

## CONVALIDA DI MODELLI MATEMATICI DI SIMULAZIONE DI SCOPPIO MEDIANTE SPERIMENTAZIONI

R. Bonora<sup>1</sup>, R. Panzone<sup>2</sup>, F. Antonello<sup>3</sup>

### Sommario

L'utilizzo di modelli di simulazione è una prassi consolidata nell'analisi dei rischi di incidente nell'ambito di attività industriali o connesse. I risultati forniti, oltre a dare le necessarie informazioni per la classificazione del territorio e per la pianificazione di emergenze, appaiono anche utili indicazioni per i progettisti al fine di prevedere specifiche misure di prevenzione e protezione.

Se si considera l'esigenza di valutare preventivamente situazioni di pericolo connesse alla presenza di sostanze che possono dar luogo a scoppio o esplosione, quest'ultimo aspetto riguarda molteplici attività, anche più comuni e diffuse rispetto a quelle denominate "a rischio di incidente rilevante": dalle manifatture ai laboratori di ricerca e sviluppo, alle strutture ospedaliere (D.M. 18/09/02), ai depositi e magazzini in cui sono presenti recipienti di piccolo volume, per stoccaggio o per lavorazione.

Mentre per i rischi connessi a raffinerie o ad impianti chimici o similari, sono disponibili varie tipologie di modelli che risultano ormai consolidate, anche se migliorabili, risultano scarsi gli strumenti atti a predire o a verificare le conseguenze di scoppi di piccoli recipienti, anche di materiale diverso dall'acciaio.

Lo studio effettuato appare importante anche ai fini delle valutazioni richieste dal D.Lgs. 626/94 e dai successivi aggiornamenti, nell'ambito delle quali è determinante la stima degli effetti connessi alla formazione di onde di sovrappressione e di frammenti generati dall'eventuale scoppio di recipienti.

La sperimentazione è consistita nella misurazione della sovrappressione e della distanza di proiezione di frammenti generati dallo scoppio di piccoli recipienti, nel confronto dei risultati con i dati forniti da un modello matematico, nella definizione dei coefficienti più adatti per l'applicabilità del modello, originariamente concepito per scoppi di grandi recipienti, anche ad un settore più esteso, riferito a recipienti di più largo uso ed a ipotesi di scoppio in un vasto campo di attività.

Il risultato permette di estendere l'applicazione del modello ad un'ampia gamma di eventi, fornendo utili indicazioni per lo studio e la definizione di condizioni di sicurezza necessarie a garantire un ambiente di lavoro sicuro.

### 1. INTRODUZIONE

Le prove condotte erano finalizzate alla verifica dell'applicabilità di modelli di calcolo degli effetti connessi allo scoppio di recipienti in pressione [1], [2] ad un settore diverso da quello originariamente previsto dagli autori. I modelli erano stati concepiti, infatti, per la valutazione degli effetti di scoppi di grandi recipienti, mentre si intendeva verificare la possibilità di analizzare anche gli effetti connessi a scoppi di recipienti di piccolo volume.

Questa eventualità, che comunemente si associa a particolari settori di attività, quali l'industria chimica e petrolchimica od a applicazioni particolari quali l'aeronautica o il campo spaziale e militare, riguarda anche settori in cui le dimensioni dei recipienti sono contenute, dall'industria all'artigianato al commercio, sia nel campo della chimica che della meccanica o del settore alimentare, fino al settore dei servizi di formazione e ricerca.

Tra le applicazioni di questi modelli, infatti, va considerato l'ambito dei laboratori, centri di ricerca e sviluppo, impianti pilota e miniplants, ove uno studio preventivo degli effetti di eventuali scoppi di recipienti di piccolo volume appare utile per la definizione di condizioni di sicurezza necessarie a garantire un ambiente di lavoro sicuro, riducendo o eliminando i rischi per il personale e per le strutture, anche in ottemperanza ai dettati della legislazione vigente sulla sicurezza ed igiene del lavoro.

---

<sup>1</sup> Università di Padova, Facoltà di ingegneria chimica Via Marzolo, 9 35131 Padova, 049 8275548 – fax 049 8275555

<sup>2</sup> Comando VVF di Pescara, V.le Pindaro 65127 Pescara, 085 64401

<sup>3</sup> ARTES S.r.l. Analisi rischi e Tecnologie di Ecologia e Sicurezza, Via C. Battisti 2/A 30034 Mirano (VE), 041 5727854 – fax 041 5700402

I modelli risultano originariamente validati anche attraverso sperimentazioni con materiali quali vetro, titanio, acciaio e su recipienti anche di piccolo volume (sfere con volume da 0,5 L ad oltre 100 L), tuttavia le equazioni ed i coefficienti di calcolo sono riferiti a recipienti di notevole volume, in quanto il progetto originale non contemplava il settore dei piccoli recipienti.

