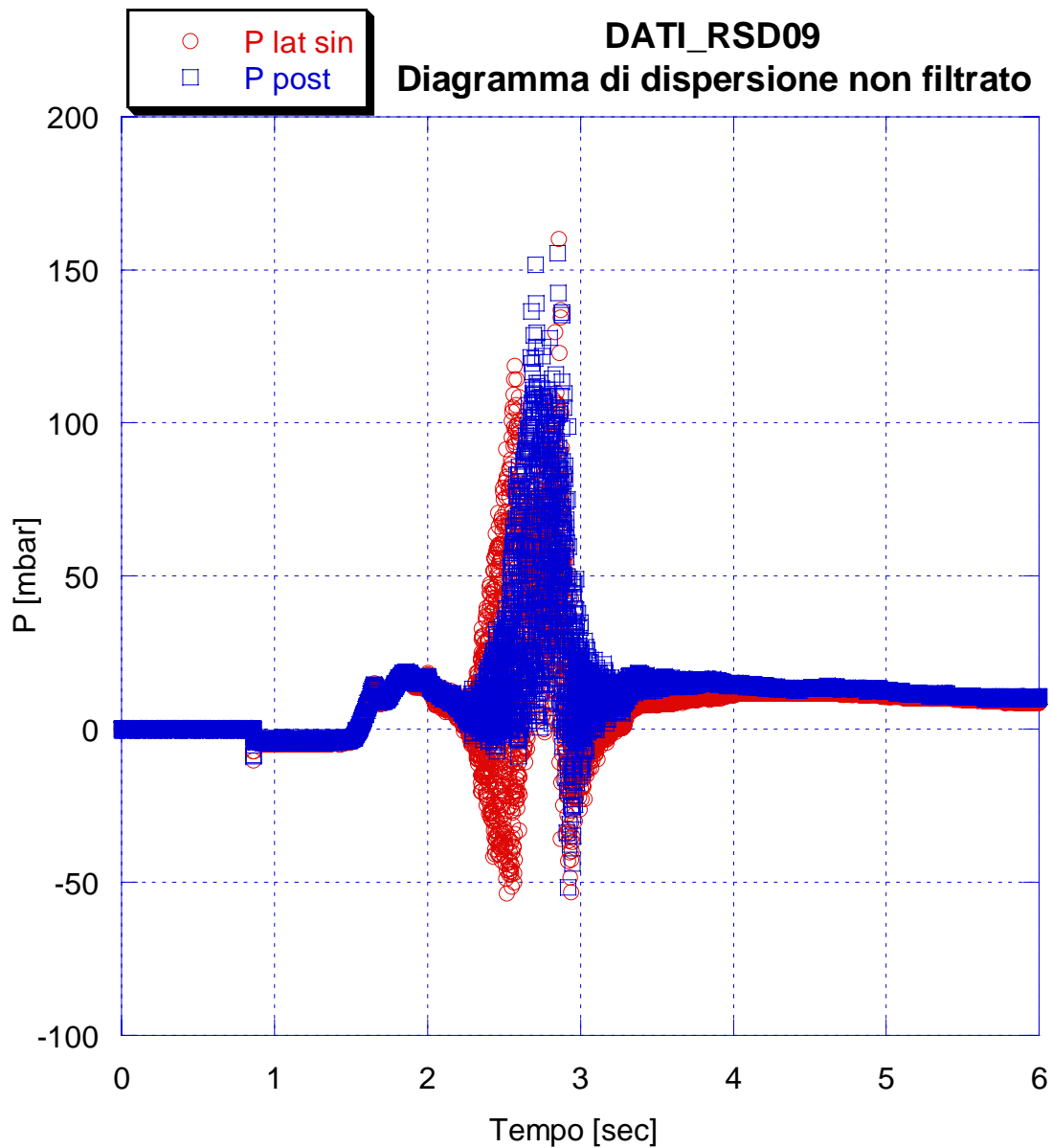




**Fig.5.2.2 Andamento della pressione della prova RSD22 con H2%=12.03 ed  $A_v=2\text{ m}^2$ ; tipico andamento del secondo tipo**

Spesso si nota una evidente differenza tra le pressioni massime misurate dai due rilevatori al crescere della pressione massima di picco; se si passa ad osservare i diagrammi di dispersione si nota che il misuratore che indica la pressione più bassa riporta molti più dati dell'altro nella parte iniziale del picco a pressione negativa; si nota inoltre come il misuratore che mostra la pressione più bassa, che è il laterale sinistro mostra comunque un picco piuttosto ampio e con meno vibrazioni che sembra come tagliato nella parte alta. Al riguardo si fanno due ipotesi. Esso potrebbe avere un qualche problema a seguire il picco pur mostrandone la base, come se andasse in saturazione, per cui se ne suggerisce un controllo; questa ipotesi sarebbe anche avvalorata dal fatto che quando la pressione di picco è più bassa il fenomeno è meno evidente fino a scomparire del tutto. D'altro canto

la posizione dei due rilevatori ed il fatto che nella CVE si manifestano dei fenomeni di pressione ma non delle vere e proprie onde di pressione ed il fatto che questo fenomeno è tanto più evidente quanto più si va su di pressione potrebbe essere legato ad un già notato effetto depressione legato al fatto che nella parete di fronte al rilevatore che legge la pressione più bassa vi è il vent che induce un fenomeno dinamico di soffio verso l'esterno ed aspirazione dall'interno mentre nella parete di fronte al rilevatore che legge il picco più alto vi è una parete di vetro, che resiste al flusso di gas incidente e lo riflette. Riportiamo come esempio tipico il diagramma di dispersione della prova. In ogni caso, visti anche gli altri andamenti, si considererà sempre accettabile come pressione di picco quella più alta tra le due misure. Si nota anche che i due misuratori inizialmente forniscono misure in pratica coincidenti fino al picco principale al crescere del quale si disaccoppiano fornendo il misuratore posteriore delle misure più alte e aumentando sempre il distacco in seguito a questo picco. Dopo il picco principale vi è in tutte le prove un plateau caratterizzato da notevoli oscillazioni intorno ad un valore medio nell'ordine di 10-30 mbar dovuto probabilmente a fiammate di sacche di idrogeno rimaste per l'incompletezza della combustione oltre che a rumore dovuto alla vibrazione della struttura della CVE.



**Fig 5.2.3 Diagramma di dispersione dei dati relativi alla prova RSD09**

Per quanto riguarda la valutazione di  $P_{stat}$  si è assunto che essa è rappresentata dalla massima pressione del primo picco. Quello che accade è che la pressione sale in conseguenza della deflagrazione finché non raggiunge la pressione di rottura del vent; a questo punto il vent si lacera e la fuoriuscita di incombusto ad alta densità tende a farla diminuire. L'incremento della superficie del fronte di fiamma contrasta questo fenomeno

e, ad un certo punto, prevale portando la pressione, che era in diminuzione, a crescere nuovamente.

In questo momento il fronte di fiamma è ancora lontano dal vent e non risente del sensibile aumento di turbolenza che si ha nella zona prossima allo stesso in conseguenza dell'efflusso da questo.

In molte prove si nota un deciso aumento del rumore durante il secondo picco, spesso proprio sul punto di massimo (come si vede meglio nei dati filtrati col Kaleidagraph fino ad ottenere un andamento pulito nei quali in questa zona permangono comunque delle vibrazioni); dopo questo rumore il picco tipicamente resta sostanzialmente stazionario o scema. Dai due filmati delle prove RSD si vedono due fenomenologie diverse: in RSD14 si nota che in corrispondenza di questo rumore il fronte di fiamma è prossimo al vent; in RSD15 si nota che la deflagrazione raggiunge il picco di massima molto prima di avvicinarsi al vent che viene raggiunto solo nel plateau di fine deflagrazione: in questa dunque la pressione scema perché il vent è significativamente aperto ed asporta incombusto portando ad una espansione e raffreddamento del combusto cui consegue l'abbassamento di pressione. Non si è potuti giungere a delle conclusioni certe su  $t_{open}^{(V)}$  per cui si è assunto per questo parametro, ottenendone probabilmente il giusto ordine di grandezza, il tempo che intercorre tra il primo picco, che sicuramente è rappresentativo di  $P_{stat}$ , e l'inizio del rumore di cui si è parlato (quando presente, in alternativa si sostituirà questo al massimo del picco principale) sul picco principale che si è ipotizzato associato all'apertura di una frazione significativa del vent che, come testimoniato dai filmati, sembra si apra completamente solo quando investito dal fronte di fiamma.

In conclusione si riportano nella seguente tabella i valori stimati di  $P_{stat}$ ,  $t_{open}^{(V)}$ , del picco di pressione misurato e di quello previsto dal DEVENT utilizzando tali parametri.

**Tabella 5.2.1 Confronto tra la pressione massima misurata e quella prevista dal  
DEVENT**

<b>A<sub>v</sub> Programmata (m<sup>2</sup>)</b>	<b>Nome prova</b>	<b>A<sub>v</sub> effettiva (m<sup>2</sup>)</b>	<b>P<sub>MAX</sub> Lat.sin. [mbar]</b>	<b>P<sub>MAX</sub> Post. [mbar]</b>	<b>P<sub>stat</sub> Stimata [mbar]</b>	<b>t<sup>(v)</sup><sub>open</sub> Stimato [sec]</b>	<b>P<sub>max</sub> DEVENT [mbar]</b>
0.35	CR08	0.35	271	278	23	0.6	293
0.75	RSD04	0.71	49	61	21	0.45	67
	RSD06	0.71	57	152	22	0.25	68
	RSD08	0.71	87	112	18	0.40	69
	RSD09	0.71	23	52	14	0.3	58
	RSD12	0.71	53	77	18	0.3	66
1	RSD16	1.00	42	50	12	0.40	36
	RSD18	1.00	35	44	14	0.40	36
1.5	RSD19	1.5	16	19	15	0.4	21
	RSD20	1.5	24	32	20	0.5	31
2	RSD21	2	20	22	19	0.4	24
	RSD22	2	19	19	19	0.5	36

Dalla tabella si nota che il DEVENT prevede spesso valori delle pressioni di picco molto vicini a quelli effettivamente osservati ma superiori fino, al massimo, ad una ventina di mbar. Fanno eccezione, rispetto al misuratore posteriore, i due dati relativi alle prove RSD06 ed RSD08 nei quali la previsione del DEVENT è una forte sottostima ed i tre dati relativi alle prove RSD12, RSD16, RSD18 (e di nuovo RSD08 rispetto al misuratore lateale sinistro) nei quali la sottostima è lieve. Probabilmente le lievi sottostime sono correlate ad una sottostima di P<sub>stat</sub> o più sicuramente ad una sovrastima di t<sup>(v)</sup><sub>open</sub>; le forti sottostime delle prove RSD08 e soprattutto RSD06 sono, a nostro avviso, correlate con fenomeni di turbolenza particolarmente elevata; inoltre si sottolinea come in queste due

prove vi siano delle fortissime differenze tra le misure dei due rilevatori di pressione interna: gli altri due misurano infatti 56 mbar per la RSD06 ed 87 mbar per la RSD08, avvicinandosi decisamente ai valori medi delle altre prove a  $0.75 \text{ m}^2$  ed ai valori previsti dal DEVENT. Per quanto riguarda gli andamenti il DEVENT prevede sempre due picchi con dei piccoli talloni od oscillazioni tra il primo ed il secondo; gli andamenti reali sono stati molto vari presentando fino a cinque picchi ben definiti per esempio nella prova RSD21. Inoltre il DEVENT prevede, per  $A_v \geq 1.5 \text{ m}^2$ , che il picco principale sia il primo, in corrispondenza dell'apertura del VENT; tale picco è sempre sovrastimato dal DEVENT, cosa evidente dal fatto che il codice assume che superato  $P_{\text{stat}}$  il vent si apra linearmente partendo da  $A_v=0$  ed influenzando dunque lentamente l'andamento della deflagrazione. In termini di andamento dunque il DEVENT prevede bene quello generale dei due picchi principali, uno legato alla rottura del vent e l'altro al massimo di pressione, ma sovrastima quello legato a  $P_{\text{stat}}$  che diviene il picco principale secondo il codice per  $A_v \geq 1.5 \text{ m}^2$  cosa che nelle misure si riscontra solo nella prova RSD22 anche se in tutte le prove che soddisfano tale condizione su  $A_v$  il primo picco raggiunge sempre una pressione prossima a quella massima.

Si nota che nelle prove a  $0.75 \text{ m}^2$  si sono avute delle pressioni che vanno da 50 a 150 mbar e che almeno uno dei due trasduttori ha sempre rilevato una pressione tra i 50 e gli 80 mbar.

Riportiamo qui di seguito una tabella in cui si mostra, come programmato, il coefficiente di correzione turbolento necessario a rendere conservativo il DEVENT ponendo in tutte le prove la concentrazione nominale del 12%vol,  $P_{\text{stat}}$  pari a 20 mbar e  $t_{\text{open}}^{(V)}$  pari a 0.4 sec.

