

# CRITERI DI PERICOLOSITA` PER DEFLAGRAZIONI DI GAS IN AMBIENTI CONFINATI

Giuseppe Fiore, Fabio Fineschi

Dipartimento di Ingegneria meccanica, nucleare e della produzione – Università di Pisa  
via Diotisalvi 2 – 56126 Pisa – Italia

## SOMMARIO

Si definiscono criteri che permettono di valutare la pericolosità di alcuni fra i gas più comunemente incontrati nelle applicazioni civili ed industriali (metano, propano ed idrogeno). Nel caso di deflagrazioni all'interno di ambienti chiusi è stata ottenuta una scala di pericolosità da cui risulta che l'idrogeno è il gas meno pericoloso fra quelli analizzati. Per deflagrazioni in recipienti ventati, in base alle simulazioni condotte col codice VEDEG e relative ad un recipiente di forma sferica, la pericolosità dei gas dipende dalla frazione di venting. I valori della frazione di venting in corrispondenza dei quali varia il grado di pericolosità di un gas rispetto ad un altro risultano funzione delle variabili da cui la  $P_{MAX}$  dipende. In molti casi, motivi di sicurezza potrebbero consigliare l'idrogeno piuttosto che altri gas combustibili.

## 1. INTRODUZIONE

Il livello di pericolosità di un gas combustibile è legato all'entità degli effetti distruttivi prodotti dalla sua combustione, quando, essendosi formate accidentalmente con l'aria di un ambiente miscela infiammabili, un'eventuale ignizione provoca rapide propagazioni di fiamma. Poiché tali effetti sono quasi interamente dovuti ad un aumento statico o dinamico di pressione, è in base ad esso che si valuta il livello di pericolosità del gas.

Nella deflagrazione (propagazione subsonica di fiamma), fenomeno di gran lunga più probabile della detonazione (propagazione supersonica di fiamma), è lecito trascurare l'effetto dinamico del transitorio di pressione e concludere che due miscele combustibile-aria producono effetti equivalenti se le loro deflagrazioni producono la medesima pressione massima sulla struttura interessata.

Per processi deflagrativi all'interno di un recipiente chiuso, la pressione massima ipotizzabile,  $P_{MAX}$ , è uguale alla  $P_{AICC}$  (la pressione prodotta per combustione completa del gas in condizioni isocore ed adiabatiche), che è stata utilizzata come elemento di confronto per i vari gas.

Nel caso di recipienti dotati di sfiato,  $P_{MAX}$ , è inferiore alla  $P_{AICC}$  e dipende, ipotizzando sempre l'adiabaticità del processo,

- dal tipo di gas
- dalla concentrazione del gas
- dalla geometria del recipiente
- dalla localizzazione dello sfiato
- dalla pressione di apertura dello sfiato
- dal livello di turbolenza che influenza la rapidità della propagazione di fiamma

Pertanto, utilizzando il valore di  $P_{MAX}$  come elemento di confronto per i vari gas, nel caso di recipienti ventati sono attese relazioni di equivalenza alquanto più complicate rispetto al caso di contenitori chiusi, dove la  $P_{AICC}$  è funzione solo del tipo di gas combustibile e della sua concentrazione.

E' particolarmente interessante confrontare gas combustibili attualmente molto usati in applicazioni civili ed industriali, come metano e propano, con l'idrogeno, il cui uso sarà sempre più esteso in futuro per ridurre l'impatto ambientale dei prodotti di combustione.

## 2. RECIPIENTE CHIUSO

Il valore di  $P_{AICC}$  in funzione della concentrazione volumetrica dei vari gas è calcolato tramite il codice VEDEG [1], ed è relativo ad una miscela gas-aria inizialmente a condizioni ambiente ( $p = 0.1$  MPa e  $T = 298$  K). Il valore di  $P_{AICC}$  vs.  $C_{GAS}$  è riportato nelle figure 1-3.

L'uso di un polinomio di secondo grado per interpolare le curve di  $P_{AICC}$  vs.  $C_{GAS}$  permette di facilitare il calcolo analitico delle relazioni di equivalenza. Per minimizzare gli errori di interpolazione, utilizzando come funzione interpolante un polinomio di secondo grado, si è separato il ramo ascendente, ipostechiometrico, della curva da quello