Le sperimentazioni fatte sono state finalizzate, pertanto, a due diverse tipologie di verifica:

- 1) valutazione della sovrappressione di picco determinata dallo scoppio in funzione della distanza dal recipiente;
- 2) stima della distanza alla quale sono proiettati i frammenti, sulla base di una valutazione della velocità iniziale con cui i frammenti vengono lanciati nello spazio circostante ed in funzione della traiettoria e dell'angolo di lancio.

## 2. DESCRIZIONE DELLE PROVE

### 2.1 Area di prova

Le prove sono state effettuate in un piazzale con pavimento in calcestruzzo provvisto, su un lato, di barriere in cemento armato alte 2,5m dietro alle quali stavano gli operatori e la strumentazione (Fig. 1).



Fig. 1: vista dell'area di prova

### 2.2 Materiali e strumentazione

Le prove sono state condotte utilizzando recipienti in vetro di capacità 1 L, similmente ad analoghe sperimentazioni svolte in condizioni similari dagli autori del modello di calcolo.

Le modalità seguite sono state:

- pressurizzazione con aria, mediante immissione da una bombola di aria compressa a pressione controllata;
- immissione di miscela aria-metano ed aria-GPL a concentrazione e pressione controllata e successiva deflagrazione mediante innesco dato da un accenditore preventivamente piazzato nel recipiente.

I recipienti erano costituiti da palloni in vetro temperato, dotati di un tappo in teflon sul quale erano state calettate le tenute per il passaggio dei tubi di immissione dei fluidi e dei cavi del trasduttore e dell'innesco (Fig. 2). I palloni venivano fissati mediante un collare ad un sostegno dopo aver tracciato sulla superficie sferica una mappa per l'individuazione del frammento generato dallo scoppio (Fig. 3).



Fig. 2: recipiente usato per le prove



Fig. 3: particolare della mappatura

La suddivisione della superficie del recipiente, con la numerazione delle singole aree, permettendo il riconoscimento dei frammenti reperiti dopo lo scoppio, ha consentito l'individuazione dell'angolo di lancio, quindi la stima dei parametri richiesti dal modello per verificarne l'applicabilità.

In ogni prova sono state misurate le condizioni all'interno del recipiente prima ed al momento dello scoppio, rilevando poi la sovrappressione generata all'esterno dallo scoppio; i parametri relativi alla velocità di proiezione dei frammenti sono stati ricavati sulla base delle dimensioni e peso dei frammenti.

Gli strumenti utilizzati ed i relativi parametri misurati sono:

Tab. 1: strumentazione e parametri misurati

PARAMETRO MISURATO	STRUMENTO	RANGE
Pressione di alimentazione fluidi	manometri	0÷20 bar
Pressione di scoppio	trasduttore Foxboro mod.2290	0÷17,2 bar
Sovrapressione generata dallo scoppio	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ trasduttore Foxboro mod. 1800</li> <li>▪ preamplificatore microfonico B&amp;K mod. 2642</li> <li>▪ fonometro B&amp;K mod. 1282 con visualizzatore e ritenuta del picco registrato collegato a microfono B&amp;K mod. 4136 da ¼" con adattatore tipo UA0035</li> <li>▪ fonometro "General Radio" mod. 1988 con microfono da ½" (caratteristiche analoghe al B&amp;K4136)</li> <li>▪ fonometro General Radio modello 1933 con microfoni da 1/8".</li> </ul>	0÷0,35 bar

Per visualizzare in tempo reale i dati misurati dai trasduttori è stato utilizzato un Display digitale C.P.E. a ritenuta di picco.

Per l'analisi dei dati registrati con i fonometri ed i trasduttori è stato usato un analizzatore B&K mod. 2203.

Per la registrazione dei dati è stato usato un registratore magnetico B&K mod. 7005.

L'analisi della distanza di proiezione dei frammenti è stata effettuata considerando i frammenti più significativi raccolti nell'intorno dell'area di prova, misurandone peso, spessore, superfici e distanza; l'angolo di lancio è stato ricavato dalla mappatura del recipiente.

### 2.3 Descrizione dei modelli

Si sono considerati due effetti caratteristici dello scoppio di recipienti: la propagazione nell'atmosfera della sovrappressione generata dallo scoppio e la proiezione dei pezzi in cui si frammenta il recipiente. I modelli studiati contemplano anche la valutazione della pressione generata dall'esplosione all'interno del recipiente, in base all'energia sviluppata che viene frazionata nelle varie forme di emissione, tuttavia il presente studio si è limitato alla verifica dei due aspetti di seguito dettagliati.

### 2.3.1 Sovrapressione generata dallo scoppio

Le esplosioni confinate, una volta raggiunto il limite di rottura del contenitore, generano una espansione istantanea dei gas compressi che si manifesta come un'onda di pressione che si propaga nell'atmosfera in modo analogo alle onde sonore. Dal momento che la propagazione avviene in tutte le direzioni, una volta note la pressione di scoppio e le caratteristiche chimico-fisiche dei fluidi e del recipiente, è possibile calcolare il picco di sovrapressione generato dallo scoppio in funzione della distanza dal recipiente.