**Tabella 5.2.2 Valutazione dei coefficienti di correzione turbolenta per il DEVENT  
nelle prove RSD**

<b>A<sub>v</sub> Programmata (m<sup>2</sup>)</b>	<b>Nome prova</b>	<b>A<sub>v</sub> effettiva (m<sup>2</sup>)</b>	<b>P<sub>MAX</sub> misurata [mbar]</b>	<b>Coeff. di corr. turbolenta</b>	<b>P<sub>max</sub> DEVENT [mbar]</b>
0.35	CR08	0.35	255	1	293
0.75	RSD04	0.71	61	1	67
	RSD06	0.71	152	1.53	153
	RSD08	0.71	112	1.37	114
	RSD09	0.71	52	1	58
	RSD12	0.71	77	1.14	77
1	RSD16	1.00	50	1.28	51
	RSD18	1.00	47	1.26	49
1.5	RSD19	1.5	20	1	21
	RSD20	1.5	33	1	31
2	RSD21	2	23	1	24
	RSD22	2	19	1	36

### 5.3 CONCLUSIONI SUI RISULTATI DELLE PROVE

In conclusione si è giunti a determinare il valore di  $P_{stat}$  (la pressione di rilascio del dispositivo di chiusura del vent che per noi rappresenta la pressione a cui si lacera la copertura di plastica) che, nelle condizioni operative esaminate, è stimato essere intorno a 20 mbar con uno scostamento medio del 20%. Questo sarà un punto fermo per le eventuali future prove che si dovessero programmare sulla CVE utilizzando un vent realizzato nel medesimo modo. Tuttavia per fare un passo qualitativo in avanti sarebbe opportuno mettere a punto un sistema di chiusura della parete di prova tale da rendere  $P_{stat}$  non più un valore da determinare ma un parametro da scegliere: questo permetterebbe di effettuare prove a  $P_{stat}$  variabile aprendo nuovi orizzonti alle potenzialità della CVE.

Per quanto riguarda l'altra variabile stimata,  $t_{open}^{(V)}$  (cioè il tempo che intercorre tra il momento in cui la pressione interna raggiunge  $P_{stat}$  ed il momento in cui tutta l'area del vent è disponibile per l'efflusso dei gas), non è stato possibile ottenere un ragionevole grado di confidenza sul suo valore. Si pensava di poter valutare tale parametro basandosi sui filmati, ma attraverso questa strada non si è riusciti ad ottenere risultati soddisfacenti. La stima che ne è stata fatta si è basata sui dati sperimentali, dove si è cercato di osservare una qualche variazione negli andamenti della pressione per ottenere un punto di riferimento. Si è scelto di stimare tale parametro sulla base di un particolare, l'instaurarsi di una maggiore vibrazione nell'andamento della pressione, non tanto perché direttamente collegabile con esso, quanto per il fatto che il DEVENT forniva un accettabile accordo con i dati sperimentali utilizzando tale stima. In effetti riflettendo sul fenomeno e sulla struttura del vent in plastica si può ipotizzare che esso, non aprendosi rigidamente, si apre probabilmente in modo non lineare presentando inizialmente una lacerazione di dimensione non fissa. Non è possibile determinare quale frazione del vent sia ormai aperta quando questo, come si vede nei filmati, viene investito dalla fiamma e distrutto completamente per effetti termici. Il valore di  $t_{open}^{(V)}$  è stato stimato, per l'uso nel DEVENT, nell'intorno dei 0.4 sec. Utilizzando tali valori per i due parametri necessari al funzionamento del DEVENT si ottengono stime della pressione nella CVE che sono,



eccetto che per la prova RSD08, sempre maggiori delle misure di uno dei due rilevatori interni, quello laterale sinistro, con scarto massimo inferiori a 20 mbar. L'altro rilevatore presenta misure più alte probabilmente in relazione al fatto che è posto di fronte alla parete senza vent; in cinque prove tali misure superano le previsioni del DEVENT. Il massimo coefficiente di correzione turbolento da utilizzare per ottenere la conservatività del DEVENT rispetto alle prove di questa campagna è pari ad 1.53 in accordo con le grandi dimensioni della CVE che possono indurre una notevole turbolenza durante l'efflusso dei gas. Per quanto riguarda gli andamenti il DEVENT presenta il suo che, spesso, approssima la linea principale degli andamenti sperimentali nei quali però si trovano tutta una serie di oscillazioni e di picchi non principali che esso non può prevedere. Le dimensioni della CVE portano ad una variabilità delle condizioni che si instaurano in essa durante la deflagrazione da cui deriva una complessità fenomenologia notevole e dunque una maggiore difficoltà di analisi legata alle diverse possibilità che tali dimensioni offrono all'evoluzione della deflagrazione. Questa è una delle novità principali della CVE: in questa campagna il doppio picco, che in altre prove effettuate su apparecchiature più piccole era piuttosto difficile da ottenere, è stata la deflagrazione di base.

Per quanto riguarda il DEVENT esso prevede, per tutte le condizioni di prova, due picchi principali con alcuni piccoli talloni nell'andamento dopo il primo dei due nel corso del quale superandosi  $P_{stat}$  si apre il vent. Gli andamenti reali spesso mostrano tre e più picchi ben distinti. Il DEVENT prevede bene l'andamento generale dei due picchi principali, uno legato alla rottura del vent e l'altro al massimo picco di pressione, ma sovrastima quello legato a  $P_{stat}$  che diviene il picco principale secondo il codice per  $A_v \geq 1.5 \text{ m}^2$ , cosa che si riscontra dalle misure solo nella prova RSD22; comunque in tutte le prove che soddisfano tale condizione su  $A_v$  il primo picco raggiunge sempre una pressione prossima a quella massima misurata (vedi tabella 5.2.1, per le prove che soddisfano tale condizione su  $A_v$ , dove  $P_{stat}$  rappresenta la pressione del primo picco e  $P_{max}$  quella massima misurata). In corrispondenza del primo picco il DEVENT prevede, per come è implementato, un superamento di  $P_{stat}$  più o meno accentuato che invece, per come è stato stimato il parametro non può apparire nelle misure.

Dunque le cose su cui ci sembra che sia opportuno indagare ulteriormente saranno legate ad una più approfondita indagine sulla differenza riscontrata nelle misure dei due trasduttori di pressione e sull'esecuzione di altre prove filmate dello stesso genere più focalizzate sul vent per meglio comprendere il fenomeno della sua rottura ed il senso da dare al parametro  $t_{\text{open}}^{(V)}$ . Tutto ciò fermo restando che la messa a punto di un sistema di chiusura del vent che permetta di decidere il valore di  $P_{\text{stat}}$  e della sua inerzia ci sembra la soluzione auspicabile che permetterebbe di fare un passo qualitativo in avanti nelle esperienze con la CVE.

## CAPITOLO VI

### 6.1 MODELLO DI CALCOLO DEL $\Delta P$ DA REALIZZARE

Nel corso delle prove CR si è cercato di migliorare il metodo di calcolo della quantità di idrogeno che fuoriusciva dal sistema di bombole in pressione (vedi figura 2.2.1) al fine di determinare quale fosse il salto di pressione necessario per ottenere una determinata concentrazione nel volume della CVE. La procedura operativa è la stessa che è stata poi utilizzata nelle prove RSD: si stima cioè approssimativamente un salto di pressione da effettuare per ottenere la concentrazione desiderata, si esegue il salto e si confronta la concentrazione voluta con la misura dell'analizzatore di concentrazione. Si passa ad effettuare ulteriori immissioni con la stessa procedura fino a raggiungere la concentrazione desiderata; se risulta necessario effettuare immissioni che darebbero luogo a salti di pressione inferiori ad 1 bar si procede effettuando un'immissione a tempo basandosi sulla misura del flussimetro che trova così la sua applicazione, poiché per la presenza del transitorio e la precisione del misuratore di pressione non è possibile affidarsi a questo in tali circostanze.

Per stimare il salto di pressione da realizzare si è utilizzato il modello di seguito descritto. Esso si è rivelato approssimativo fornendo dei valori di concentrazione attesi nella CVE in base al calcolo attraverso la misura di  $\Delta P$  che erano sempre maggiori di quelli misurati dall'analizzatore di concentrazione, particolarmente per le prove serali come si evince dal confronto riportato sotto per una sessione di prove serale ed una diurna; tale confronto è stato effettuato a posteriori prendendo come riferimento le pressioni iniziali e finali all'equilibrio termico con l'ambiente esterno, poiché durante ogni singola immissione si nota una diminuzione della temperatura delle bombole che dopo il termine della stessa si riporta in equilibrio con l'ambiente esterno con un incremento della pressione delle bombole. Il senso del confronto riportato in tabella è quello di mostrare quale sarebbe stata la concentrazione prevista dal modello che si usa per stimare il salto di pressione da effettuare a seguito di un'ipotetica immissione isoterma che avrebbe portato le bombole

dalla pressione iniziale a quella finale e di evidenziarne la differenza rispetto alla concentrazione effettivamente misurata nella CVE.

**Tabella 6.1.1 Sessione serale,  $V_{\text{bomb}}=160.7 \text{ l}$**

<b>Prova</b>	<b><math>P_{\text{in\_bomb}}</math></b>	<b><math>P_{\text{fin\_bomb}}</math></b>	<b><math>T_{\text{cve}}</math></b>	<b><math>T_{\text{bomb}}</math></b>	<b>% <math>\text{H}_2</math> mis</b>	<b>% <math>\text{H}_2</math> da <math>\Delta P</math></b>
Cr25	188.7	169.7	301.05	302.95	8.86	12.1
Cr26	169.9	145.5	301.95	300.75	12.06	15.7
Cr27	145.5	123.2	302.55	298.45	11.7	14.5
Cr28	123.4	101.6	302.35	296.65	11.9	14.3
Cr29	101.9	80.4	302.15	295.45	12.2	14.1
Cr30	80.5	60.4	302.65	294.37	12.02	13.3
Cr31	60.7	41.4	302.65	293.85	11.85	12.8

**Tabella 6.1.2 Sessione diurna,  $V_{\text{bomb}}=161.9 \text{ l}$**

<b>Prova</b>	<b><math>P_{\text{in\_bomb}}</math></b>	<b><math>P_{\text{fin\_bomb}}</math></b>	<b><math>T_{\text{cve}}</math></b>	<b><math>T_{\text{bomb}}</math></b>	<b>% <math>\text{H}_2</math> mis</b>	<b>% <math>\text{H}_2</math> da <math>\Delta P</math></b>
Cr20	69.8	50.1	307.05	298.53	11.7	13.1
Cr21	50.2	32	313.05	298.25	11.5	12.3
Cr22	32	14.6	314.85	298.12	11.4	11.9
Cr23	42	25.4	319.75	302.75	10.8	11.3
Cr24	25.4	9.3	321.45	300.05	10.66	11.2

Tale modello utilizzava la legge dei gas perfetti ed assumeva che durante l'immissione le trasformazioni nel sistema di bombole e nella CVE fossero isoterme e l'ipotesi che tutto l'idrogeno fuoriuscito dalle bombole si ritrovasse nella CVE. In sostanza dalla legge dei gas perfetti si ricava che:

$$\Delta P_{\text{bomb}} = -x P_{\text{CVE}} \frac{V_{\text{CVE}} T_{\text{bomb}}}{V_{\text{bomb}} T_{\text{CVE}}}$$

dove il significato dei simboli è il seguente:

- $\Delta P_{\text{bomb}}$  è la variazione di pressione nella bombola a seguito dell'immissione;
- $x$  è la frazione volumetrica di idrogeno desiderata nella CVE;
- $P_{\text{CVE}}$  è la pressione nella CVE (pressione atmosferica: per ogni mole di idrogeno che entra nella CVE esce una mole di aria);
- $V_{\text{bomb}}$  è il volume complessivo delle bombole in litri;

- $V_{\text{CVE}}$  è il volume della CVE in litri;
- $T_{\text{CVE}}$  è la temperatura della CVE in K;
- $T_{\text{bomb}}$  è la temperatura delle bombole in K.

Gli errori evidenti in tale modello sono sostanzialmente tre:

1. immettendo idrogeno fino a raggiungere il valore di  $\Delta P_{\text{bomb}}$  pari a quello calcolato per una trasformazione isoterma, si immette una quantità inferiore di  $\text{H}_2$  perchè in realtà la pressione finale si raggiunge prima a causa della diminuzione di temperatura che vi è nella trasformazione politropica reale (come si è notato nelle prove sperimentali)
2. l'approccio usato non tiene in alcun modo in conto di eventuali perdite di idrogeno
3. l'approssimazione dell'idrogeno nelle condizioni delle bombole come gas perfetto

Osservando la tabella si nota che nella CVE l'idrogeno presente è minore di quello che si è calcolato essere fuoriuscito dalle bombole, in accordo col fatto che tutti e tre questi errori portano ad una sovrastima della concentrazione calcolata dal  $\Delta P$ .