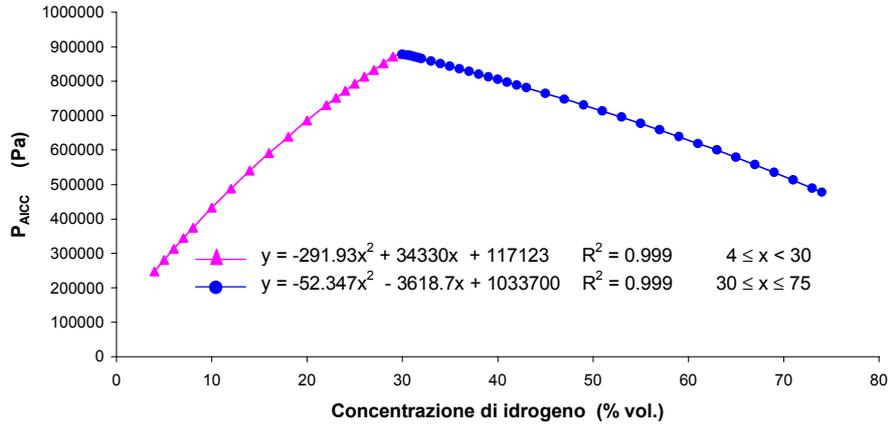


Figura 1 -  $P_{AICC}$  calcolata in funzione della concentrazione di idrogeno

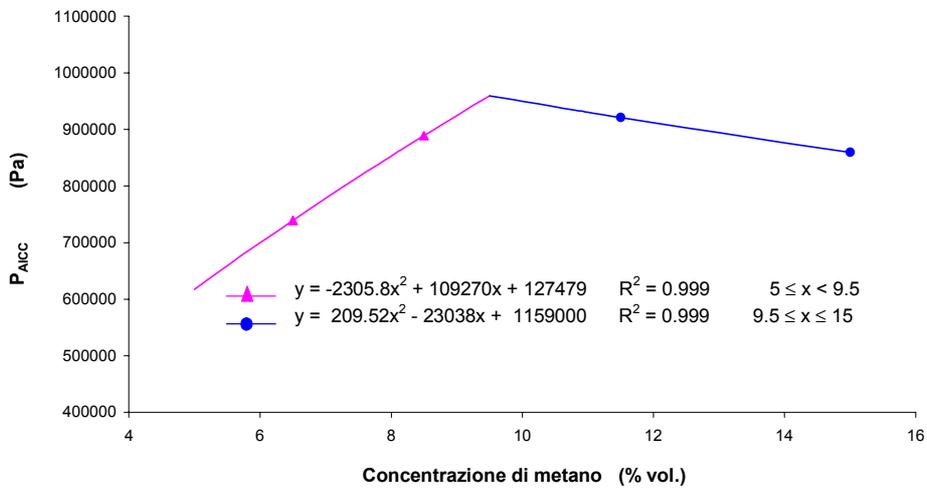


Figura 2 -  $P_{AICC}$  in funzione della concentrazione di metano

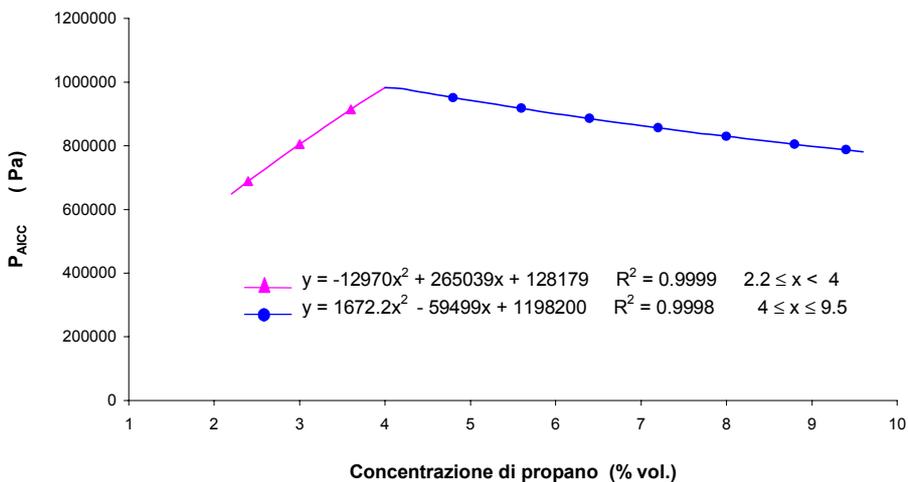


Figura 3 -  $P_{AICC}$  in funzione della concentrazione di propano

discendente, iperstechiometrico. Le funzioni di interpolazione riportate nelle figure permettono di valutare il valore di  $P_{AICC}$  in funzione della concentrazione del gas, con un errore inferiore all'1% rispetto a quello calcolato dal codice.

L'intervallo di concentrazione volumetrica considerato è il campo di infiammabilità dei vari gas; per l'idrogeno è [4% vol. ÷ 75% vol.], per il metano [5% vol. ÷ 15% vol.] e per il propano [2.2% vol. ÷ 9.5% vol.], a  $p = 0.1$  MPa e  $T = 298$  K [2].

## 2.1. Definizione del fattore di equivalenza

Indicati con G1 e G2 i gas a confronto e fissato il valore di concentrazione del primo gas,  $C_{G1}$ , l'obiettivo è di calcolare, qualora esista, il coefficiente  $f_{G1-G2}$  tale che:

$$C_{G2} = f_{G1-G2} C_{G1} \quad (1)$$

dove  $C_{G2}$  è la concentrazione volumetrica di G2 che consente di raggiungere lo stesso valore di  $P_{AICC}$  derivante dalla combustione di G1, a concentrazione  $C_{G1}$ .

## 2.2. Procedimento per il calcolo del fattore di equivalenza

### *Campo di concentrazioni ipostechiometriche per G1*

Si consideri il fattore  $f_{i-m}$  (G1 = idrogeno e G2 = metano). Per l'idrogeno, il ramo ascendente della curva che descrive la  $P_{AICC}$  in funzione di  $C_{H2}$  è approssimato per comodità con l'equazione (fig. 1):

$$P_{AICC} = -291.93 C_{H2}^2 + 34330 C_{H2} + 117123 \quad 4.0 \leq C_{H2} < 29.6 \quad (2)$$

Per il metano, le equazioni di interpolazione riportate in figura 2, in virtù della (1), possono scriversi, per il ramo ascendente:

$$P_{AICC} = -2305.8 f_{i-m}^2 C_{H2}^2 + 109270 f_{i-m} C_{H2} + 127479 \quad 5.0 \leq f_{i-m} C_{H2} < 9.5 \quad (3)$$

e per il ramo discendente:

$$P_{AICC} = 209.52 f_{i-m}^2 C_{H2}^2 - 23038 f_{i-m} C_{H2} + 1159000 \quad 9.5 \leq f_{i-m} C_{H2} \leq 15 \quad (4)$$

Eguagliando l'equazione (2) con le equazioni (3) e (4) si ottengono due equazioni di secondo grado nella variabile  $f_{i-m}$ , le cui soluzioni sono, rispettivamente:

$$(f_{i-m})_{1/2} = \frac{109270 C_{H2} \pm \sqrt{(109270 C_{H2})^2 + 4(2305.8 C_{H2}^2)(10356 + 291.93 C_{H2}^2 - 34330 C_{H2})}}{2(2305.8 C_{H2}^2)} \quad (5)$$

$$(f_{i-m})_{1/2} = \frac{23038 C_{H2} \pm \sqrt{(23038 C_{H2})^2 - 4(209.52 C_{H2}^2)(1041877 + 291.93 C_{H2}^2 - 34330 C_{H2})}}{2(209.52 C_{H2}^2)} \quad (6)$$

Variando  $C_{H2}$  all'interno dell'intervallo di concentrazione volumetrica [4% ÷ 29.6%] e considerando quali soluzioni accettabili quelle che soddisfano le condizioni di validità delle funzioni di interpolazione ascendenti e discendenti del metano, vale a dire:

$$\begin{cases} f_{i-m} \in \Re > 0 \\ 5 \leq f_{i-m} C_{H2} < 9.5 \end{cases} \quad \text{valide per la (5)} \quad (7)$$

$$\begin{cases} f_{i-m} \in \Re > 0 \\ 9.5 \leq f_{i-m} C_{H2} \leq 15 \end{cases} \quad \text{valide per la (6)} \quad (8)$$

si ottiene, rispettivamente dalla (5) e dalla (6):

$$f_{i-m} = \frac{109270 C_{H2} - \sqrt{(109270 C_{H2})^2 + 4(2305.8 C_{H2}^2)(10356 + 291.93 C_{H2}^2 - 34330 C_{H2})}}{2(2305.8 C_{H2}^2)} \quad 17 \leq C_{H2} < 29.6$$

$$f_{i-m} = \frac{23038 C_{H2} - \sqrt{(23038 C_{H2})^2 - 4(209.52 C_{H2}^2)(1041877 + 291.93 C_{H2}^2 - 34330 C_{H2})}}{2(209.52 C_{H2}^2)} \quad 28.6 \leq C_{H2} < 29.6$$