I parametri caratteristici, misurati o calcolati, sono:

- pressione di scoppio ( $P_{s0}$ ) e relativa distanza  $R_0$  dal centro di esplosione (punto da cui si assume generata la sovrapressione, che viene posizionato sulla superficie interna del recipiente);
- picco di sovrapressione ( $P_s$ ) generato a distanza  $R$  dalla sorgente;

Tali parametri sono ricavati in base alla teoria di Hopkinson-Cranz, meglio nota come "scaling law", il cui postulato afferma che l'esplosione di diverse quantità dello stesso esplosivo confezionate nella medesima forma o aventi la stessa geometria producono la stessa onda d'urto ad una distanza proporzionale al rapporto tra le quantità. La relazione che descrive tale teoria, confermata da numerose sperimentazioni ed osservazioni, è la seguente:

$$Z = \frac{R}{\sqrt[3]{E}}$$

Per scopi pratici ed applicativi della teoria ai modelli di calcolo, si è derivata la seguente correlazione:

$$\bar{R} = \frac{(R P_0^{1/3})}{E^{1/3}}$$

dove  $R$  (metri) è la distanza dalla sorgente,  $E$  (kJ) l'energia totale e  $P_0$  (Pascal) la pressione atmosferica.

La grandezza  $\bar{R}$  rappresenta il raggio adimensionalizzato della sfera ideale costituita dall'onda di sovrapressione. nel caso di scoppio di una sfera viene ricavata in base alle seguenti correlazioni.

Le relazioni che contraddistinguono gli altri parametri di un'esplosione sono:

$$\bar{P}_S = \frac{P_S - P_0}{P_0} \quad \text{e} \quad \bar{i} = \frac{i a_0}{E^{1/3} P_0^{2/3}}$$

dove:

$P_S$  = sovrapressione incidente di picco (peak side on)

$i$  = l'impulso

$a_0$  = velocità del suono

mentre  $\bar{P}_S$  ed  $\bar{i}$  sono le grandezze adimensionalizzate.

Sulla scorta di tali relazioni, nel modello oggetto di studio, la distanza "x" dalla superficie del recipiente che scoppia viene pertanto rappresenta con la seguente relazione:

$$\bar{R} = \frac{x}{\left[ \frac{4}{3} \pi r^3 \left( \frac{\left( \frac{P_1}{P_0} - 1 \right)}{\gamma - 1} \right)^{\frac{1}{3}} \right]}$$

dove  $P_1$  è la pressione di scoppio ed  $r$  il raggio del recipiente.

Nota il picco di pressione iniziale  $\bar{P}_S$  (riportato per un ampio spettro di esplosioni nel grafico di Fig. 4), è quindi possibile ricavare la correlazione distanza-sovrapressione.

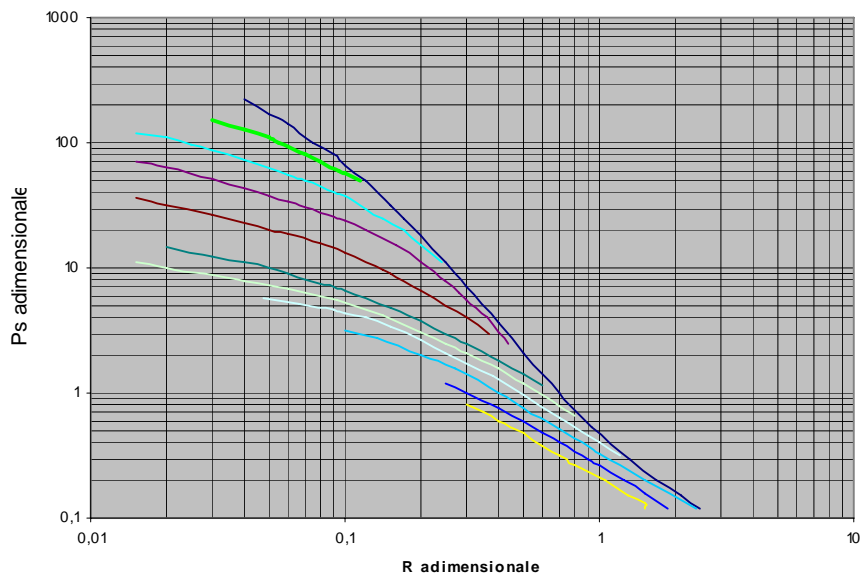


Fig. 4:  $\overline{P_S}$  vs  $\overline{R}$

### 2.3.2 Proiezione dei frammenti

Il secondo obiettivo della sperimentazione consisteva nel ricavare una relazione tra i parametri caratteristici del fenomeno e la distanza alla quale sono proiettati i frammenti del recipiente. Tale relazione viene illustrata, per il modello considerato, da una serie di diagrammi elaborati sulla base di altre sperimentazioni, di cui si riportano due esempi nelle Figg. 5 e 6 seguenti.