## **6.2 LE PROVE RSD E LA MODALITA' OPERATIVA PER L'OTTENIMENTO DELLA CONCENTRAZIONE VOLUTA**

Le prove della campagna RSD sono programmate per essere sempre nell'intorno superiore di una prefissata concentrazione. La procedura operativa di immissione prevede di effettuare per ogni prova più immissioni, sempre sottostimate, fino all'ottenimento della concentrazione voluta basandosi, per il calcolo del  $\Delta P$ , sul modello esposto precedentemente. Si deve sottolineare che l'applicazione della precedente relazione in fase di programmazione della prova indica di effettuare un dato salto di pressione; realizzato questo si è notato che la concentrazione all'interno della CVE è sistematicamente minore di quanto desiderato. A questo punto si programma una nuova immissione nello stesso modo come integrazione alla precedente, a meno che, come detto

prima, il salto da effettuare sia minore di 1 bar, nel qual caso si effettua un'immissione a tempo affidandosi al flussimetro. Le tabelle precedenti valutano quanto idrogeno questo modello prevede che sia uscito dalle bombole utilizzando il salto di pressione che si è misurato alla fine dell'immissione e la mettono a confronto con la concentrazione misurata dall'analizzatore di concentrazione; tale modello, dunque, è inadeguato ad ottenere una precisa concentrazione nella CVE senza avvalersi del confronto con la misura di tale strumento ed è dunque accettabile solo per prove omogenee.

### **6.3 STIMA DELL'ENTITA' DEGLI ERRORI RELATIVI AL MODELLO DI CALCOLO DEL $\Delta P$ DELLE BOMBOLE**

Come ipotesi di sviluppo futuro si potrebbe pensare di effettuare delle deflagrazioni analoghe, come condizioni operative, alle RSD ma in condizioni di disomogeneità per osservare cosa varia rispetto a queste nell'andamento della pressione interna alla CVE e nel valore del picco di pressione; per fare ciò bisogna però essere in grado di valutare correttamente la concentrazione nella CVE senza avvalersi dell'analizzatore di concentrazione. Pertanto si proverà ad effettuare un'analisi del problema dell'immissione e del  $\Delta P$  partendo dai tre errori precedentemente indicati.

Per valutare l'errore massimo correlato con l'ipotesi di gas perfetto si è provato ad interpolare linearmente sulla temperatura e poi sulla pressione i dati ricavati dalle tabelle termodinamiche per l'idrogeno [6]. Tale modo di operare è risultato inaccettabile poiché i dati disponibili sono a pressioni poco "fitte" nel campo di interesse e ciò porta ad inevitabili e pesanti errori di linearizzazione. Ipoteticamente si potrebbe ricorrere ad un'interpolazione logaritmica ma prima di procedere ulteriormente su tale ipotesi si è deciso di confrontare i volumi specifici delle tabelle nei punti esatti in cui questi sono leggibili con quelli calcolati con la legge dei gas perfetti in modo da valutare lo scarto massimo fra i due.

Si riportano nella seguente tabella 1 i volumi specifici per l'idrogeno letti dalla TABLE 3-248B del Perry [6] nel campo di interesse affiancati da quelli previsti dalla legge dei gas perfetti.

La legge dei gas perfetti prevede che:

$$V_{spec} = \frac{RT}{PP_m}$$

dove i simboli che non compaiono precedentemente hanno il significato di:

$V_{spec}$  è il volume specifico dell'idrogeno alla temperatura T e pressione P

$P_m$  è il peso molecolare dell'idrogeno

**Tabella 6.3.1 Confronto tra la legge dei gas perfetti e le tabelle termodinamiche**

Temperatura	300°K, $V_{spec}$ [m <sup>3</sup> /kg]		350°K, $V_{spec}$ [m <sup>3</sup> /kg]	
	$V_{spec}$ tab	$V_{spec}$ Gas perfetti	$V_{spec}$ tab	$V_{spec}$ Gas perfetti
10 bar	1.245	1.2372	1.4510	1.4435
60 bar	0.2136	0.2062	0.2483	0.2406
100 bar	0.1325	0.1237	0.1521	0.1443
200 bar	0.0695	0.0619	0.0801	0.0722

Il volume totale delle bombole è dell'ordine dei 200 litri e le immissioni, volendo raggiungere circa il 12%vol nella CVE, sono dell'ordine dei 15-20 bar. Volendo verificare la legge dei gas perfetti nell'ipotesi peggiore si assume di trovarsi a 300 K (sicuramente più vicino alla temperatura di interesse, che è di circa 30°C, rispetto ai punti a 350 K) ed in un intervallo di pressione tra 200 e 100 bar. In tali condizioni prevedendo un tale  $\Delta P$  circa 6 immissioni lo scarto medio per immissione sarà:

$$\varepsilon = \frac{\left[ \frac{V_{bomb}}{V_{spec200}} - \frac{V_{bomb}}{V_{spec100}} \right] - \left[ \frac{V_{bomb}}{V_{specGP200}} - \frac{V_{bomb}}{V_{specGP100}} \right]}{N_{imm}}$$

$$\varepsilon = -0.041 \text{ Kg}$$

Cioè si effettuerà una maggiorazione media della stima dell'idrogeno uscito dalle bombole di 41 grammi ad immissione pari a circa 20 moli, quantità relativamente significativa essendo le nostre immissioni nell'ordine delle 120 moli, per avere il 12%vol. In sostanza quello che succede è che con l'utilizzo della legge dei gas perfetti si pensa di immettere più idrogeno di quanto effettivamente esce dalle bombole secondo i dati delle tabelle termodinamiche; prendendo come riferimento la concentrazione voluta dunque la legge dei gas perfetti prevedrà di effettuare un salto di pressione più piccolo di quanto necessario.

L'errore precedente è sistematico e dello ordine di grandezza di altri errori casuali presenti. Infatti la sola incertezza del trasduttore di pressione delle bombole, pari a circa 0.6 bar, alle stesse condizioni di temperatura dei calcoli precedenti porterebbe ad un errore di 0.010 kg. Diminuendo il volume totale delle bombole è possibile ridurre efficacemente tale errore mentre non è possibile influire con tale parametro sullo scarto precedente che dipende soprattutto dalla pressione iniziale delle bombole al diminuire della quale migliora l'accuratezza della legge dei gas perfetti.

In vista di ipotetiche prove in cui la misura dell'analizzatore di concentrazione perde il suo ruolo di misura di riferimento potrebbe essere opportuno abbandonare la legge dei gas perfetti e cercare di rivolgersi direttamente ai dati delle tabelle termodinamiche o alla legge dei gas reali ed affidarsi ad un trasduttore di pressione delle bombole più accurato con un'incertezza inferiore.

Vediamo ora di ottenere una qualche stima dell'errore connesso con le perdite di idrogeno. Osservando il sistema bombola nel modello proposto si ipotizzerà che le trasformazioni che esso subisce sono rappresentabili attraverso una politropica durante l'immissione che porta all'espansione ed al raffreddamento del volume di gas presente. Al termine dell'immissione vi sarà un riscaldamento isocoro che porterà la bombola, la cui temperatura si è abbassata durante la politropica, a ristabilire l'equilibrio termico con l'ambiente esterno. Sottolineiamo il fatto che la quantità di idrogeno nelle 4 bombole è dell'ordine dei 3 kg ed il loro peso dell'ordine dei 280 kg (involucro in acciaio, riempimento stabilizzante interno ed idrogeno); data la notevole capacità termica dell'acciaio il salto termico misurato sulla superficie delle bombole non è quantitativamente indicativo dell'escursione termica cui è soggetto l'idrogeno. Dunque il



salto termico cui l'idrogeno è sottoposto è molto più grande della variazione di temperatura misurata sulle bombole.

Il risultato della somma delle due trasformazioni, se le condizioni ambientali esterne non cambiano significativamente durante l'immissione, può essere visto come una trasformazione isoterma ideale che il gas seguirebbe se si effettuasse un'immissione estremamente lenta. Si potrebbe tener conto di eventuali piccole differenze di temperatura tra l'inizio e la fine dell'immissione ma dal momento che quest'ultima influenza le altre grandezze in termini di rapporti tra temperature assolute la differenza sarebbe sostanzialmente irrisoria; per questo motivo si opta per assumere la trasformazione concettuale fittizia lungo questa ideale isoterma che porta dalla pressione iniziale a quella finale ad indicare la variazione della massa presente nelle bombole.

Dalla legge dei gas perfetti si ottiene:

$$n_{H_2 \text{ Prelevato}} = \frac{V_{\text{bomb}} \Delta P}{RT_{\text{bomb}}} = n_{H_2 \text{ immesso}} = n_{\text{perdute\_dalla\_CVE}}$$

$$n_{\text{CVE}} = \frac{V_{\text{CVE}} P_{\text{CVE}}}{RT_{\text{CVE}}} = \text{cost}$$

dove i simboli che non compaiono precedentemente hanno il seguente significato:

- $\Delta P$  è la differenza tra la pressione nelle bombole all'inizio e dopo l'immissione misurata allo stazionario
- $n_{\text{CVE}}$  sono le moli costanti presenti all'interno della CVE
- $n_{H_2 \text{ Prelevato}}$  sono le moli di idrogeno fuoriuscite dalle bombole che sono uguali, per il nostro modello senza perdite di idrogeno, a quelle entrate nella CVE  $n_{H_2 \text{ immesso}}$  e, poiché la  $P_{\text{CVE}}$  risulta costante sono uguali anche, sempre per la stessa ipotesi, alle moli di aria  $n_{\text{perdute\_dalla\_CVE}}$  che fuoriescono dalla CVE

Si può introdurre un fattore di perdite dovute alla circostanza che, durante l'immissione di un volume significativo (tipicamente dell'ordine del 10% del volume della stanza), la CVE non va in pressione per cui perde una quantità di atmosfera pari al volume immesso.

Si considererà che questo volume può essere perso con una concentrazione in idrogeno che va dallo 0%vol H<sub>2</sub> alla concentrazione finale raggiunta nella stanza. Dunque si ipotizzerà che vi possano essere delle perdite di idrogeno proporzionali al volume immesso e quando il fattore di perdita, FP, varierà da 0 ad 1, le perdite saliranno dallo 0% del volume immesso ad una percentuale di tale volume pari alla concentrazione finale nella stanza  $0 \leq n_{H_2 \text{Perduto}} \leq x * n_{\text{Perdute}} = x * n_{H_2 \text{Imnesso}}$ . Allora dalla definizione data di FP,  $n_{H_2 \text{Perduto}} = FP * n_{H_2 \text{Imnesso}}$ . Il fattore di perdita potrebbe comunque andare oltre il valore unitario intendendo che si sta tenendo conto di perdite varie (lungo la linea soprattutto nella zona di alta pressione, dopo l'immissione ecc) che sono state o si ipotizzano essere significative.

In sostanza tutte le perdite presenti vengono modellate attraverso quest'unico fattore di perdita.

La concentrazione nel caso in cui non si abbiano perdite di H<sub>2</sub> si può scrivere in funzione del salto di pressione isoterma:

$$x_{np} = \frac{n_{H_2 \text{ immesso}}}{n_{CVE}} = \frac{\Delta P}{P_{CVE}} \frac{V_{bomb}}{V_{CVE}} \frac{T_{CVE}}{T_{bomb}}$$

Introducendo il fattore di perdita si ottiene

$$x = \frac{n_{H_2 \text{ immesso}} - n_{H_2 \text{ perduto}}}{n_{CVE}} = x_{np}(1 - xFP) = \frac{x_{np}}{1 + x_{np}FP}$$

Da cui per sostituzione

$$x = \frac{\frac{\Delta P}{P_{CVE}} V_{bomb} \frac{T_{CVE}}{T_{bomb}}}{V_{CVE} + \frac{\Delta P}{P_{CVE}} V_{bomb} \frac{T_{CVE}}{T_{bomb}} FP}$$

Dove i simboli non presenti precedentemente o che assumono un nuovo significato sono:

- $x_{np}$  è la %vol senza perdite di idrogeno
- $x$  è la %vol tenendo conto delle perdite di idrogeno proporzionali al volume immesso
- FP è la percentuale di perdite che si hanno sul totale del volume immesso pari ad  $x \cdot V_{CVE}$  ed è espressa come  $FP \cdot x$  per cui se FP assume il valore 0 non ci saranno perdite, 1 ci sarà la perdita di un volume pari a  $x \cdot V_{CVE}$  con una concentrazione di idrogeno pari ad  $x$  e se si vogliono introdurre perdite superiori si deve far crescere FP oltre l'unità.

Valutiamo ora quali sono stati gli FP effettivamente avuti nelle prove CR precedenti e nelle prove RSD. È evidente che tale approccio sarà caratterizzato dal fatto che l'FP che si valuterà sarà cumulativo delle perdite varie e dell'errore connesso con l'uso della legge dei gas perfetti.