### *Campo di concentrazioni iperstechiometriche per G1*

Ripetendo il procedimento per il ramo discendente della curva di figura 1, si ottiene:

$$f_{i-m} = \frac{23038 C_{H2} - \sqrt{(23038 C_{H2})^2 - 4(209.52 C_{H2}^2)(126000 + 52.347 C_{H2}^2 + 3618.7 C_{H2})}}{2(209.52 C_{H2}^2)} \quad 29.6 \leq C_{H2} \leq 32.7$$

$$f_{i-m} = \frac{109270 C_{H2} - \sqrt{(109270 C_{H2})^2 + 4(2305.8 C_{H2}^2)(906221 - 52.347 C_{H2}^2 - 3618.7 C_{H2})}}{2(2305.8 C_{H2}^2)} \quad 29.6 \leq C_{H2} \leq 61.1$$

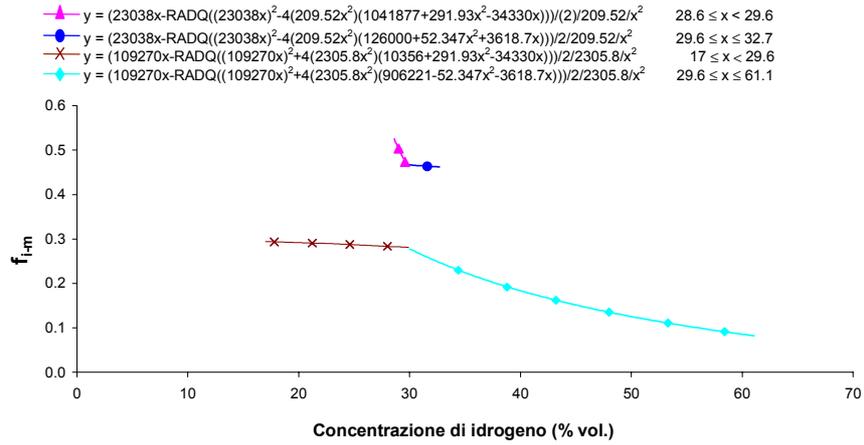


Figura 4 - Fattore  $f_{i-m}$  in funzione della concentrazione di idrogeno

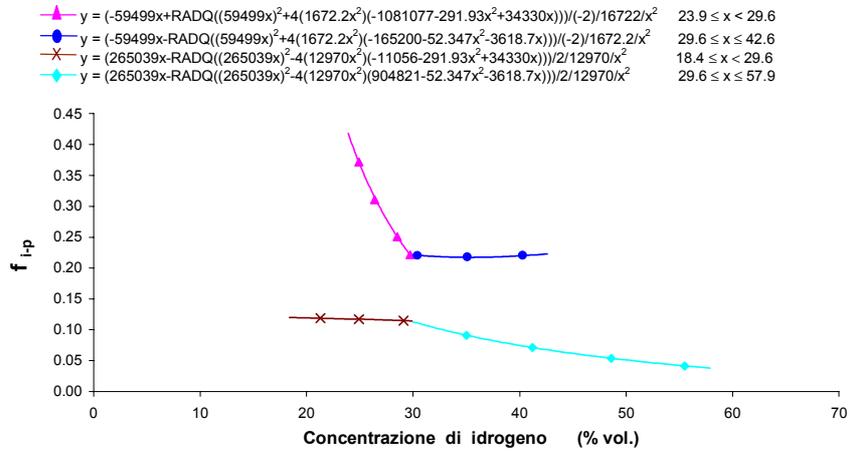


Figura 5 - Fattore  $f_{i-p}$  in funzione della concentrazione di idrogeno

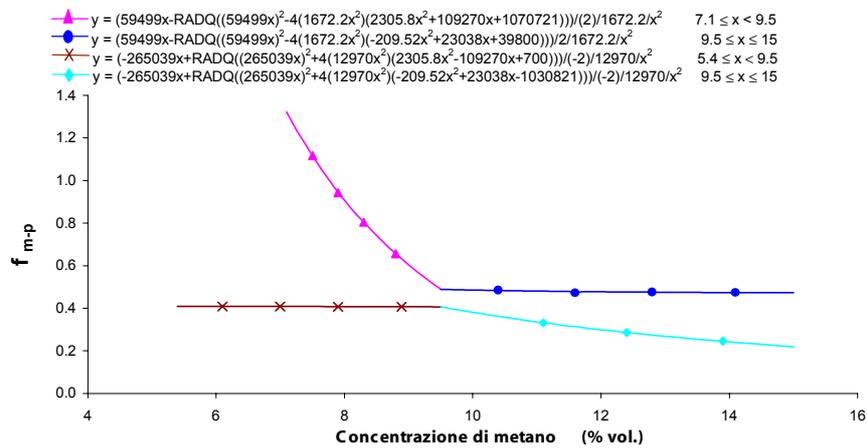


Figura 6 - Fattore  $f_{m-p}$  in funzione della concentrazione di metano

Adottando analoghi procedimenti sono stati calcolati i fattori  $f_{i-p}$  e  $f_{m-p}$ .

Nelle figure 4 - 6 è riportato sia l'andamento di  $f_{G1-G2}$  in funzione di  $C_{G1}$  sia l'equazione di interpolazione delle varie curve, con i relativi campi di validità.

### 2.3. Errore sul calcolo del fattore di equivalenza

Il calcolo di  $f_{G1-G2}$  si basa sulle funzioni interpolanti delle figure 1-3, che presentano errore di interpolazione praticamente nullo. Si è verificato che l'errore così commesso nella stima di  $f_{G1-G2}$  è del tutto trascurabile. Infatti per varie concentrazioni  $C_{G1}$  si sono calcolati  $C_{G2} = f_{G1-G2} C_{G1}$  e successivamente  $P_{AICC}(C_{G2})$  e  $P_{AICC}(C_{G1})$ . Gli errori relativi  $\frac{P_{AICC}(C_{G2}) - P_{AICC}(C_{G1})}{P_{AICC}(C_{G1})}$  (fig. 7-9) risultano trascurabili, per cui si ritiene trascurabile l'errore commesso nella stima di  $f_{G1-G2}$ .