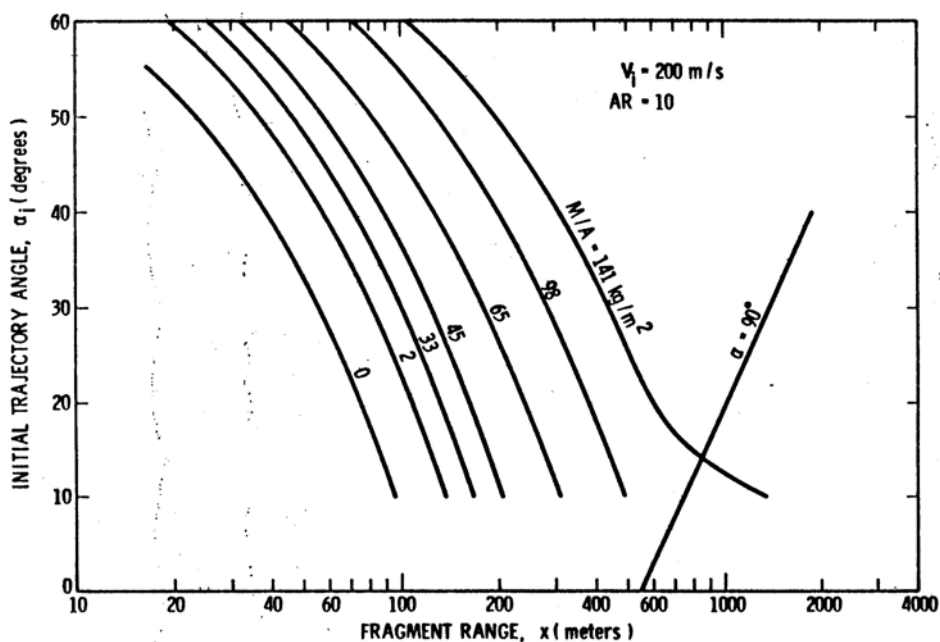


Fig. 5: grafico per la stima della distanza di proiezione frammenti

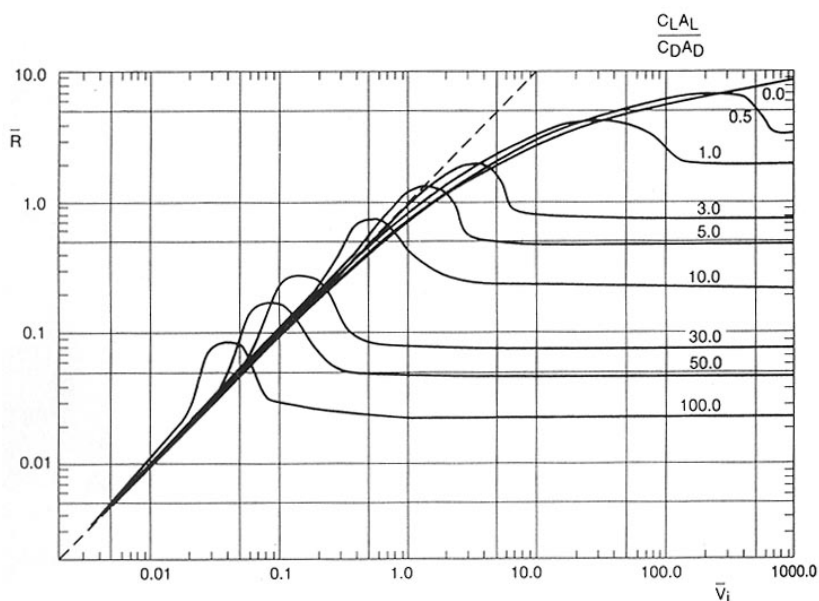


Fig. 6: distanza di proiezione frammenti in funzione della velocità iniziale

dove:

$\alpha$  = angolo iniziale di proiezione del frammento

A = superficie del lato maggiore del frammento

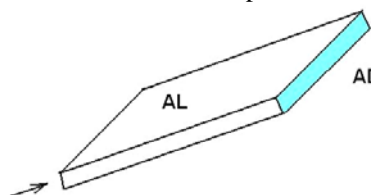
AR = fattore di forma, ricavato da  $d/t$  ( $d$  = diametro equivalente del frammento,  $t$  = spessore del frammento)

M = massa del frammento

$V_i$  = velocità iniziale del frammento

CL e CD = coefficienti aerodinamici (L = lift, D = drag)

AL e AD = superfici caratteristiche del frammento



Tutte le variabili erano ricavabili dalle misurazioni e dalle osservazioni, eccetto la velocità iniziale ( $V_i$ ) per stimare la quale si sono utilizzate le relazioni che stanno alla base di questi grafici.

Nelle valutazioni predittive, infatti, la  $V_i$  è determinata in base ad ipotesi scelte sulla scorta dell'esperienza o di considerazioni cautelative, applicando relazioni illustrate in diagrammi come quello riportato di seguito (Fig. 7), a titolo di esempio.