FP si valuterà mediante la relazione

$$FP = \frac{\frac{\Delta P}{P_{CVE}} V_{bomb} \frac{T_{CVE}}{T_{Bomb}} - x V_{CVE}}{x \frac{\Delta P}{P_{CVE}} V_{bomb} \frac{T_{CVE}}{T_{Bomb}}}$$

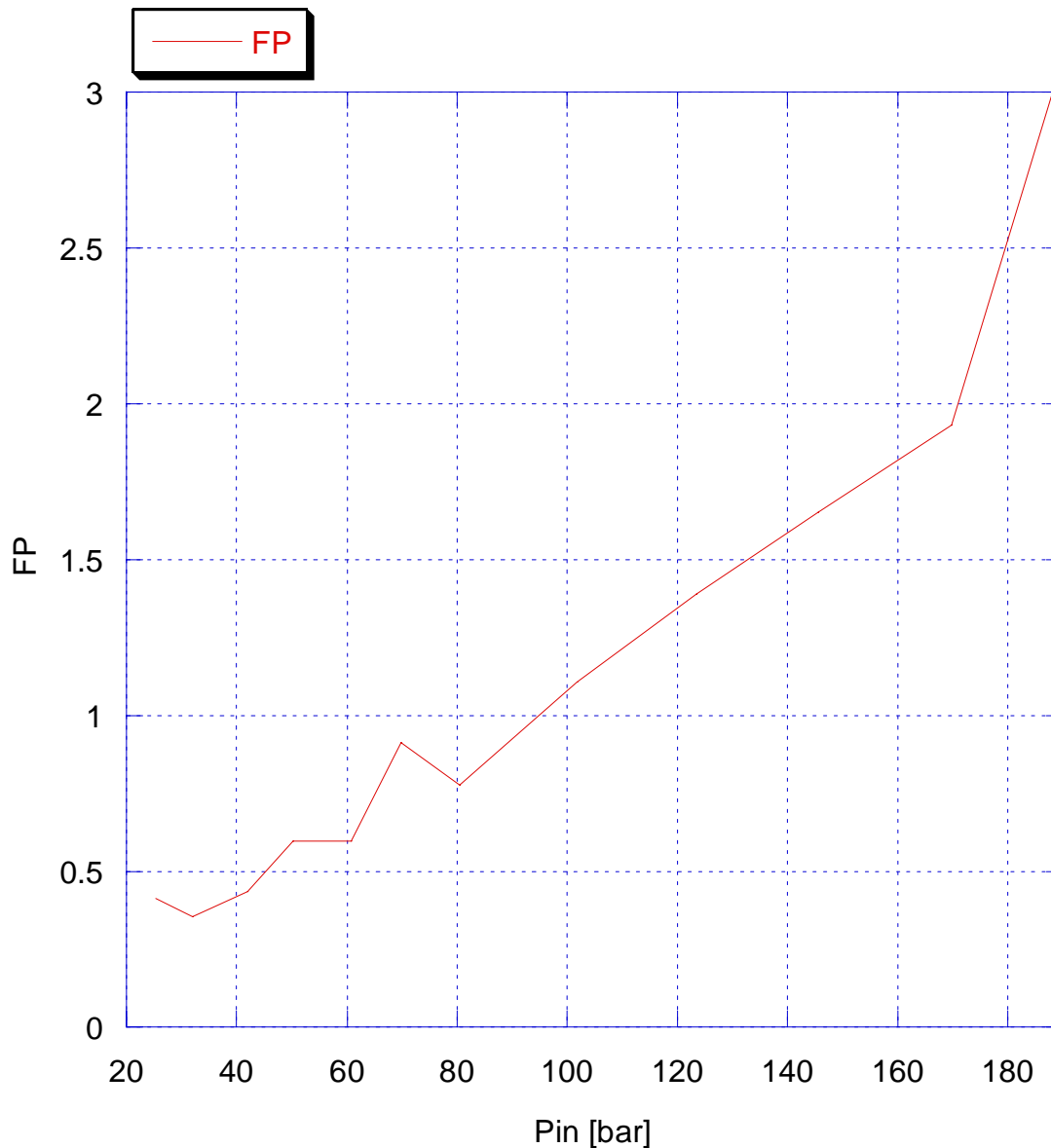
**Tabella 6.3.2 FP relativi a due sessioni di prove, una diurna, prove CR20-24 ed una serale, prove CR25-31**

<b>Prova</b>	<b>FP</b>	<b>P<sub>in_bomb</sub> [bar]</b>
Cr20	0.9130085	69.8
Cr21	0.5984523	50.2
Cr22	0.3545355	32
Cr23	0.4364881	42
Cr24	0.4128996	25.4
Cr25	3.0329718	188.7
Cr26	1.9304952	169.9
Cr27	1.6535044	145.5
Cr28	1.3896423	123.4
Cr29	1.1092158	101.9
Cr30	0.7784962	80.5
Cr31	0.5991413	60.7

Dalle tabella precedente potrebbe sembrare che il fattore di perdita è decisamente superiore nelle prove serali rispetto a quelle diurne, dipendendo fortemente da questo parametro. Tuttavia considerando le altre condizioni di prova si nota che il fattore di perdita mostra una decisa dipendenza dalla pressione iniziale delle bombole come si evince dalla tabella e si mostra nella figura 1 che riporta il fattore di perdita effettivo in funzione della pressione iniziale delle bombole.

**Tabella 6.3.3 Condizioni di prova ed FP per due sessioni di prove, una diurna ed una serale, della campagna CR**

<b>Prova</b>	<b>P<sub>in_bomb</sub></b> <b>[bar]</b>	<b>P<sub>fin_bomb</sub></b> <b>[bar]</b>	<b>T<sub>ceve</sub></b> <b>[K]</b>	<b>T<sub>bomb</sub></b> <b>[K]</b>	<b>%H<sub>2</sub></b> <b>mis</b>	<b>% H<sub>2</sub></b> <b>da ΔP</b>	<b>V<sub>bomb</sub></b> <b>[l]</b>	<b>FP</b>
Cr20	69.8	50.1	307.05	298.53	11.7	12.93	161.9	0.91
Cr21	50.2	32	313.05	298.25	11.5	12.19	161.9	0.60
Cr22	32	14.6	314.85	298.12	11.4	11.72	161.9	0.35
Cr23	42	25.4	319.75	302.75	10.8	11.19	161.9	0.44
Cr24	25.4	9.3	321.45	300.05	10.66	11.00	161.9	0.41
Cr25	188.7	169.7	301.05	302.95	8.86	11.96	160.7	3.03
Cr26	169.9	145.5	301.95	300.75	12.06	15.51	160.7	1.93
Cr27	145.5	123.2	302.55	298.45	11.7	14.32	160.7	1.65
Cr28	123.4	101.6	302.35	296.65	11.9	14.07	160.7	1.39
Cr29	101.9	80.4	302.15	295.45	12.2	13.92	160.7	1.11
Cr30	80.5	60.4	302.65	294.37	12.02	13.09	160.7	0.78
Cr31	60.7	41.4	302.65	293.85	11.85	12.59	160.7	0.60



**Fig. 6.3.1 FP in funzione della pressione iniziale per due sessioni di prove, una serale ed una diurna, della campagna CR.**

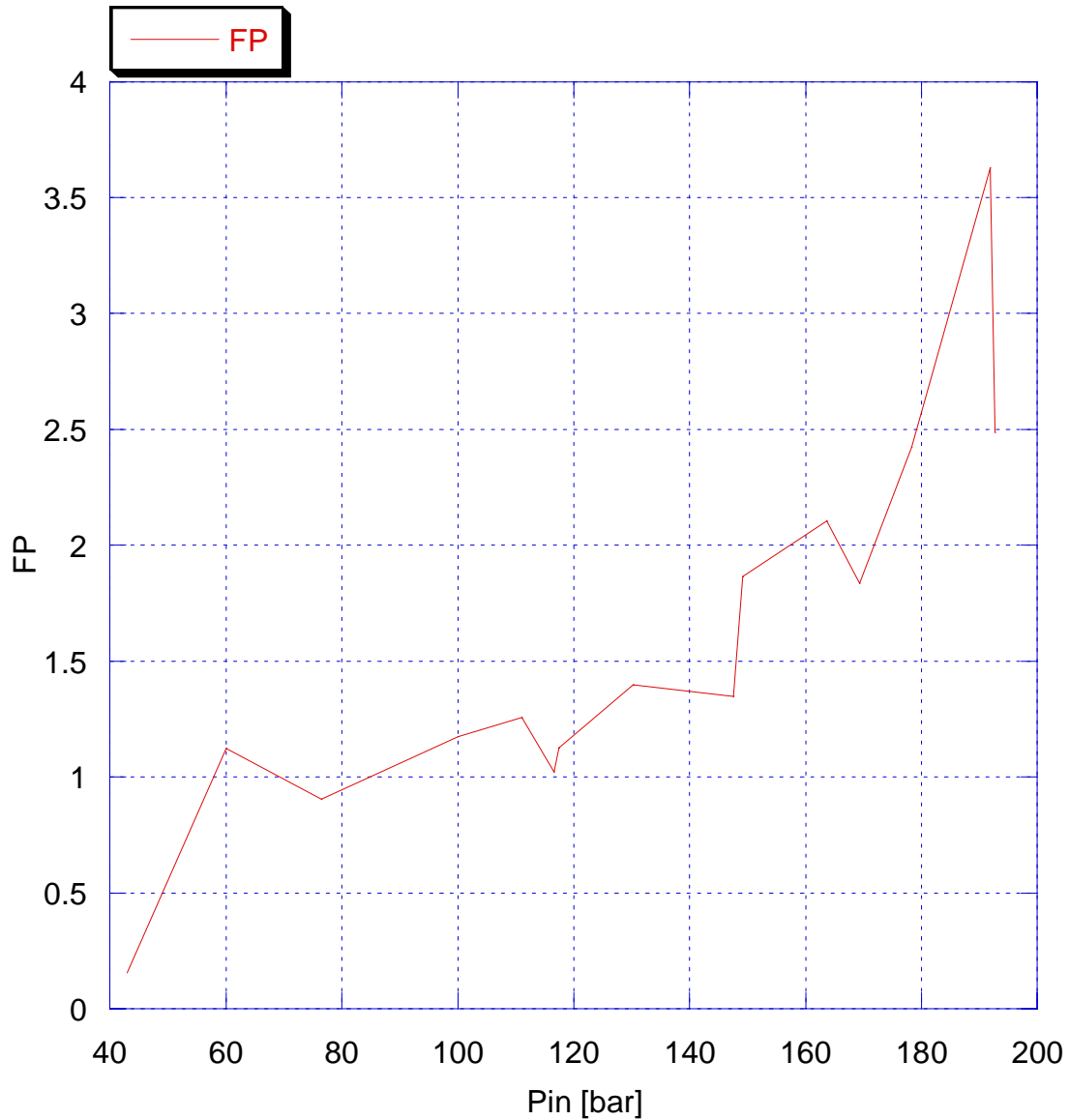
Si nota dunque questa netta dipendenza del fattore di perdita effettivo dalla pressione iniziale delle bombole. Questa evidenza è spiegabile in due modi: o in base al fatto che vi sono delle perdite significative nella zona di alta pressione, che sono decisamente crescenti con la stessa, o in relazione all'approssimazione di gas perfetto che peggiora al crescere della pressione invalidando il modello proposto. Per avvalorare una di queste

due ipotesi sarà necessario fornire una stima delle perdite nella zona di alta pressione.  
Reiterando lo stesso procedimento per le prove RSD si ricava