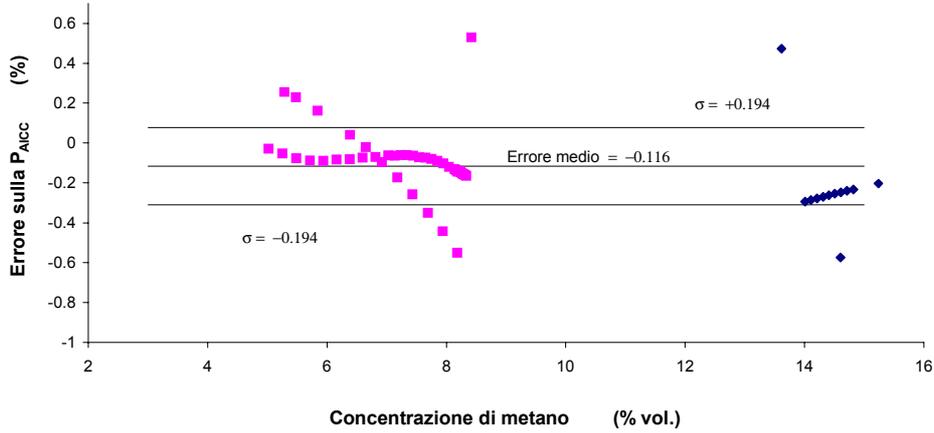


Figura 7 - Errore commesso sul valore di  $P_{AICC}$  calcolato tramite il fattore  $f_{i-m}$

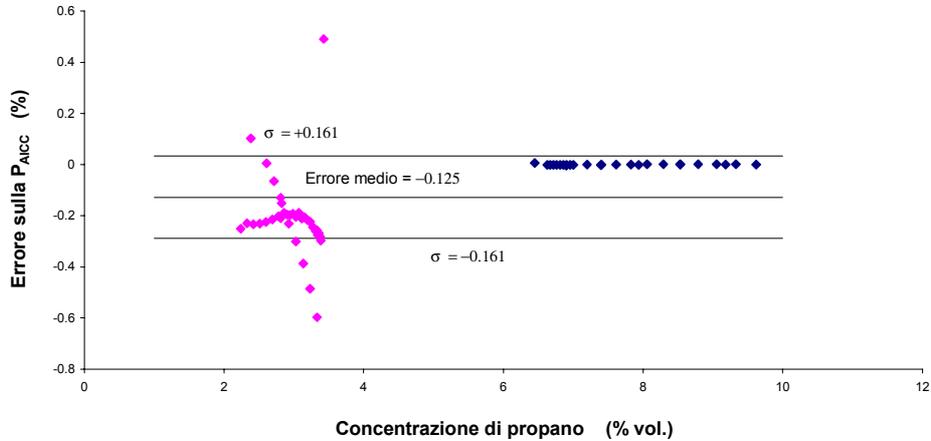


Figura 8 - Errore commesso sul valore di  $P_{AICC}$  calcolato tramite il fattore  $f_{i-p}$

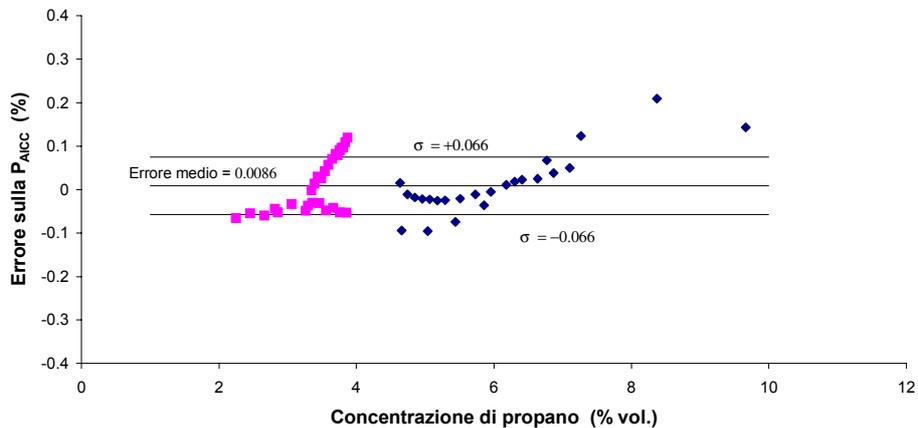
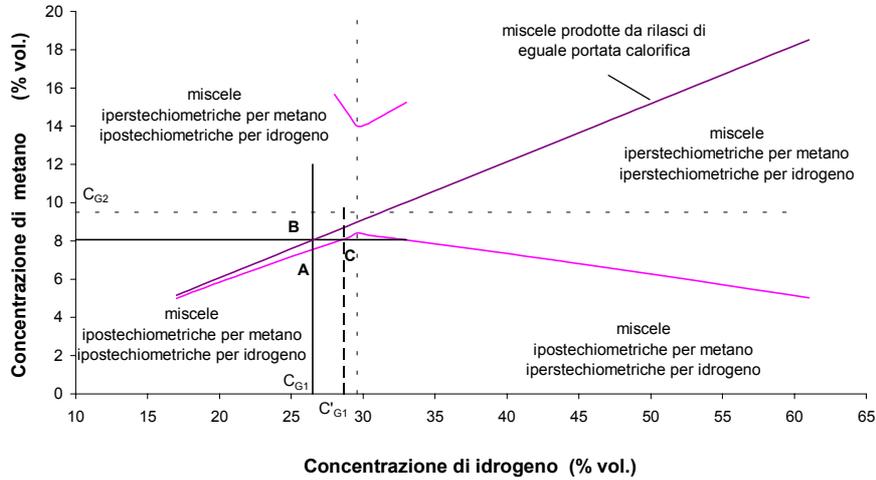


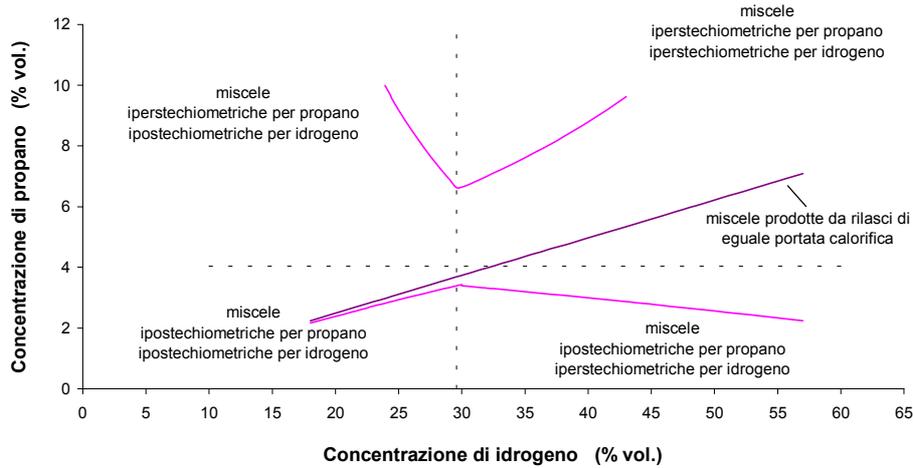
Figura 9 - Errore commesso sul valore di  $P_{AICC}$  calcolato tramite il fattore  $f_{m-p}$