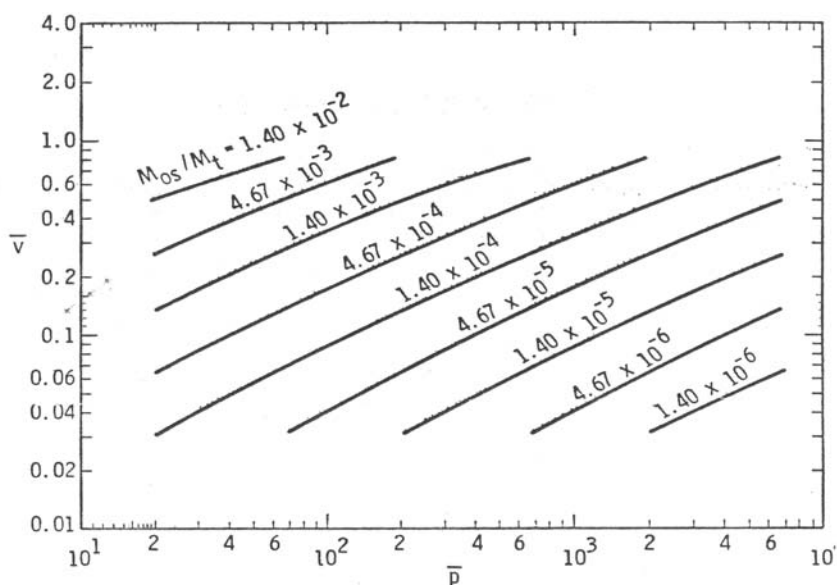


Fig. 7: grafico per la stima della velocità iniziale frammenti

Dove  $M_{0s} / M_t$  è il rapporto tra la massa del fluido contenuto nel recipiente a condizioni ambiente e la massa del recipiente, data dalla seguente relazione:

$$\frac{M_{OS}}{M_t} = \frac{r^3 \rho_f}{[r^3 - (r-t)^3] \rho_m}$$

con:

$r$  = raggio del recipiente

$\rho_f$  = densità del fluido nel recipiente

$\rho_m$  = densità del materiale del recipiente

$\bar{v}$  = velocità iniziale adimensionalizzata =  $V1 / V0$

$\bar{p}$  = pressione di scoppio adimensionalizzata =  $P1 / P0$

Una volta ottenuta la velocità iniziale di frammenti, è stato possibile tracciare le curve relative alla sperimentazione su un diagramma del tipo di quello in Fig. 7, scelto in base al rapporto in  $M_{OS}/M_t$  e verificare se i risultati erano congruenti con i dati esistenti.

### 3. RISULTATI DELLE PROVE

#### 3.1 Verifica della relazione distanza-sovrappressione

I dati delle misurazioni del picco di sovrappressione e della relativa distanza sono stati riportati, previa elaborazione, sul diagramma di Fig. 3 ottenendo la conferma che le condizioni di prova rientravano nel campo di applicazione dei modelli. Le risultanze delle misurazioni ed il confronto con i dati esistenti sono riportate di seguito nelle Figg. 7 – 8 e 9.