**Tabella 6.3.4 Calcolo di FP dai dati delle prove RSD**

<b>Prova</b>	<b>P<sub>in_bomb</sub></b> <b>[bar]</b>	<b>P<sub>fin_bomb</sub></b> <b>[bar]</b>	<b>T<sub>cve</sub></b> <b>[K]</b>	<b>T<sub>bomb</sub></b> <b>[K]</b>	<b>%H<sub>2</sub></b> <b>mis</b>	<b>% H<sub>2</sub></b> <b>da ΔP</b>	<b>V<sub>bomb</sub></b> <b>[l]</b>	<b>FP</b>
RSD01	N.D.	N.D.	311.25	303.25	8.25	N.D.	N.D.	N.D.
RSD02	N.D.	N.D.	307.35	301.95	9	N.D.	N.D.	N.D.
RSD03	192.7	168.1	313.75	309.35	11.0	14.95	152	2.49
RSD04	169.3	144.1	312.15	303.65	12.20	15.52	152	1.84
RSD05	147.6	116.6	315.35	307.85	15.30	19.02	152	1.35
RSD06	116.6	93.7	311.45	307.65	12.30	13.89	152	1.02
RSD07	117.45	100.2	313.65	305.25	12.30	14.09	201.7	1.13
RSD08	100	82.6	310.35	302.55	12.30	14.19	201.7	1.17
RSD09	83.5	67.6	N.D.	N.D.	11.9	N.D.	201.7	N.D.
RSD10	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	201.7	N.D.
RSD11	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	11.9	N.D.	201.7	N.D.
RSD12	38.4	23.1	N.D.	N.D.	12.20	N.D.	201.7	N.D.
RSD13	191.9	178.4	299.55	298.95	7.8	10.74	201.4	3.63
RSD14	178.4	163.15	300.25	298.35	9.5	12.18	201.4	2.42
RSD15	163.7	145	300.65	297.95	11.5	14.98	201.4	2.11
RSD16	149.1	129.5	311.25	307.45	12.30	15.75	201.4	1.86
RSD17	130.2	111	310.25	304.35	12.90	15.53	201.4	1.40
RSD18	111	93.4	308.35	304.35	12.15	14.15	201.4	1.26
RSD19	93.4	71.2	N.D.	N.D.	12.20	N.D.	151.3	N.D.
RSD20	76.5	54.75	311.15	303.25	12.00	13.29	151.1	0.91
RSD21	60	43.7	322.15	304.55*	12.00	13.68	201.4	1.12
RSD22	43	28.1	310.95	303.95*	12.03	12.10	201.4	0.16

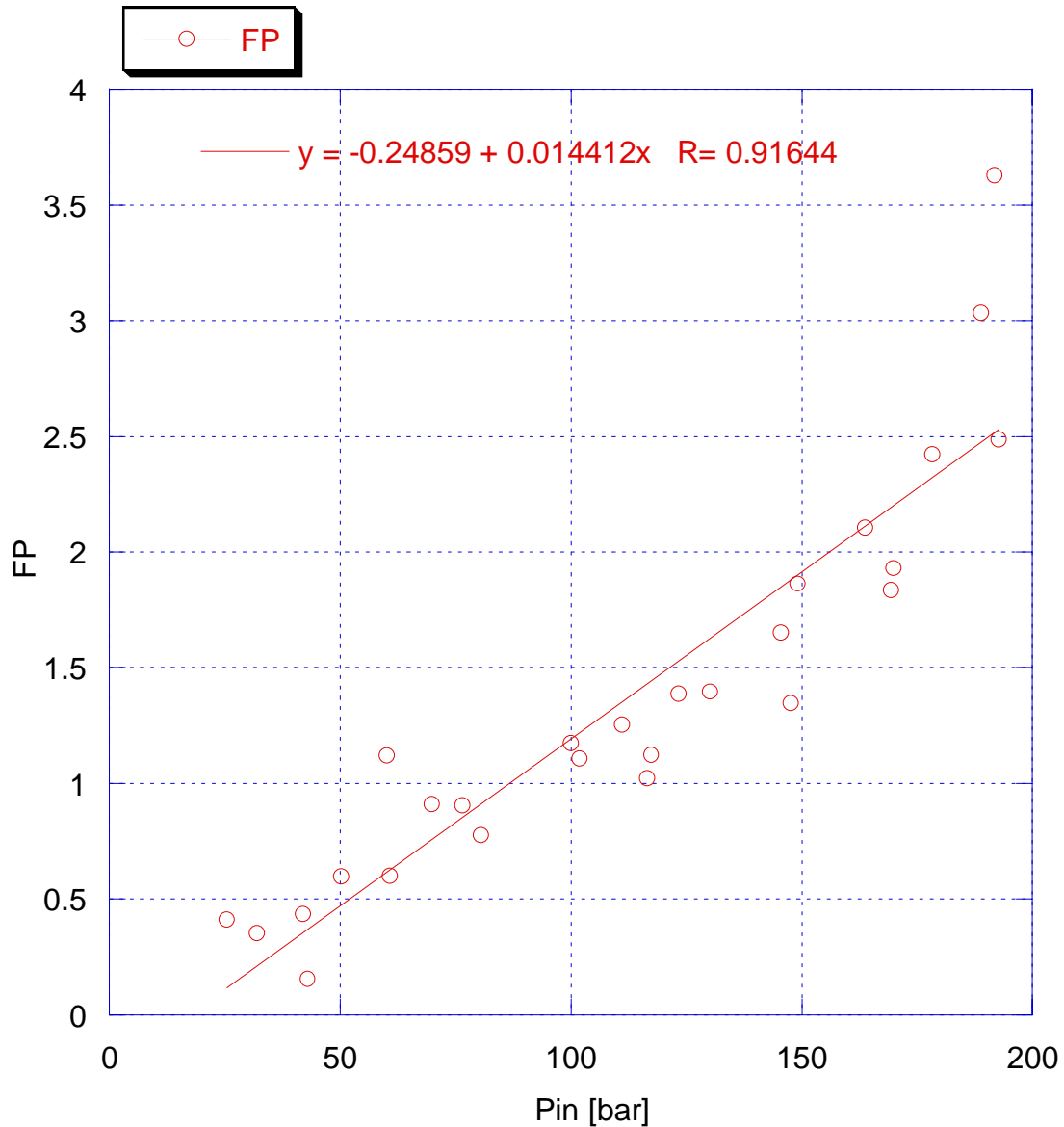
\* Indica che la temperatura riportata nella casella è quella misurata sulla bombola, essendo stato rimesso in funzione correttamente il misuratore ivi presente; le altre prove indicano per tale grandezza la misura in prossimità del flussimetro.



**Fig.6.3.2 FP in funzione della pressione iniziale delle bombole per le prove RSD01-22, diurne e serali**

Dal confronto con i dati sperimentali è possibile ottenere una funzione che rappresenti FP in funzione di  $P_{iniz\_bomb}$ . Metteremo insieme tutti i dati precedenti ed utilizzeremo una approssimazione lineare per ottenere  $FP(P_{in})$ . In figura 4 si illustra graficamente tale linearizzazione ed i dati da cui essa è stata ricavata in forma di dispersione.





**Fig.6.3.4 Linearizzazione di FP in funzione di  $P_{in}$ .**

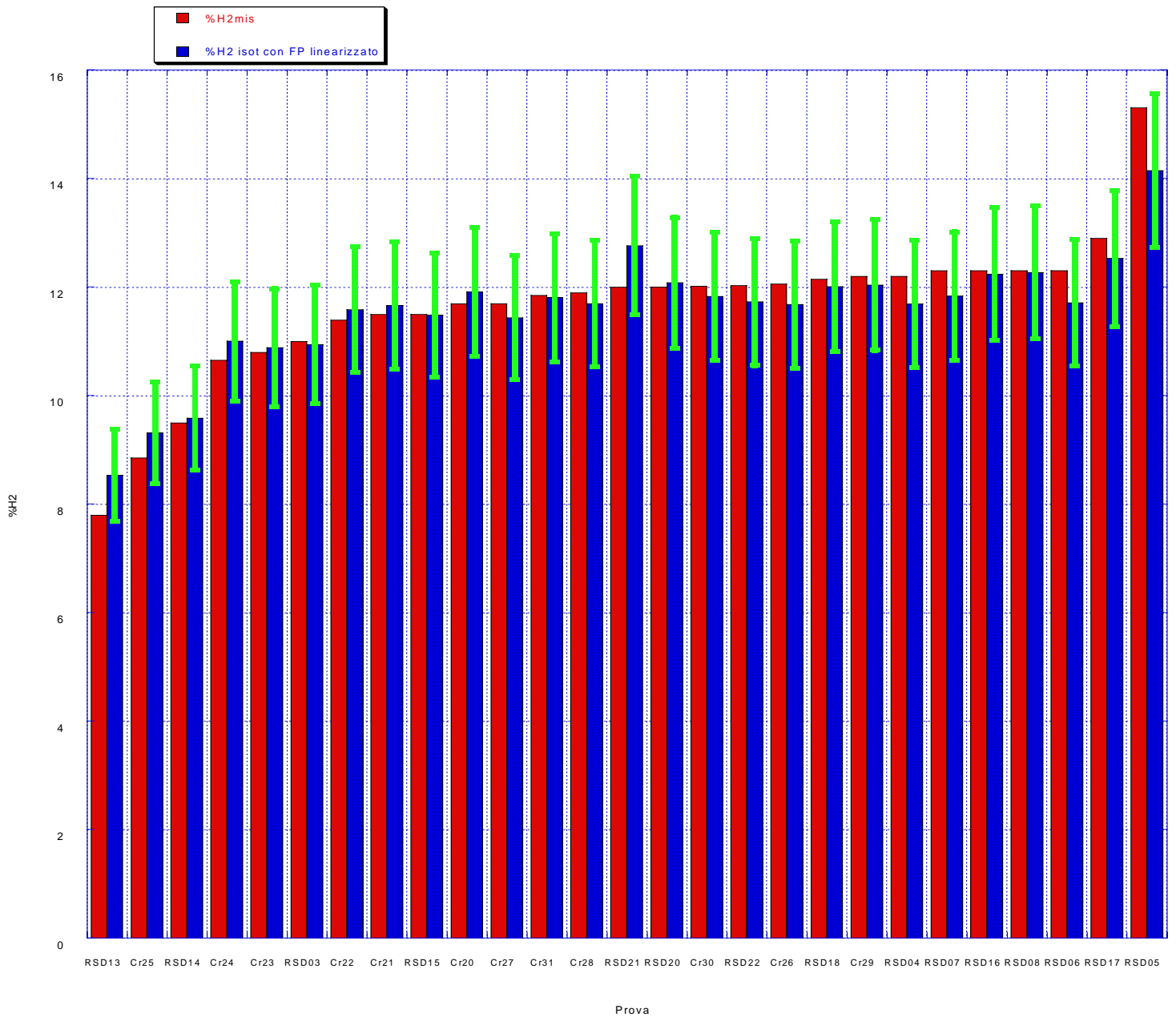
L'equazione che ci fornirà FP in funzione di  $P_{in}$  sarà dunque:

$$FP = -0.24859 + 0.014412P_{in}$$

Ricalcoliamo ora la concentrazione nella CVE utilizzando tale valore per FP ed il modello che tiene conto delle perdite.

**Tabella 6.3.5 Tabella riassuntiva di  $FP_{mis}$  ed  $FP_{calc}$  in base alla linearizzazione  
proposta e di tutti i dati necessari per valutarli per tutte le prove precedentemente  
riportate**

Prova	$P_{in\_bomb}$ [bar]	$P_{fin\_bomb}$ [bar]	$T_{cve}$ [K]	$T_{bomb}$ [K]	%H <sub>2</sub> mis	%H <sub>2</sub> $\Delta P_{NoFP}$	%H <sub>2</sub> $\Delta P_{FP}$	$V_{bomb}$ [l]	$FP_{mis}$	$FP_{calc}$
Cr20	69.8	50.1	307.05	298.53	11.7	12.93	11.92	161.9	0.91	0.76
Cr21	50.2	32	313.05	298.25	11.5	12.19	11.67	161.9	0.60	0.47
Cr22	32	14.6	314.85	298.12	11.4	11.72	11.59	161.9	0.35	0.21
Cr23	42	25.4	319.75	302.75	10.8	11.19	10.89	161.9	0.44	0.36
Cr24	25.4	9.3	321.45	300.05	10.66	11.00	11.01	161.9	0.41	0.12
Cr25	188.7	169.7	301.05	302.95	8.86	11.96	9.32	160.7	3.03	2.47
Cr26	169.9	145.5	301.95	300.75	12.06	15.51	11.68	160.7	1.93	2.20
Cr27	145.5	123.2	302.55	298.45	11.7	14.32	11.44	160.7	1.65	1.85
Cr28	123.4	101.6	302.35	296.65	11.9	14.07	11.70	160.7	1.39	1.53
Cr29	101.9	80.4	302.15	295.45	12.2	13.92	12.04	160.7	1.11	1.22
Cr30	80.5	60.4	302.65	294.37	12.02	13.09	11.83	160.7	0.78	0.91
Cr31	60.7	41.4	302.65	293.85	11.85	12.59	11.81	160.7	0.60	0.63
RSD01	N.D.	N.D.	311.25	303.25	8.25	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.
RSD02	N.D.	N.D.	307.35	301.95	9	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.
RSD03	192.7	168.1	313.75	309.35	11.0	14.95	10.95	152	2.49	2.53
RSD04	169.3	144.1	312.15	303.65	12.20	15.52	11.69	152	1.84	2.19
RSD05	147.6	116.6	315.35	307.85	15.30	19.02	14.15	152	1.35	1.88
RSD06	116.6	93.7	311.45	307.65	12.30	13.89	11.71	152	1.02	1.43
RSD07	117.45	100.2	313.65	305.25	12.30	14.09	11.84	201.7	1.13	1.44
RSD08	100	82.6	310.35	302.55	12.30	14.19	12.27	201.7	1.17	1.19
RSD09	83.5	67.6	N.D.	N.D.	11.9	N.D.	N.D.	201.7	N.D.	0.95
RSD10	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	201.7	N.D.	N.D.
RSD11	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	11.9	N.D.	N.D.	201.7	N.D.	N.D.
RSD12	38.4	23.1	N.D.	N.D.	12.20	N.D.	N.D.	201.7	N.D.	0.30
RSD13	191.9	178.4	299.55	298.95	7.8	10.74	8.54	201.4	3.63	2.52
RSD14	178.4	163.15	300.25	298.35	9.5	12.18	9.59	201.4	2.42	2.32
RSD15	163.7	145	300.65	297.95	11.5	14.98	11.49	201.4	2.11	2.11
RSD16	149.1	129.5	311.25	307.45	12.30	15.75	12.24	201.4	1.86	1.90
RSD17	130.2	111	310.25	304.35	12.90	15.53	12.53	201.4	1.40	1.63
RSD18	111	93.4	308.35	304.35	12.15	14.15	12.01	201.4	1.26	1.35
RSD19	93.4	71.2	N.D.	N.D.	12.20	N.D.	N.D.	151.3	N.D.	1.10
RSD20	76.5	54.75	311.15	303.25	12.00	13.29	12.08	151.1	0.91	0.85
RSD21	60	43.7	322.15	304.55*	12.00	13.68	12.77	201.4	1.12	0.62
RSD22	43	28.1	310.95	303.95*	12.03	12.10	11.73	201.4	0.16	0.37



**Fig. 6.3.5** Istogramma della concentrazione misurata e di quella prevista dal modello isoterma con il fattore di perdita linearizzato; in verde il range del 10% nell'intorno della previsione del modello.