## 2.4. Miscele equivalenti di gas

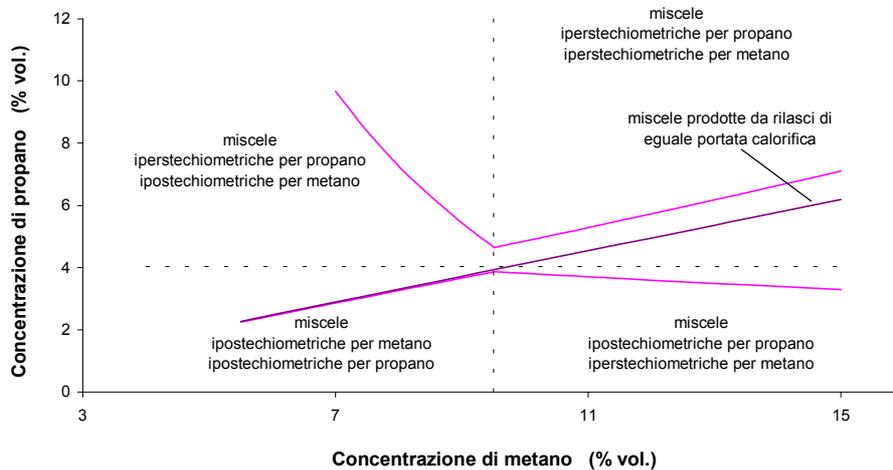
Calcolato il fattore di equivalenza  $f_{G1-G2}$  e sfruttando la (1), si ottengono i due rami di curva delle figure 10-12, che permettono di stabilire un'equivalenza tra concentrazioni di combustibili diversi (esprese, per esempio, dalle coordinate del punto A di figura 10), sulla base della uguaglianza della pressurizzazione prodotta dalla deflagrazione delle loro miscele con aria.



**Figura 10 - Miscele equivalenti idrogeno-aria e metano-aria**



**Figura 11 - Miscele equivalenti idrogeno-aria e propano-aria**



**Figura 12 - Miscele equivalenti metano-aria e propano-aria**

Esiste un intervallo di concentrazioni in ordinata all'interno del quale, le rette parallele all'asse delle ascisse non intersecano le curve indicate nelle figure. Per tali valori di concentrazione, non è possibile definire l'equivalenza tra la miscela del gas in ordinata e quella del gas in ascissa, in quanto i valori di  $P_{AICC}$  conseguenti alla combustione del gas in ordinata (fig. 1-3) risultano più elevati rispetto a quelli dovuti alla combustione del gas in ascissa, qualsiasi sia la concentrazione di quest'ultimo. Da questo punto di vista, dalle figure 10 e 11 l'idrogeno risulta il gas meno pericoloso fra quelli analizzati.

Spesso nella progettazione di un sistema di alimentazione di gas combustibile, l'obiettivo primario è ottenere la potenza termica desiderata, qualsiasi sia il tipo di gas combustibile utilizzato. In questo caso, se la normale combustione del gas accidentalmente non dovesse avvenire, si potrebbero avere rilasci di gas in ambiente chiuso. A parità di portata calorifica si avrebbe allora  $W_{G1} P_{C,G1} = W_{G2} P_{C,G2}$ , dove  $W_G = Q_G p_{amb} P_{M,G} / (R T_{amb})$ .

Essendo  $C_G = Q_G t / V$ , si ottiene  $C_{G2} = C_{G1} (P_{C,G1} P_{M,G1}) / (P_{C,G2} P_{M,G2})$ , che fornisce la retta riportata nelle figure 10-12. Queste figure possono allora essere utilizzate per determinare (punto C di figura 10) il valore della concentrazione  $C'_{G1}$  equivalente alla concentrazione  $C_{G2}$ , che sarebbe nel volume  $V$  nello stesso istante in cui la concentrazione di  $G1$  è  $C_{G1}$  (punto B di figura 10). Tanto  $C'_{G1}$  è maggiore di  $C_{G1}$ , tanto più pericoloso è  $G2$  rispetto a  $G1$ . Anche da questo punto di vista, dalle figure 10 e 11 l'idrogeno risulta il gas meno pericoloso fra quelli analizzati.

### 3. RECIPIENTE DOTATO DI SFIATO

Le simulazioni, condotte con il codice VEDEG, sono relative ad un recipiente di forma sferica a condizioni iniziali ambiente ( $p = 0.101$  MPa e  $T = 298$  K), dotato di sfiato che si apre quando la pressione raggiunge un valore prefissato. Si assume che l'ignizione avvenga nel centro e la propagazione di fiamma sia simmetrica, cosicché l'apertura dello sfiato comporti l'espulsione di miscela incombusta.

Per la valutazione degli effetti distruttivi causati dalla deflagrazione si considerano i valori della pressione massima che si raggiunge all'interno del recipiente.  $P_{MAX}$  è tanto maggiore quanto più elevata è la velocità di bruciamento. Per il confronto dei vari gas è stato assunto il valore minimo della velocità di bruciamento, corrispondente alla velocità laminare. Per l'idrogeno è utilizzata una correlazione della velocità di bruciamento funzione della concentrazione del gas, della temperatura e della pressione [3]; per metano e propano sono state usate delle correlazioni in cui la velocità di bruciamento è funzione della sola concentrazione [4]. Nelle simulazioni sono stati assunti trascurabili gli effetti prodotti dall'inerzia del sistema di apertura dello sfiato.

#### 3.1. Analisi dei fattori che influenzano $P_{MAX}$

a) Si consideri l'andamento della  $P_{MAX}$  in funzione della percentuale di moli di miscela ventata (rispetto alle moli totali iniziali). Per miscele che sarebbero equivalenti nel caso di recipienti chiusi, le curve tracciate per i vari gas sono coincidenti (fig. 13): il termine "miscele equivalenti" ha allora lo stesso significato sia per recipienti chiusi che ventati purché le pressioni massime vengano confrontate a parità di percentuale di moli ventate.

b) Definita la frazione di venting,  $F_v = \frac{A_v}{A_{tot}}$ , con  $A_v$  area di sfiato e  $A_{tot}$  area totale di superficie del recipiente, risulta particolarmente significativo esprimere  $P_{MAX}$  in funzione di  $F_v$ . Infatti, a parità di  $F_v$  in recipienti sferici e per propagazione di fiamma simmetrica,  $P_{MAX}$  è indipendente dalle dimensioni del recipiente.

c) In figura 14 è tracciato l'andamento di  $P_{MAX}$  in funzione di  $F_v$ , per una miscela stechiometrica di idrogeno-aria, (a  $p = 0.101$  MPa,  $T = 298$  K) equivalente ad una miscela metano-aria a  $C_m = 8.33\%$  e di propano-aria a  $C_p = 3.388\%$  nelle medesime condizioni di pressione e temperatura. La pressione di apertura dello sfiato è  $P_v = 0.12$  MPa. Nelle simulazioni effettuate, se il valore di  $F_v$  è sufficientemente elevato ( $F_v \geq F_{v,critico} = 0.018$  per metano e propano, ed  $F_{v,critico} = 0.119$  per l'idrogeno),  $P_{MAX} = P_v$ , perché l'apertura dello sfiato impedisce ogni ulteriore crescita della pressione (fig. 15). Per più bassi valori di  $F_v$ ,  $P_{MAX}$  è maggiore di  $P_v$  e si registra alla fine della deflagrazione, quando la fiamma ha raggiunto le pareti del recipiente e l'intero volume è bruciato (fig. 16). All'aumentare della frazione di venting, aumentano le moli ventate durante la deflagrazione, il valore di  $P_{MAX}$  tende a diminuire, ma in maniera più marcata per propano e metano rispetto all'idrogeno (fig. 14), in quanto la percentuale di moli ventate è minore per l'idrogeno. Questo giustifica anche il più elevato valore di  $F_{v,critico}$  trovato per l'idrogeno.

d) L'aumento della  $P_v$  porta ad un aumento della  $P_{MAX}$  (fig. 16).