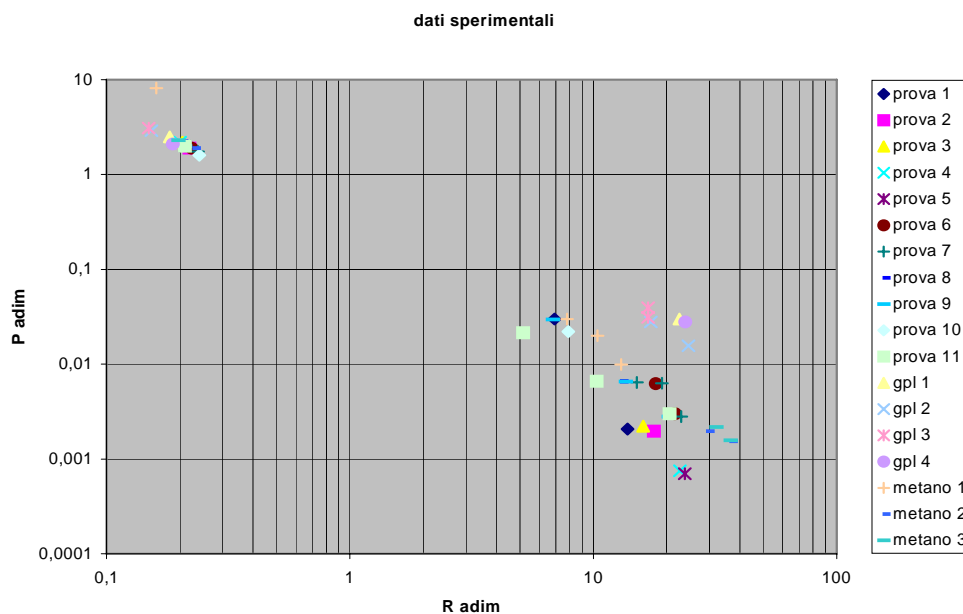
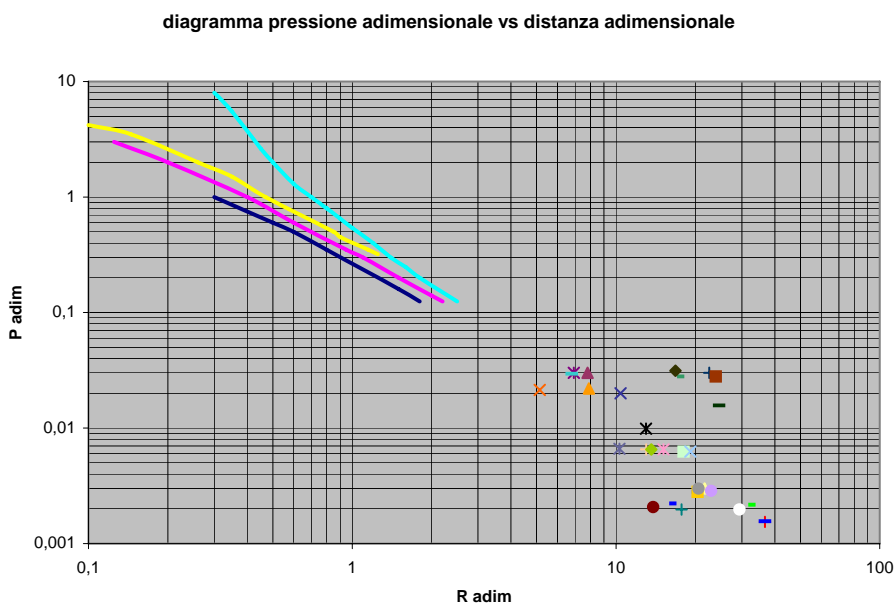
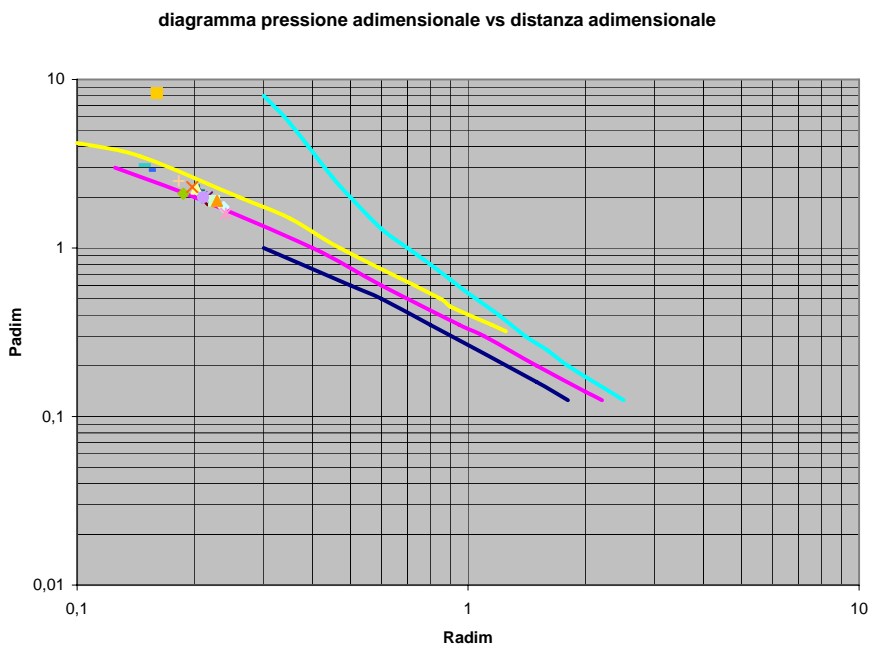


Fig. 7: sintesi delle misurazioni

In alcuni casi, probabilmente per il posizionamento del fonometro di misura del picco di sovrappressione vicino alla sorgente, si sono ricavati valori di  $\bar{R}$  e  $\bar{P}$  piuttosto alti. Per meglio rappresentare i risultati, il confronto con le curve già consolidate viene fatto suddividendo il diagramma di Fig. 3 in due campi di distanza.

Il dettaglio delle misurazioni è riportato nella Tabella 2 in appendice.



In tutti i casi, ma in particolare nel caso di distanze dalla sorgente dell'ordine di oltre una decina di metri, le osservazioni appaiono congruenti con i dati esistenti, confermando la possibilità di applicare il modello anche nel caso dei piccoli recipienti,

### 3.2 Applicabilità delle relazioni di stima della distanza di proiezione frammenti

Dopo aver calcolato i valori dei coefficienti aerodinamici e misurate le grandezze caratteristiche dei frammenti, si è proceduto a valutare la velocità adimensionale  $\bar{V} = \frac{\rho_0 C_D A_D V_i^2}{Mg}$  utilizzando una stima della  $V_i$  ricavata in base alla relazione illustrata nel diagramma della Fig. 10 seguente.