Dalla figura si nota che utilizzando questo modello si riesce a prevedere una concentrazione nella CVE con uno scarto minore del 10% dalla misura dell'analizzatore di concentrazione. Si suggerisce pertanto di provare ad effettuare delle prove di verifica, attraverso delle immissioni omogenee, che questa taratura del sistema sia corretta. Se ciò dovesse essere verificato ci si potrebbe avvalere di tale sistema per calcolare la concentrazione omogenea equivalente delle prove disomogenee a seguito di una monoimmissione dopo aver letto le pressioni stazionarie raggiunte piuttosto che, come suggerito precedentemente, affidarsi alla legge dei gas reali.

## 6.4 STIMA DEL RATEO DI PERDITA DEL CIRCUITO DI IMMISSIONE DELLA CVE

Si è effettuata una prova di tenuta del circuito di immissione. I risultati vengono riportati nella tabella sottostante:

**Tabella 6.4.1 Dati relativi alle perdite dal circuito di immissione della CVE**

$\Delta T=20$ min	Alta P	Bassa P
$P_{iniz}$ [bar]	50	3.5
$P_{fin}$ [bar]	50	1.1
Stima rateo perdita [bar/min]	0	0.12

Si nota che la perdita dalla zona di bassa, resa sicuramente trascurabile dal basso volume specifico del gas, è rilevabile, mentre nella zona di alta, dove i volumi specifici sono molto più alti, non è apprezzabile in tempi dell'ordine delle decine di minuti per cui è sicuramente trascurabile nelle nostre prove. Pertanto l'FP precedentemente calcolato è da ritenersi rappresentativo delle sole perdite dalla CVE durante l'immissione e dell'errore commesso dall'approssimazione di gas perfetto. La relazione precedente che permette di

valutare FP è costituita da un termine costante ed uno proporzionale alla pressione iniziale delle bombole; tali termini possono essere rispettivamente associati alle perdite dalla CVE ed all'approssimazione di gas perfetto essendo il primo un termine costante ed il secondo un termine proporzionale alla pressione iniziale.

## 6.5 PROPOSTA DI UN MODELLO PREDITTIVO PER IL CALCOLO DEL $\Delta P$ NECESSARIO PER OTTENERE UNA CONCENTRAZIONE PREFISSATA NELLA CVE A SEGUITO DI UNA SINGOLA IMMISSIONE

Volendo calcolare a priori rispetto ad una immissione quale dovrebbe essere la pressione finale delle bombole allo stazionario per ottenere una certa concentrazione nella stanza tenendo conto delle perdite, secondo lo stesso modello si avrà:

$$P_{finIsot} = P_i - x \frac{V_{CVE}}{1 - xFP} \frac{P_{CVE}}{T_{CVE}} \frac{T_{bomb}}{V_{bomb}}$$

dove i simboli che non compaiono precedentemente hanno il seguente significato:

- $P_{finIsot}$  è la pressione finale che ci si attende dalla trasformazione isoterma e che si potrebbe utilizzare in modo predittivo facendo un immissione “lenta” dando alla bombola il tempo di tornare in equilibrio con l’ambiente esterno ed effettuando eventualmente una seconda piccola immissione
- $P_{CVEbar}$  è la pressione della CVE espressa in bar per renderla compatibile dimensionalmente con  $P_i$  ed ottenere la  $P_{finIsot}$  nella stessa unità di misura

Tuttavia tale approccio obbliga ad attendere che le bombole si portino all’equilibrio termico prima del termine della fase di immissione e perciò obbligherà ad effettuare sempre immissioni a più stadi. In alcuni casi potrebbe essere necessario od opportuno effettuare una singola immissione; ciò renderebbe questo modello inapplicabile a livello predittivo, essendo applicabile solo a posteriori per valutare quale sia stata la quantità di idrogeno effettivamente immessa una volta che le bombole abbiano raggiunto l’equilibrio termico. Se invece si volesse raggiungere una concentrazione nell’intorno di un certo valore, si potrebbe pensare di effettuare una singola immissione avvalendosi di un modello a trasformazione adiabatica per determinare il salto di pressione da effettuare per poi valutare a posteriori col modello isoterma in modo più accurato la quantità di idrogeno immessa.

Rincuorati in tale approccio anche dal fatto che durante le prove si è notato che la temperatura delle bombole diminuisce durante l'immissione, per poi crescere dopo il termine della stessa fino a riportarsi in equilibrio con l'ambiente esterno in tempi dell'ordine di qualche minuto; osservando il transitorio di temperatura che si ha sulla superficie delle bombole tra inizio e fine di una singola immissione, si può pensare che la politropica reale che avviene all'interno delle bombole durante un'immissione sia meglio approssimabile da un'adiabatica che da una isoterma.

Ipotizzando la validità della legge dei gas perfetti e la trasformazione nelle bombole adiabatica si calcola il volume di idrogeno necessario nella CVE per raggiungere la concentrazione voluta e si valuta il corrispondente volume all'interno delle bombole; a seguito dell'immissione si ipotizza l'espansione adiabatica del gas che resta nelle bombole.

Schematizzando dunque la trasformazione adiabatica del gas nel sistema bombole durante l'immissione in due fasi il modello matematico è:

1. Fuoriuscita dell'idrogeno con diminuzione del volume a temperatura e pressione costante

$$V_{out} = xV_{CVE} \frac{P_{CVE} T_{bomb}}{P_{bomb} T_{CVE}}$$

2. Espansione adiabatica fino al volume iniziale

$$P_{FINbomb} = P_{bomb} \left[ \frac{V_{bomb} - V_{out}}{V_{bomb}} \right]^K$$

dove i simboli che non compaiono precedentemente hanno il significato di:

- $n_{H_2}$  è il numero di moli di idrogeno necessarie nella CVE;
- $R$  è la costante universale dei gas;
- $V_{out}$  è il volume che il numero di moli  $n_{h_2}$  occupa nelle bombole;
- $P_{bombatm}$  è la pressione delle bombole in atmosfere;

- $P_{fin\_bomb}$  è la pressione finale che le bombole raggiungerebbero dopo l'espansione adiabatica;
- $K$  è il rapporto tra i calori specifici a pressione e volume costanti dell'idrogeno,  $C_p$  e  $C_v$ .

Se anche in questo modello introduciamo la possibilità di tener conto delle perdite con una fattore di perdita  $FP$  definito nello stesso modo che in precedenza dovremo semplicemente sostituire nel calcolo di  $V_{out}$  la concentrazione che si avrebbe se le perdite non ci fossero:

$$x = \frac{n_{H_2\text{ immesso}} - n_{H_2\text{ perduto}}}{n_{CVE}} = x_{np}(1 - xFP) = \frac{x_{np}}{1 + x_{np}FP}$$

$$x_{np} = \frac{x}{1 - xFP}$$

$$V_{out} = \frac{x}{1 - xFP} V_{CVE} \frac{P_{CVE} T_{bomb}}{P_{bomb} T_{CVE}}$$

Questo modello, utilizzando la relazione lineare ipotizzata precedentemente per valutare  $FP$ , prevede in accordo con le ipotesi fatte, come si vede dalla seguente tabella 1, delle pressioni di fine immissione più basse di quelle realmente misurate all'equilibrio termico in accordo col fatto che noi abbiamo misurato effettivamente la pressione dell'isoterma equivalente e questa modellazione calcola la pressione dell'adiabatica ideale. Questo modello fornirà quindi una pressione sempre più bassa della politropica reale che sarà in effetti una via di mezzo tra questa previsione e la misura effettuata. Tutto ciò chiaramente filtrato dalla stima che si fa di  $FP$  che potrebbe influenzare questi risultati. Nella tabella inseriamo anche i valori previsti per la pressione finale dall'isoterma tenendo conto dell' $FP$  linearizzato e calcolando tale pressione, in accordo col modello precedentemente esposto, secondo la relazione:

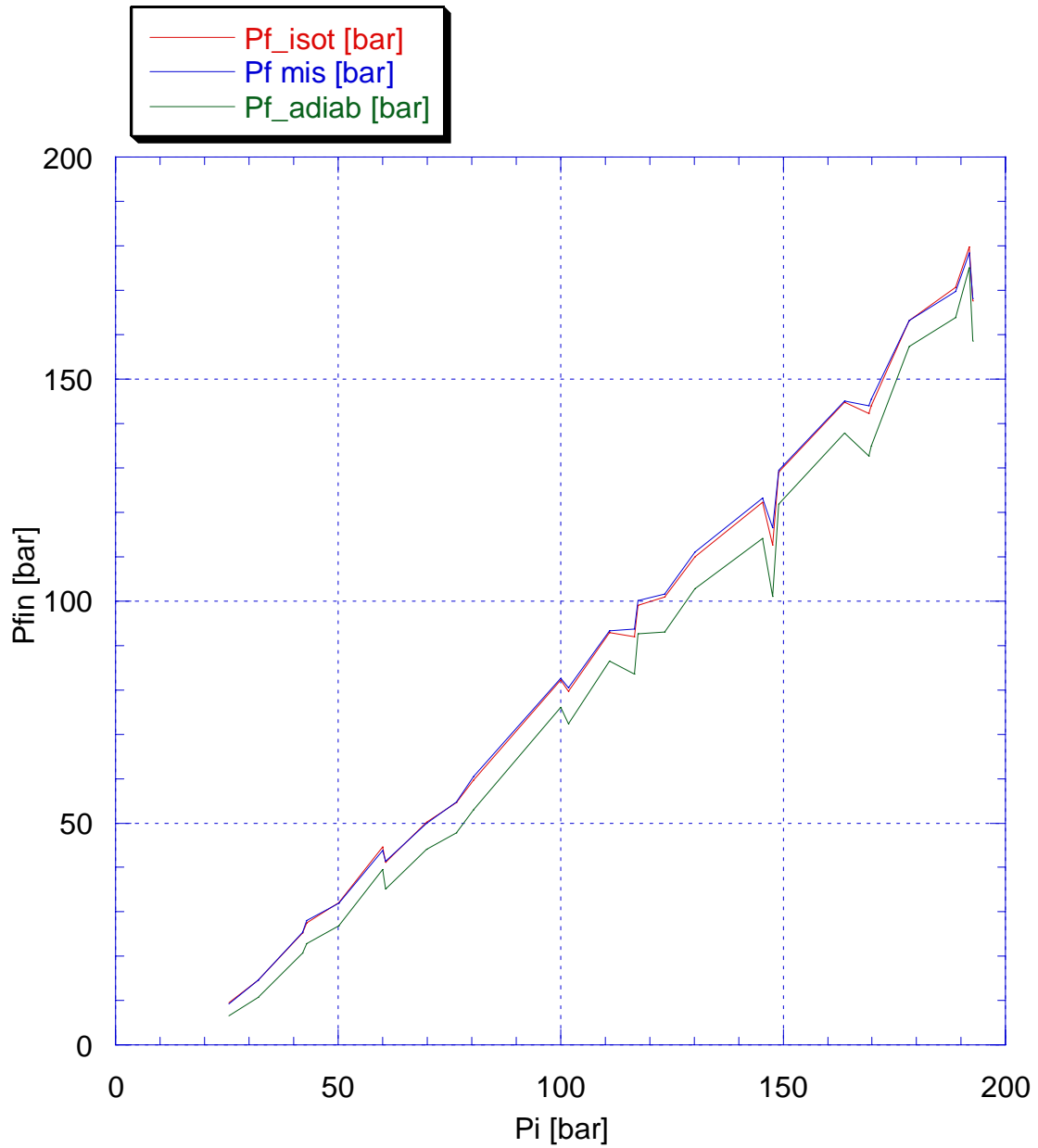
$$P_{fin\_isot} = P_i - \frac{P_{CVE} T_{bomb}}{V_{bomb} T_{CVE}} \frac{x V_{CVE}}{1 - xFP}$$