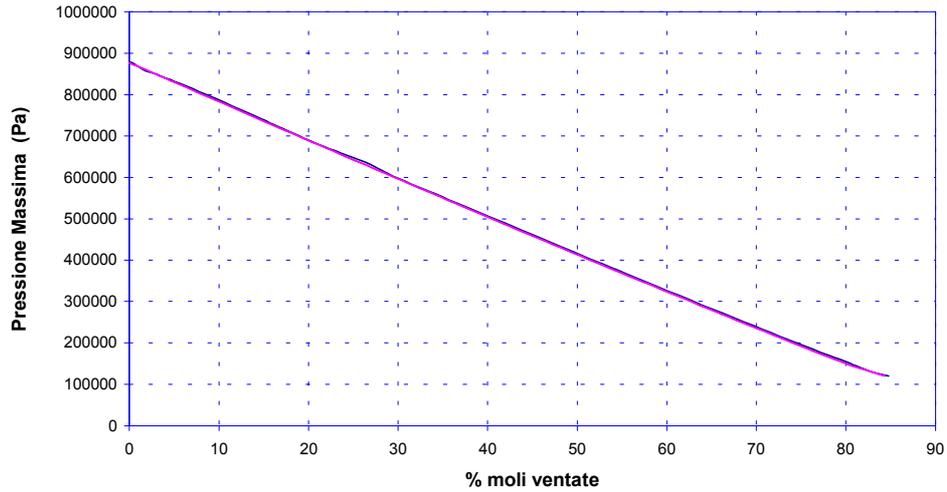


Figura 13 -  $P_{MAX}$  in funzione della frazione di moli ventate, per idrogeno, metano e propano.  $P_v = 120000$  MPa

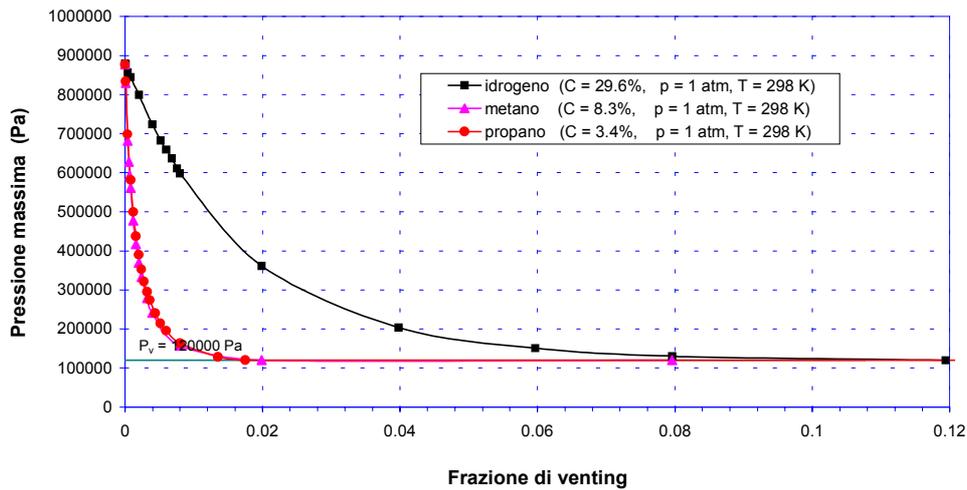


Figura 14 -  $P_{MAX}$  in funzione della frazione di venting.  $P_v = 120000$  Pa

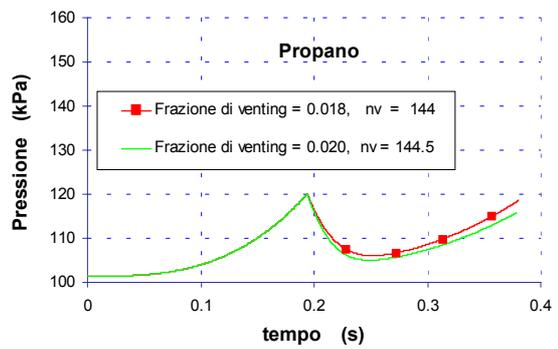
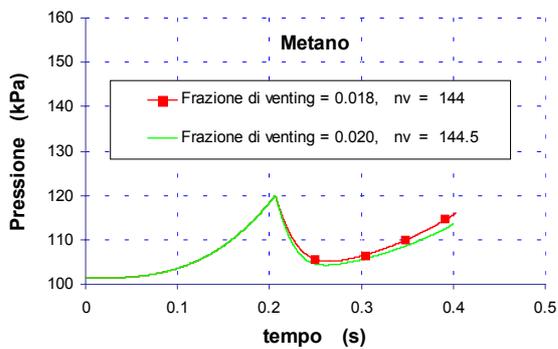


Figura 15 - Transitori di pressione per due diverse frazioni di venting, entrambe superiori al valore critico, relative a metano (sinistra) e propano (destra).

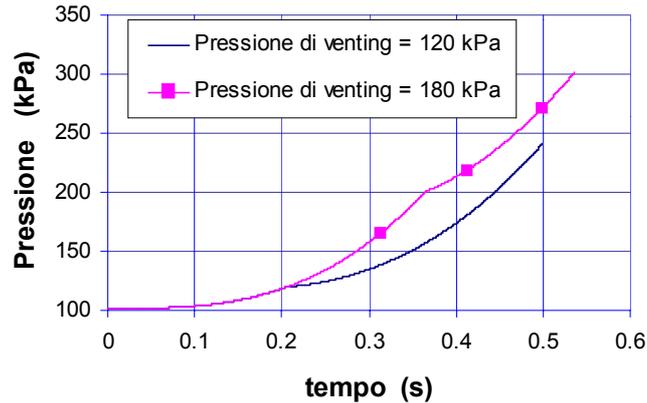


Figura 16 - Influenza della pressione di apertura dello sfiato sul valore di  $P_{MAX}$ .  $C_m = 8.33\%vol.$ ,  $p = 0.1\ MPa$ ,  $T = 298\ K$

### 3.2. Massime pressioni raggiungibili

Quando una miscela è stechiometrica si registrano i valori massimi di  $P_{MAX}$ ,  $P_{MAX,MAX}$ . In particolare, per il propano  $P_{AICC,MAX} = 983000\ Pa$ , mentre per il metano  $P_{AICC,MAX} = 959000\ Pa$  e per l'idrogeno  $P_{AICC,MAX} = 875000\ Pa$ . In corrispondenza di tali composizioni stechiometriche, le miscele assumono il più alto grado di pericolosità anche nel caso di recipienti dotati di sfiato (fig. 17).