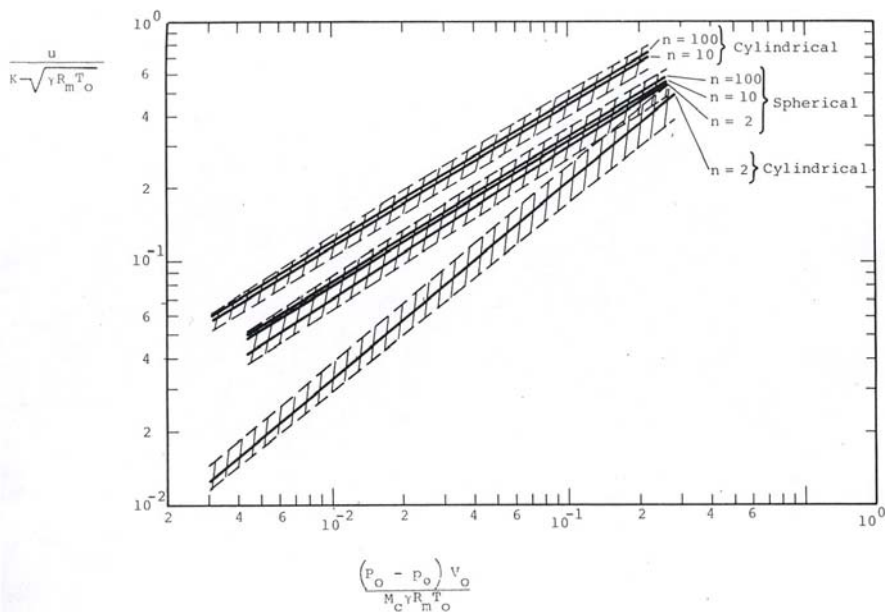
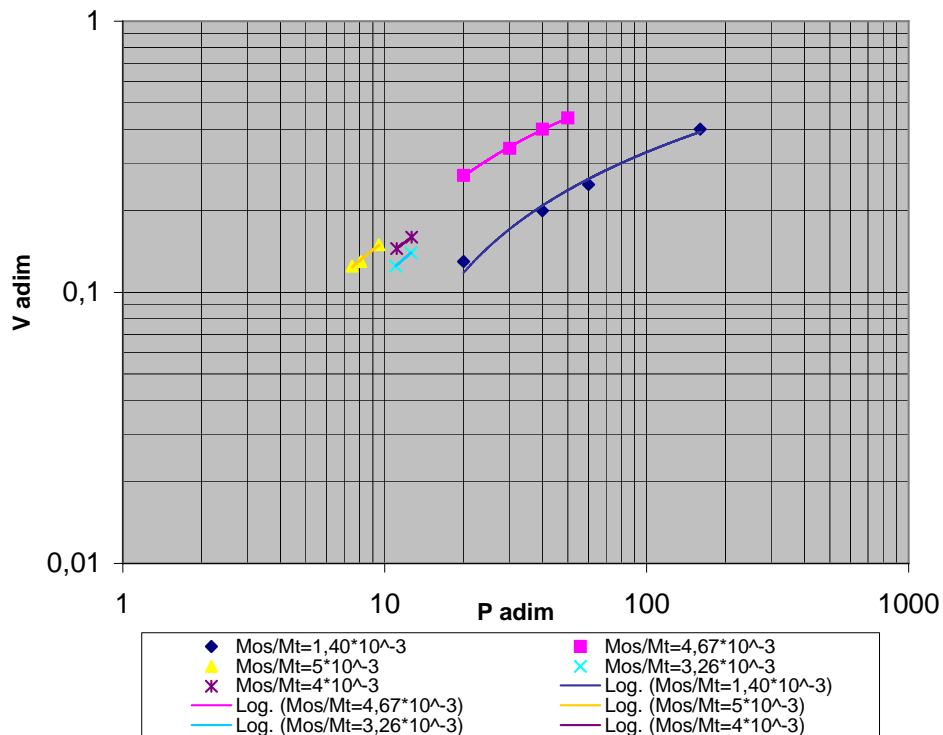


Fig. 10:  $\bar{v}$  vs  $\bar{P}$  in funzione del numero di frammenti

dove:

Si sono ottenute quindi le posizioni, con riferimento ai diagrammi di Fig. 7, dei punti corrispondenti alle osservazioni sperimentali eseguite, come illustrato nella Fig. 11 seguente.



Il confronto con le curve di Fig. 7 mostra che anche in questo caso i risultati sono congruenti e incontrano soddisfacentemente i dati preesistenti.

#### **4. CONCLUSIONI**

Dall'analisi dei dati ricavati dalle prove e dal confronto con i dati esistenti si traggono le seguenti considerazioni.