**Tabella 6.5.1** Tabella riassuntiva di confronto tra  $P_{fin\_bomb}$ ,  $P_{fin\_ADIAB}$  e  $P_{fin\_isot}$

Prova	$P_{in\_bomb}$ [bar]	$T_{eve}$ [K]	$T_{bomb}$ [K]	%H <sub>2</sub> mis	$V_{bomb}$ [l]	$FP_{mis}$	$FP_{calc}$	$P_{fin\_bomb}$ [bar]	$P_{fin\_isot}$ [bar]	$P_{fin\_ADIAB}$ [bar]
Cr20	69.8	307.05	298.53	11.7	161.9	0.91	0.76	50.1	50.24	44.05
Cr21	50.2	313.05	298.25	11.5	161.9	0.60	0.47	32	32.04	26.77
Cr22	32	314.85	298.12	11.4	161.9	0.35	0.21	14.6	14.66	10.73
Cr23	42	319.75	302.75	10.8	161.9	0.44	0.36	25.4	25.33	20.69
Cr24	25.4	321.45	300.05	10.66	161.9	0.41	0.12	9.3	9.61	6.51
Cr25	188.7	301.05	302.95	8.86	160.7	3.03	2.47	169.7	170.68	163.96
Cr26	169.9	301.95	300.75	12.06	160.7	1.93	2.20	145.5	144.08	134.89
Cr27	145.5	302.55	298.45	11.7	160.7	1.65	1.85	123.2	122.25	114.02
Cr28	123.4	302.35	296.65	11.9	160.7	1.39	1.53	101.6	100.86	93.04
Cr29	101.9	302.15	295.45	12.2	160.7	1.11	1.22	80.4	79.77	72.33
Cr30	80.5	302.65	294.37	12.02	160.7	0.78	0.91	60.4	59.77	53.06
Cr31	60.7	302.65	293.85	11.85	160.7	0.60	0.63	41.4	41.08	35.14
RSD01	N.D.	303.25	311.25	8.25	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.
RSD02	N.D.	301.95	307.35	9	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.
RSD03	192.7	309.35	313.75	11.0	152	2.49	2.53	168.1	167.62	158.52
RSD04	169.3	303.65	312.15	12.20	152	1.84	2.19	144.1	142.26	132.69
RSD05	147.6	307.85	315.35	15.30	152	1.35	1.88	116.6	112.61	101.06
RSD06	116.6	307.65	311.45	12.30	152	1.02	1.43	93.7	91.98	83.66
RSD07	117.45	305.25	313.65	12.30	201.7	1.13	1.44	100.2	99.14	92.64
RSD08	100	302.55	310.35	12.30	201.7	1.17	1.19	82.6	82.32	76.16
RSD09	83.5	N.D.	N.D.	11.9	201.7	N.D.	0.95	67.6	N.D.	N.D.
RSD10	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	201.7	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.
RSD11	N.D.	N.D.	N.D.	11.9	201.7	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.
RSD12	38.4	N.D.	N.D.	12.20	201.7	N.D.	0.30	23.1	N.D.	N.D.
RSD13	191.9	298.95	299.55	7.8	201.4	3.63	2.52	178.4	179.70	175.03
RSD14	178.4	298.35	300.25	9.5	201.4	2.42	2.32	163.15	163.14	157.41
RSD15	163.7	297.95	300.65	11.5	201.4	2.11	2.11	145	144.74	137.78
RSD16	149.1	307.45	311.25	12.30	201.4	1.86	1.90	129.5	129.12	121.90
RSD17	130.2	304.35	310.25	12.90	201.4	1.40	1.63	111	110.02	102.85
RSD18	111	304.35	308.35	12.15	201.4	1.26	1.35	93.4	92.92	86.55
RSD19	93.4	N.D.	N.D.	12.20	151.3	N.D.	1.10	71.2	N.D.	N.D.
RSD20	76.5	303.25	311.15	12.00	151.1	0.91	0.85	54.75	54.62	47.73
RSD21	60	304.55	322.15	12.00	201.4	1.12	0.62	43.7	44.57	39.57
RSD22	43	303.95	310.95	12.03	201.4	0.16	0.37	28.1	27.49	22.99

Riportiamo in figura 1 le tre pressioni precedentemente calcolate in funzione della pressione iniziale.



**Fig. 6.5.1 Pressione finale misurata e valutata secondo i modelli isoterma ed adiabatico in funzione della pressione iniziale delle bombole utilizzando FP linearizzato.**

Dalla figura si nota la quasi perfetta coincidenza della pressione calcolata secondo il modello isoterma con quella effettivamente misurata poiché quest'ultima è in effetti la pressione all'equilibrio termico e poiché il fattore di perdita FP è stato valutato tramite lo stesso modello per poi essere linearizzato. La pressione finale prevista dal modello adiabatico è, in accordo con le ipotesi dello stesso, sempre minore di quella prevista secondo il modello isoterma e di quella misurata; in effetti tale stima, portando a degli scarti massimi con la misura reale di oltre 10 bar, probabilmente sovrastima eccessivamente l'immissione e questo indica che la nostra immissione politropica è decisamente intermedia tra l'adiabatica e l'isoterma e probabilmente più vicina a quest'ultima.

Per applicare un modello di questo genere sarebbe probabilmente opportuno procedere alla valutazione di un esponente per la politropica migliore di quello dell'adiabatica operando in modo analogo a quanto fatto per valutare FP eseguendo dunque una serie di monoimmissioni e misurando la concentrazione ottenuta.

## **6.6 CONCLUSIONI FINALI SUI MODELLI ESPOSTI**

Riassumendo è possibile, utilizzando il modello isoterma, ottenere una concentrazione programmata nella CVE con un errore inferiore al 10% purché si accetti di effettuare più immissioni fino ad ottenere la pressione isoterma prevista per le bombole; è altresì possibile, sempre con lo stesso modello, a posteriori di un'immissione qualsiasi valutare quale sia la concentrazione di idrogeno nella CVE con un errore dello stesso ordine. Il problema è che se si vuole effettuare una monoimmissione questo modello non è capace di prevedere a che pressione terminarla; in tal caso è comunque possibile stabilire un estremo inferiore ed uno superiore del campo in cui far variare la pressione finale utilizzando rispettivamente il modello adiabatico ed isoterma. Per ottenere un modello predittivo tra questi due estremi si potrebbe pensare di stimare un valore approssimativo dell'esponente della politropica reale in modo analogo a quanto fatto per FP.

Riguardo a quest'ultimo si deve mettere in evidenza il fatto che le stime fatte di FP cumulano le perdite dalla CVE con gli errori dell'approssimazione di gas perfetto.

## 6.7 CONSIDERAZIONI SULLE TRE MISURE DI CONCENTRAZIONE

Consideriamo criticamente le tre misure che permettono di dare le stime dell'immissione per evidenziare gli eventuali scarti ed errori sistematici presenti.

Esse sono la misura dell'analizzatore di concentrazione, quella derivante dal calcolo di massa fuoriuscita dalle bombole e quella derivante dalla misura del flussimetro.

La prima è una misura diretta e può essere influenzata da una erronea calibrazione dello strumento, dalla presenza di un eventuale offset e dagli scostamenti nella situazione reale dai suoi parametri di funzionamento ottimale. La calibrazione prima di ogni sessione di prove e la sua verifica dopo permette di verificare l'ininfluenza dei primi due problemi indicati. Infatti lo strumento presenterà un offset che verrà tolto di procedura all'inizio della calibrazione; in seguito si effettuerà la calibrazione con le bombole 5-15%vol e si verificherà che il punto al 10% vol sia ben riprodotto. Fatto ciò almeno una volta a settimana si potrà eliminare l'offset in ogni sessione di prove. La verifica settimanale permette di controllare se la calibrazione è stata mantenuta; se da tale verifica risultano misure con errori maggiori dello 0.1% vol si procede ad una nuova calibrazione. Durante le prove RSD la procedura operativa prevedeva una verifica della calibrazione settimanale a seguito della quale non si è mai riscontrata una perdita di calibrazione maggiore dello 0.5%vol H<sub>2</sub> a conferma della validità e accuratezza dello strumento. Tale analizzatore, l'MSA TC9010, ha la funzione di rivelare e misurare la differenza fra i valori di conducibilità termica di gas e vapori e di mettere in relazione tali differenze con i componenti di una miscela gassosa. Un filamento metallico sospeso in un gas o vapore e riscaldato da una corrente elettrica, raggiunge la temperatura di equilibrio quando le perdite di calore, per irraggiamento, convezione o conduzione termica, sono uguali al calore generato dall'energia elettrica. La cella a conducibilità termica dello strumento è stata progettata in modo da mantenere pressoché costanti le perdite di calore dovute all'irraggiamento. Così, essa diventa sensibile in modo specifico ai cambiamenti delle caratteristiche di conducibilità termica del gas in cui è immerso il filamento di analisi.

Qualsiasi variazione della temperatura del filamento, causata da un cambiamento della conducibilità termica del gas circostante, provocherà un cambiamento nella relativa resistenza. Le condizioni richieste da un analizzatore a conducibilità termica per analisi di un campione gassoso sono le seguenti:

1. Il campione gassoso deve essere completamente in fase vapore alla temperatura più bassa del sistema di presa e condizionamento. Nel caso che qualche componente condensi, l'analisi può essere falsata.
2. Il valore della conducibilità termica del componente da misurare deve essere sufficientemente diverso da quello dei rimanenti componenti (l'idrogeno, per esempio, ha una  $\lambda_{rel\_aria}=6.968$  a  $0^{\circ}\text{C}$  e  $\lambda_{rel\_aria}=6.803$  a  $100^{\circ}\text{C}$ )
3. La variazione della concentrazione relativa agli altri componenti del campione non dovrà causare un cambiamento, nella conducibilità termica risultante, tale da influenzare l'indicazione del componente da analizzare.

In sostanza lo strumento per funzionare correttamente necessita che il campione venga introdotto ad una temperatura compresa tra  $-10$  e  $+50^{\circ}\text{C}$ , U.R.<90% non condensante e con un flusso nell'intorno del 10% di 1 l/min. La verifica che tali condizioni vengano rispettate si effettua all'inizio di ogni prova leggendo la temperatura della CVE, osservando lo stato delle zeoliti di deumidificazione ed impostando correttamente la potenza della pompa a vuoto, che aspira l'aria dalla CVE e le fa attraversare l'analizzatore di concentrazione, settando così il valore di flusso desiderato. Sottolineiamo che tale flusso viene misurato dallo strumento all'interno del laboratorio dopo aver attraversato circa 27 m di condotti. Esso sarà dunque diverso dal flusso che attraversa l'analizzatore di concentrazione poiché la sua temperatura sarà cambiata. Tuttavia l'entità di tale differenza di temperatura sarà al massimo dell'ordine dei  $10^{\circ}\text{C}$  (per esempio quando nella CVE si raggiungono i  $45^{\circ}\text{C}$  e l'esterno è a  $35$ ) e sicuramente non supererà mai i  $20^{\circ}\text{C}$ ; ciò significa che, secondo la legge dei gas perfetti, il rapporto tra la misura del flussimetro ed il flusso che attraversa l'analizzatore sarà sicuramente minore di  $308.15/328.15=0.94$ , garantendo di essere sempre nel campo di corretto funzionamento dello strumento.

Il calcolo della massa fuoriuscita dalle bombole in termini di concentrazione % omogenea equivalente sarà influenzato dalla presenza di perdite nel circuito e dalla CVE durante e dopo l'immissione, dal gas residuo nel circuito, dalle approssimazioni del modello che si usa per il calcolo dei volumi specifici e dall'eventuale errore connesso con le misure della pressione delle bombole e del volume della CVE.

Delle perdite dalla CVE e del modello di calcolo dei volumi specifici si è già parlato diffusamente in precedenza. Vi saranno delle perdite di tenuta non ben quantificabili nel circuito di immissione e testimoniate dal fatto che lo stesso, se lasciato in pressione, si depressurizza lentamente; come abbiamo visto tali perdite sono assolutamente trascurabili. Sono quantificabili in volumi di 80 l nella zona di bassa e 0.5 l nella zona di alta le perdite dovute al gas residuo nel circuito; parte di tale gas viene compensato durante le immissioni che si effettuano in sequenza senza lavare la linea. L'errore sul volume della CVE, che si pensa lievemente sovrastimato si ritiene trascurabile.