Per piccole frazioni di venting è l'idrogeno il gas con minore  $P_{MAX,MAX}$ . In corrispondenza ad  $F_v = 0.000187$ , il valore di  $P_{MAX,MAX}$  per il metano diventa inferiore a quello dell'idrogeno. A partire da  $F_v = 0.000262$ ,  $P_{MAX,MAX}$  per l'idrogeno diventa la più grande dei tre gas. Per metano e propano  $F_{v,critica} = 0.02387$  e per l'idrogeno,  $F_{v,critica} = 0.119$ .

I punti di intersezione fra le curve di  $P_{MAX,MAX}$  vs.  $F_v$ , per i vari gas, definiscono il momento in cui varia il rapporto di  $P_{MAX,MAX}$  di un gas rispetto all'idrogeno. Tali punti di equivalenza dipendono

- dal tipo di gas
- dalla pressione di apertura dello sfiato
- dalla rapidità della combustione

In figura 18 è riportato l'andamento di  $P_{MAX,MAX}$  vs.  $F_v$  per  $P_v = 0.8\ MPa$ : si osserva rispetto alla figura 17 lo spostamento dei punti di equivalenza a valori maggiori della frazione di venting.

In figura 19 sono riportate l'andamento delle moli ventate in funzione della frazione di venting, per le varie miscele stechiometriche di gas ( $P_v = 0.12\ MPa$ ). Per l'idrogeno, il minor numero di moli di miscela gassosa ventata a basse frazioni di venting, rispetto agli altri gas, è legato all'estrema rapidità della combustione e dunque agli elevati valori della velocità di bruciamento. L'andamento molto simile delle curve di metano e propano, analogamente, è da imputarsi ai valori simili della velocità di bruciamento.

## 4. CONCLUSIONI

Il livello di pericolosità di un gas, nel caso di deflagrazioni, è stato valutato sulla base delle pressioni massime prodotte dalla combustione, avendo assunto trascurabili gli effetti sulle strutture prodotti dal transitorio di temperatura.

Quali valori di pressione massima, per recipienti chiusi, sono stati utilizzati i valori di  $P_{AICC}$ . Il calcolo della  $P_{AICC}$  in funzione della concentrazione volumetrica del gas è stato effettuato tramite il codice VEDEG. Dalle equazioni di interpolazione della  $P_{AICC}$  vs.  $C_{gas}$  è stato calcolato il fattore di equivalenza,  $f_{G1-G2}$ , che permette di individuare le concentrazioni di miscele combustibile-aria ugualmente pericolose. In contenitori chiusi, l'idrogeno risulta il gas meno pericoloso fra quelli analizzati, sia a parità di portata calorifica rilasciata, sia in relazione alle pressioni massime ( $P_{AICC,MAX}$ ) raggiungibili.

Nel caso di recipienti ventati, lo sfiato, se limitato, provoca un abbattimento della pressione massima di deflagrazione minore per l'idrogeno rispetto agli altri gas, a causa dell'elevata velocità di bruciamento di  $H_2$ , per cui l'idrogeno può diventare più pericoloso di altri gas combustibili.

Tuttavia, in ambienti parzialmente confinati, specie se forniti di aperture in alto, l'elevata diffusività e la bassa densità dell'idrogeno facilitano la sua fuga verso l'esterno e ostacolano il raggiungimento di concentrazioni elevate molto più di quanto accade per metano e propano. Inoltre, fenomeni di turbolenza, causando un aumento della velocità di bruciamento per motivi fluidodinamici non direttamente collegati alle proprietà fisico-chimiche dei gas, potrebbero ridurre le differenze tra velocità di bruciamento di idrogeno e di altri gas combustibili. Queste ragioni potrebbero consigliare l'uso dell'idrogeno per motivi di sicurezza anche in ambienti con limitati sistemi di sfiato.

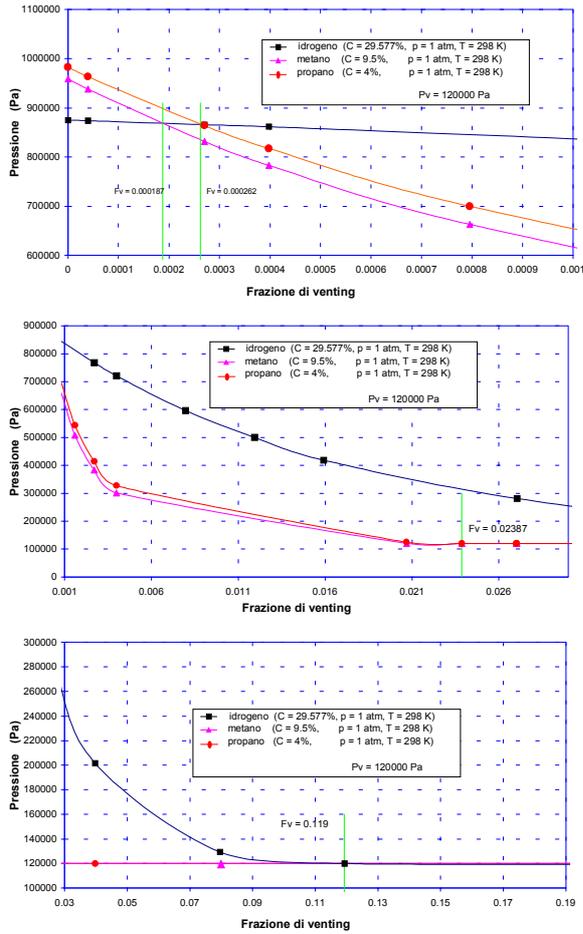


Figura 17 -  $P_{MAX,MAX}$  in un recipiente sferico, per idrogeno, metano e propano.  $P_v = 0.12$  MPa