Relativamente alla sovrappressione si osserva che i dati sperimentali si collocano, per una distanza pari al raggio del recipiente, in prossimità delle curve esistenti, mentre per quelli relativi ad una certa distanza dalla sorgente esplosiva essi sono situati in una zona esterna, ma in posizione tale da permettere di ipotizzare un prolungamento delle curve esistenti. Per una conferma definitiva, comunque, si richiederebbe un maggior numero di prove con utilizzo di numerosi fonometri in modo da rilevare puntualmente l'andamento della sovrappressione in funzione della distanza.

Per quanto riguarda la proiezione dei frammenti originati dallo scoppio dei contenitori, va osservato che anche se la piccola dimensione degli stessi comportava approssimazioni nelle misurazioni e nelle valutazioni, i risultati portano ad una conferma dell'applicabilità del modello.

I valori teorici della velocità iniziale ricavati si sono scostati da quelli sperimentali per percentuali che vanno dal 3 al 40%, in particolare i valori teorici relativi alla distanza e alla velocità sono stati superiori a quelli effettivi; questo è imputabile principalmente al fatto che avendo considerato un moto bidimensionale, non si è tenuto conto delle possibili variazioni nello spazio della traiettoria e della posizione del pezzo, secondariamente all'assunzione di una forma simile ad una lastra piana, fatta per poter eseguire un'analisi fluidodinamica sul moto bidimensionale degli stessi.

Si evidenzia, inoltre, come i dati rilevati nelle prove, riferiti a recipienti di volume 1 litro, costituiscano una continuazione delle curve riportate in letteratura, che sono ricavate da prove con recipienti di dimensioni minime 1,8 litri. Ciò appare una prima conferma dell'applicabilità del modello anche nelle diverse condizioni operative realizzate nelle presenti sperimentazioni.

Appare pertanto giustificato concludere che le relazioni di calcolo verificate, che sono implementate in codici computerizzati [3] per PC, possono essere applicate, oltre che nell'analisi di rischio di incidenti rilevanti, anche per lo studio di misure di sicurezza auspicabili in molteplici attività, dove l'uso di recipienti in pressione o lo svolgimento di procedimenti che possono comportare sovrappressioni, configurano il pericolo di scoppio con proiezione di frammenti. Tali modelli consentono infatti anche il dimensionamento o la verifica di schermi o barriere a protezione sia dall'onda d'urto che dai frammenti.

#### **Ringraziamenti**

al Sig. Giovanni Amadasi, che ha messo a disposizione parte della strumentazione per la disponibilità ed i suggerimenti forniti.

#### **5. BIBLIOGRAFIA**

- [1] NASA - Workbook for Estimating Effects of Accidental Explosions in Propellant Ground Handling and Transport System - Report 3023
- [2] NASA - Workbook for Predicting Pressure Wave and Fragment Effects of Exploding Propellant Tanks and Gas Storage Vessels - Report 134906
- [3] S.T.A.R. Safety Techniques for Risk Assessment – *ARTES S.r.l.*

**Appendice**

Tab. 2: dettagli delle rilevazioni effettuate

Prova n	Temperat. °C	Vel. e direz vento m/s	P1 *10 <sup>5</sup> Pa	fonometri a m	Ps adimension	R adimension
1.A	23	3,5 SE	10,79	non posiz. 2 4	2 0,03 0,00207	0,215 6,92 13,84
1.B	23	3,5 SE	10,1	non posiz. 4 5	1,9 non rilev. 0,00197	0,219 14,18 17,73
1.C	23	3,5 SE	12,26	non posiz. 5	2,2 0,00222	0,205 16,05
2.A	25	5 SE	12,95	non posiz. 7	2,2 0,00075	0,2 22,67
2.B	25	5 SE	11,27	non posiz. 7	2 0,0007	0,21 23,8
3.A	20	2 ESE	9,6	non posiz. 5 4 6	1,9 0,016 non rilev. 0,003	0,224 18,05 14,44 21,66
3.B	20	2 ENE	8,2	non posiz. 5 4 6	1,75 0,0153 0,00636 0,00286	0,237 19,14 15,13 22,96
3.C	20	2 ENE	12,75	non posiz. 4 4 6	2,25 0,0166 0,00653 0,0028	0,202 13,02 13,02 19,52
3.D	20	2 ENE	11,28	non posiz. 2 4 6	2 0,0295 0,00652 0,0028	0,21 6,8 13,6 20,4
3.E	20	2 ENE	7,55	non posiz. 2	1,6 0,022	0,24 7,9
3.F	20	2 ENE	11,08	non posiz. 1,5 3 6	2 0,0282 0,00661 0,00299	0,21 5,14 10,3 20,56
4.A	23	2,5 SE	15,7	non posiz. 7,3 52	2,5 0,03 0,000394	0,182 22,58 160,8
4.B	23	2,5 SE	23	non posiz. 7 10	2,9 0,0279 0,0157	0,398 17,2 24,6
4.C	23	2,5 SE	23,6	non posiz. 7 7	3,1 0,0313 0,0395	0,149 16,8 16,8
4.E	23	2,5 SE	15,5	non posiz. 8 8	2,1 0,0279 0,00395	0,187 23,9 23,9