Per quanto riguarda il flussimetro sottolineiamo che esso è stato ricalibrato subito prima dell'inizio della campagna di prove RSD avendo notato la perdita di calibrazione dello stesso all'inizio delle prove CR.

Con la calibrazione ci è stato garantito che questo strumento misura correttamente i normal-litri fluenti quando in esso viene fatto scorrere un flusso inferiore ai 56 l/sec, con una pressione a monte prossima ai 2 bar ed una temperatura del flusso di gas di 20°C. Il problema relativo a questa misura è connesso col fatto che nelle prove non è possibile garantire la costanza di tali parametri e soprattutto settare il valore della temperatura di flusso, determinata sostanzialmente dalla temperatura delle bombole, dalla laminazione che il gas subisce uscendo dalle stesse e dallo scambio di calore con le tubazioni a monte del flussimetro stesso; in ogni caso le condizioni di ingresso del gas sono note potendosi misurare la temperatura del flusso e campionarne la pressione in ingresso.

La portata misurata dal flussimetro si può esprimere con la formula seguente (*cfr. Flow Measurement, D.W. Spitzer; pag.447*) [7]:

$$Q = CA \frac{\sqrt{2gP_g(\rho_g - \rho)}}{\sqrt{\rho\rho_g}}$$

dove:

- Q: portata volumetrica del fluido  
 C : Coefficiente denominato “di scarica” e determinato empiricamente  
 A : Area della sezione ristretta (legata all’altezza e quindi alla posizione della lancetta con formula biunivoca)  
 g : accelerazione di gravità  
 P<sub>g</sub>: peso del galleggiante  
 ρ<sub>g</sub>: densità del galleggiante (corpo solido)  
 ρ : densità del fluido, funzione di temperatura e pressione

Al variare delle condizioni di pressione e temperatura l’unico parametro a variare è ρ.

Chiamando I l’indicazione della lancetta risulta  $A = A(I)$  con legge geometrica nota (quadratica).

In condizioni standard si può perciò scrivere che al variare della portata risulta  $Q = k_{st}I$ , con  $k_{st}$  costante.

La stessa indicazione I, alla p e T generiche corrisponderà però ad un altro valore di portata ( $Q_2$ ):

Si può allora scrivere  $Q_2 = k_2I$ ; esprimiamo  $k_2$  come  $k_2 = k_{st}k^*$ . Sarà di conseguenza  $Q_2 = k^*Q$ , dove Q è il valore letto sullo strumento.

Facendo qualche passaggio si trova:

$$k^* = \sqrt{\frac{\rho_{st} \rho_g - \rho^*}{\rho^* \rho_g - \rho_{st}}}$$

dove:

ρ<sub>st</sub>: densità del fluido in condizioni standard

ρ\* : densità del fluido alla temperatura T e pressione p

Il problema si riconduce quindi alla valutazione del fattore correttivo  $k^*$  in funzione della temperatura e della pressione.

Applicando la legge dei gas perfetti si avrà:

$$\rho = \frac{PP_m}{RT}$$

Dove il significato dei simboli non usati precedentemente è:

$P_m$  è il peso molecolare del gas

R costante universale dei gas

Considerando che il galleggiante è un solido e la sua densità è circa mille volte quella del gas si può scrivere:

$$\frac{\rho_g - \rho^*}{\rho_g - \rho_{st}} \cong 1$$

Per cui

$$k^* = \sqrt{\frac{P^* T_{st}}{P_{st} T^*}}$$

In definitiva il flusso reale:

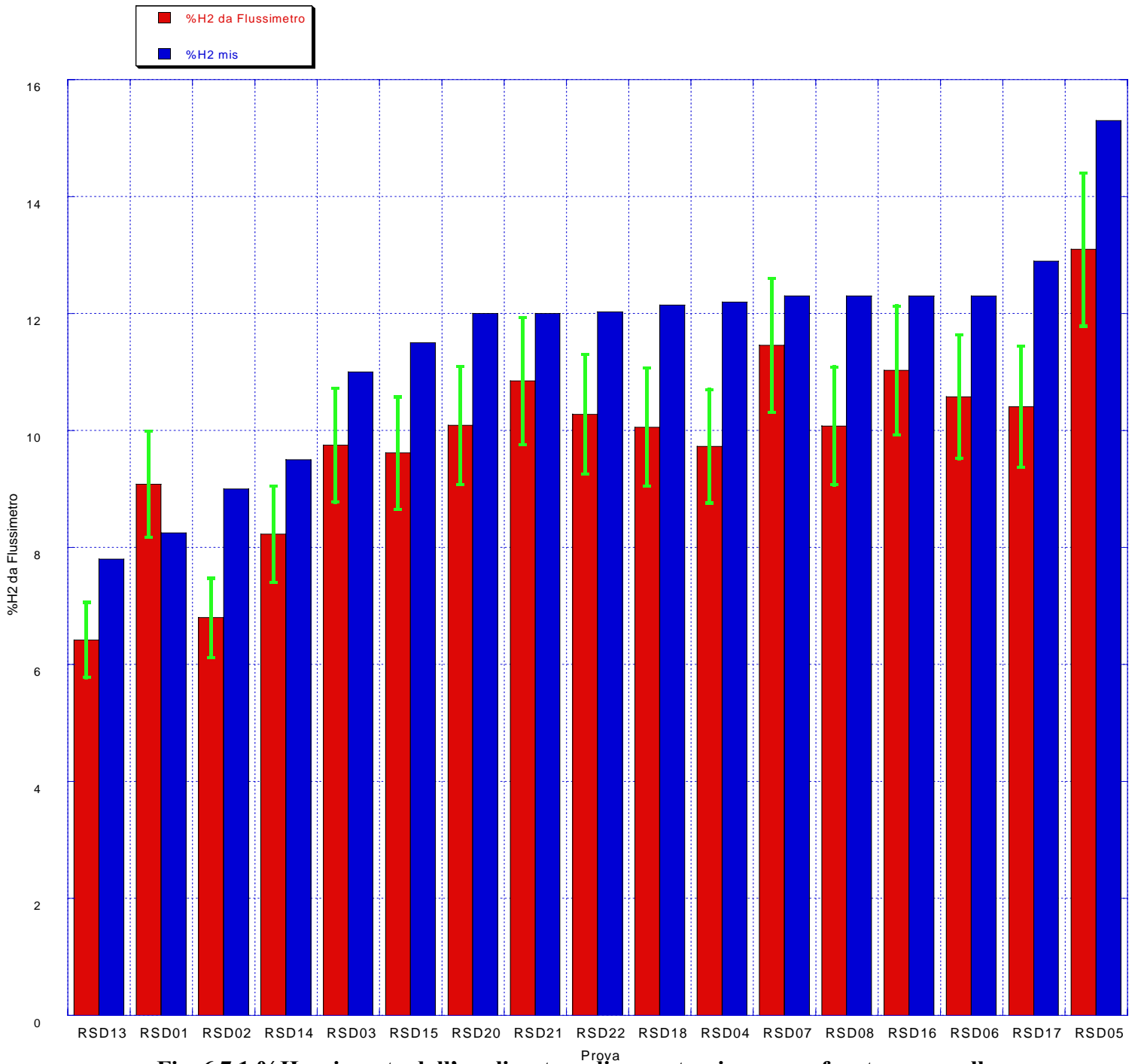
$$Q_{real} = Q_{mis} K^*$$

Riportiamo nella seguente tabella la quantità di idrogeno fuoriuscita dalle bombole valutata attraverso questa correzione sul dato proveniente dal flussimetro per le prove della serie RSD considerando che abbiamo una sola misura della temperatura del flusso che si ipotizza resti costante durante l'immissione, e la misura della pressione a monte del flussimetro acquisita a 5 hz da cui estrapoliamo una pressione media durante l'immissione. Tale pressione, come la misura di flusso, sono state estrapolate prendendo a riferimento i soli dati per i quali la portata superava gli 1.2 l/sec. La pressione e la temperatura di riferimento, cioè quelle indicate sul certificato di taratura dello strumento, sono rispettivamente pari a 2 bar relativi ed a 293.45 K.



**Tabella 6.7.1 Volume di idrogeno misurato dal flussimetro**

<b>Prova</b>	<b>P<sub>in_bomb</sub> [bar]</b>	<b>P<sub>fin_bomb</sub> [bar]</b>	<b>T<sub>cve</sub> [K]</b>	<b>T<sub>fluss</sub> [K]</b>	<b>Q<sub>mis</sub> [nl]</b>	<b>Q<sub>corretta</sub> a T<sub>cve</sub> [l]</b>	<b>%H<sub>2</sub> mis</b>	<b>%H<sub>2</sub> Fluss</b>	<b>V<sub>bomb</sub> [l]</b>
RSD01	N.D.	N.D.	311.25	303.25	2172.8	2413.00	8.25	9.08	N.D.
RSD02	N.D.	N.D.	307.35	301.95	1652.6	1783.67	9	6.80	N.D.
RSD03	192.7	168.1	313.75	309.35	2320.8	2610.71	11.0	9.75	152
RSD04	169.3	144.1	312.15	303.65	2339.0	2591.27	12.20	9.73	152
RSD05	147.6	116.6	315.35	307.85	3164.8	3525.18	15.30	13.10	152
RSD06	116.6	93.7	311.45	307.65	2583.6	2812.74	12.30	10.58	152
RSD07	117.45	100.2	313.65	305.25	2802.8	3067.50	12.30	11.46	201.7
RSD08	100	82.6	310.35	302.55	2476.6	2668.93	12.30	10.08	201.7
RSD09	83.5	67.6	N.D.	N.D.	2444.8	N.D.	11.9	10.01	201.7
RSD10	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	201.7
RSD11	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	11.9	N.D.	201.7
RSD12	38.4	23.1	N.D.	N.D.	2488.0	N.D.	12.20	10.18	201.7
RSD13	191.9	178.4	299.55	298.95	1620.3	1640.54	7.8	6.42	201.4
RSD14	178.4	163.15	300.25	298.35	2040.2	2110.08	9.5	8.23	201.4
RSD15	163.7	145	300.65	297.95	2396.2	2468.68	11.5	9.62	201.4
RSD16	149.1	129.5	311.25	307.45	2702.4	2928.94	12.30	11.03	201.4
RSD17	130.2	111	310.25	304.35	2603.4	2756.28	12.90	10.41	201.4
RSD18	111	93.4	308.35	304.35	2491.4	2646.60	12.15	10.06	201.4
RSD19	93.4	71.2	N.D.	N.D.	2545.6	N.D.	12.20	10.46	151.3
RSD20	76.5	54.75	311.15	303.25	2484.2	2678.40	12.00	10.09	151.1
RSD21	60	43.7	322.15	307.65	2732.0	2983.82	12.00	10.85	201.4
RSD22	43	28.1	310.95	308.05	2562.0	2728.39	12.03	10.28	201.4



**Fig. 6.7.1 %H<sub>2</sub> misurata dall'analizzatore di concentrazione a confronto con quella prevista dal flussimetro; in verde si riporta l'errore del 25% relativo alla % prevista dal flussimetro**

Dalla figura si nota che lo scarto tra la misura di concentrazione e la stessa grandezza prevista dalla misura del flussimetro, introducendo in essa tutte le correzioni eccettuata quella per le perdite, è quasi sempre superiore al 10% raggiungendo spesso il 25%. Si nota anche il fatto che la quantità di idrogeno effettivamente presente nella CVE è superiore a quella prevista dal flussimetro (ad eccezione che nella prova RSD01), ad indicare un errore sistematico dello strumento o della calibrazione dello stesso.

In definitiva la misura derivante da tale strumento risulta inattendibile ed inaccurata. Tuttavia esso si è dimostrato utile quando, come detto precedentemente, dovendo effettuare delle piccole immissioni finali per ottenere la concentrazione voluta che avrebbero dato luogo a salti di pressione prossime alla precisione del trasduttore di pressione, ci si è affidati alla sua misura per effettuare delle immissioni a tempo.

## **BIBLIOGRAFIA**

[1] Alessia Marangon, Stazione di rifornimento di idrogeno gassoso. Aspetti della normativa vigente e messa a punto di un'apparecchiatura per contribuire ad una sua eventuale revisione, Tesi di Laurea in Ingegneria Nucleare, Università degli studi di Pisa, anno accademico 2001-2002.

[2] Alessia Marangon , WP11\_Mitigation UNIPi\_CVE

[3] NFPA 68, Venting of deflagrations, National Fire Protection Association, Inc., Quincy, MA, 1998.

[4] M. Carcassi, F. Fineschi, Devent, Un codice per la valutazione dei transitori generati da deflagrazioni lente in ambienti parzialmente confinati, DCMN, Università di Pisa, RL 415, casa editrice ETS, 1989.

[5]Cristoph Heinz Vented Explosions- Formation and propagation of blast waves

[6] PERRY'S CHEMICAL ENGINEERS' HANDBOOK

[7] Flow Measurement, D.W. Spitzer

[8] NFPA68