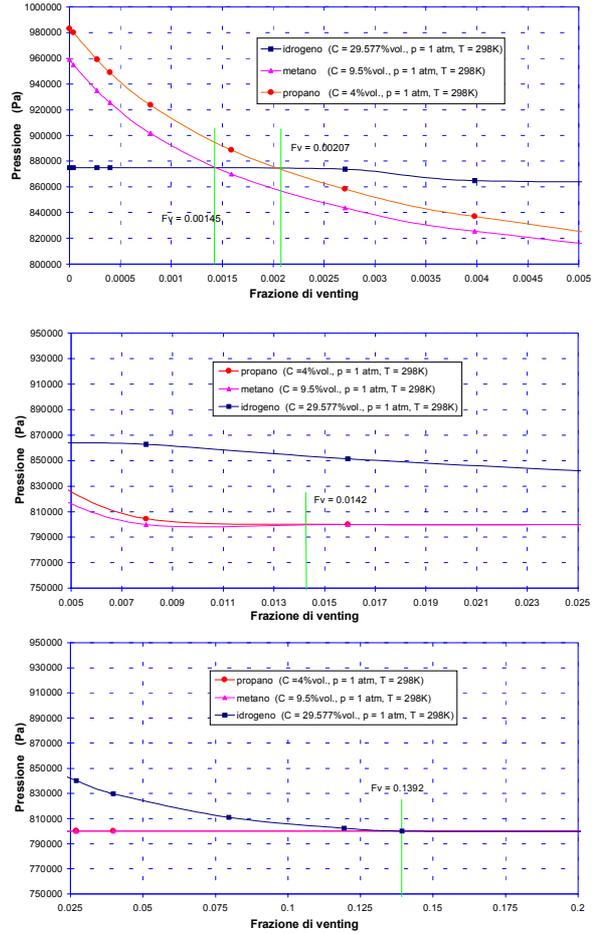


Figura 18 -  $P_{MAX,MAX}$  in un contenitore sferico, per idrogeno, metano e propano.  $P_v = 0.8$  MPa

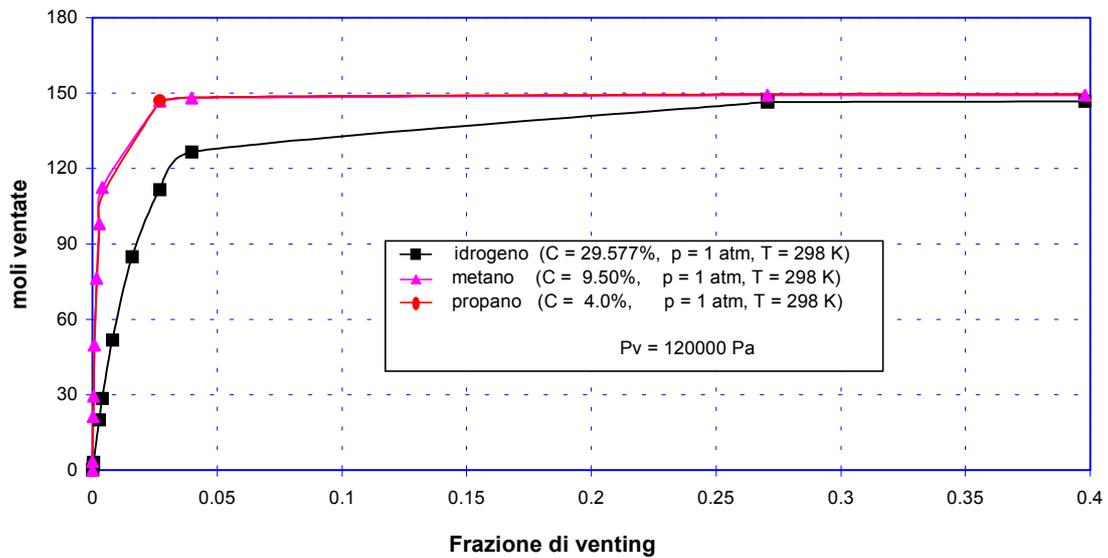


Figura 19 - Moli ventate di miscela stechiometrica in funzione della frazione di venting.  $P_v = 0.12$  MPa

**ELENCO DEI SIMBOLI**

|                |   |                      |
|----------------|---|----------------------|
| $A_v$          | = area di venting   | [m <sup>2</sup> ]    |
| $A_{tot}$      | = superficie totale del recipiente                                  | [m <sup>2</sup> ]    |
| $C$            | = concentrazione volumetrica  | [% vol.]             |
| $f_{G1-G2}$    | = fattore di equivalenza dei gas                                    | [-]                  |
| $F_v$          | = frazione di venting   | [-]                  |
| $G1, G2,..$    | = tipi di gas   | [-]                  |
| $n_v$          | = numero di moli ventate  | [-]                  |
| $p$            | = pressione   | [Pa]                 |
| $P_{MAX}$      | = pressione massima all'interno del recipiente ventato              | [Pa]                 |
| $P_{MAX,MAX}$  | = pressione massima a concentrazioni stechiometriche                | [Pa]                 |
| $P_{MAX,AICC}$ | = pressione di AICC a concentrazioni stechiometriche                | [Pa]                 |
| $P_C$          | = potere calorifico   | [J/kg]               |
| $P_M$          | = peso molecolare   | [kg/mol]             |
| $P_v$          | = pressione di apertura dello sfianto                               | [Pa]                 |
| $Q$            | = portata volumetrica valutata nelle condizioni termodinamiche in V | [m <sup>3</sup> /s]  |
| $\rho$         | = densità   | [kg/m <sup>3</sup> ] |
| $t$            | = tempo del rilascio  | [s]                  |
| $V$            | = volume all'interno del quale avviene il rilascio                  | [m <sup>3</sup> ]    |
| $W$            | = portata ponderale di rilascio                                     | [kg/s]               |

**Pedici**

|                   |  |
|-------------------|--|
| amb               | = relativo alle condizioni termodinamiche in V |
| AICC              | = Adiabatic Isochoric Complete Combustion      |
| $G1, G2,..$       | = relativo ad un generico gas                  |
| i, H <sub>2</sub> | = idrogeno                                     |
| m                 | = metano                                       |
| p                 | = propano                                      |

**BIBLIOGRAFIA**

- [1] G. Fiore, M. Bazzichi, P. Cecchella, "Simulazioni di transitori di pressione durante esplosioni all'interno di edifici", VGR 98 Convegno Nazionale sulla Valutazione e Gestione del Rischio negli Insediamenti Civili ed Industriali - PISA - 6/8 ottobre 1998.
- [2] M.G. Zabetakis, "Flammability Characteristics of Combustible Gases and Vapours", U.S. Department of Mines Bulletin 627 (1965)
- [3] D.D.S. Liu, R. MacFarlane, "Laminar Burning velocities of Hydrogen-air-steam Flames", Combustion and Flame, 49, 59-71.
- [4] R.J. Harris, et alii, "Gas Explosions in Buildings and Heating Plant", E & FN Spon Ltd, London-New York, 1983.