



**«Scienza e Tecnica della Prevenzione Incendi»  
A.A. 2015 - 2016**

# Argomento



**Generalità sulla combustione e  
sostanze pericolose (2)**

**31.10.2015**

Marco Carcassi  
carcassi@ing.unipi.it



# La velocità di combustione

Questa dipende da:

- temperatura
- pressione
- concentrazione dei reagenti
- catalizzatori



# Propagazione della combustione

Il propagarsi di un incendio e più in particolare di una fiamma richiede la presenza contemporanea di tre requisiti fondamentali:

- **Combustibile (gas o polvere)**
- **comburente**
- **temperatura**



# Gas Infiammabili

- Loro pesantezza in relazione all'aria
  - Più leggero (metano)
  - Più pesante (GPL)





# Densità relativa di alcuni gas

| <b>Sostanza</b>               | <b>Densità di vapore<br/>relativa all'aria</b> |
|-------------------------------|--|
| <b>Acetilene</b>              | <b>0,90</b>                                    |
| <b>Acetone</b>                | <b>2</b>                                       |
| <b>Benzina</b>                | <b>3,5</b>                                     |
| <b>Gasolio</b>                | <b>7</b>                                       |
| <b>Idrogeno</b>               | <b>0,07</b>                                    |
| <b>Metano</b>                 | <b>0,55</b>                                    |
| <b>Pentano</b>                | <b>2,97</b>                                    |
| <b>Ossido di etilene</b>      | <b>1,52</b>                                    |
| <b>Ossido di<br/>carbonio</b> | <b>0,97</b>                                    |



# Velocità di propagazione

La **velocità** di propagazione della combustione varia notevolmente in relazione:

- alla **natura del gas**
- al **rapporto tra combustibile e comburente**
- alle **dimensioni dell'ambiente di combustione**



# Limite inferiore di infiammabilità

- rappresenta **la minima concentrazione di combustibile** nella miscela aria-combustibile a pressione e temperatura standard, che consente a quest'ultima, se innescata, di reagire dando luogo ad una combustione in grado di propagarsi a **tutta** la miscela.



# Limite superiore di infiammabilità

- Il limite superiore di infiammabilità rappresenta **la concentrazione massima di combustibile** nella miscela aria-combustibile a pressione e temperatura standard che consente a quest'ultima, se innescata, di reagire dando luogo ad una combustione in grado di propagarsi a **tutta** la miscela



# Valori dei Limiti per alcuni gas

| Combustibile | Limite Inferiore | Limite Superiore |
|--------------|------------------|------------------|
| Benzina      | 0,9              | 7,5              |
| Gas naturale | 3                | 15               |
| Gasolio      | 1                | 6                |
| Butano       | 1,5              | 8,5              |
| Metano       | 5                | 15               |

\* I valori rappresentano le **percentuali di combustibile in volume** nella miscela combustibile/comburente



# Limiti di infiammabilità

Generalmente i limiti inferiori e superiori di infiammabilità sono rispettivamente pari a 0.5 e 2 volte la concentrazione stechiometrica.

In alcuni casi, uno dei due limiti di infiammabilità può addirittura non esistere, come avviene per gas o vapori che subiscono una decomposizione esplosiva, come l'idrazina o l'ossido di etilene.



# Limiti di infiammabilità

I limiti di infiammabilità di gas e vapori sono generalmente espressi come percentuale in volume del combustibile nella miscela aria - combustibile.

nel caso di polveri, i limiti di infiammabilità sono espressi come peso di polvere per unità di volume di aria (tipicamente mg/litro)

ad una maggiore ampiezza del campo di infiammabilità, corrisponde una maggiore pericolosità del prodotto.



# Limiti di infiammabilità

|                   | Limite inf.<br>(% vol) | Limite sup.<br>(% vol) |
|-------------------|------------------------|------------------------|
| Acetilene         | 2.5                    | 100                    |
| Alcool etilico    | 3.3                    | 19                     |
| Alcool metilico   | 5,5                    | 26,6                   |
| Ammoniaca         | 15                     | 28                     |
| Benzene           | 1.3                    | 7.9                    |
| Benzina           | 0,7                    | 7,0                    |
| Butano            | 1,5                    | 8,5                    |
| Etilene           | 2.7                    | 37                     |
| Idrogeno          | 4.0                    | 75                     |
| Metano            | 5.0                    | 15                     |
| Ossido di etilene | 3.0                    | 100                    |
| Propano           | 2.1                    | 9.5                    |
| Propilene         | 2.4                    | 11                     |



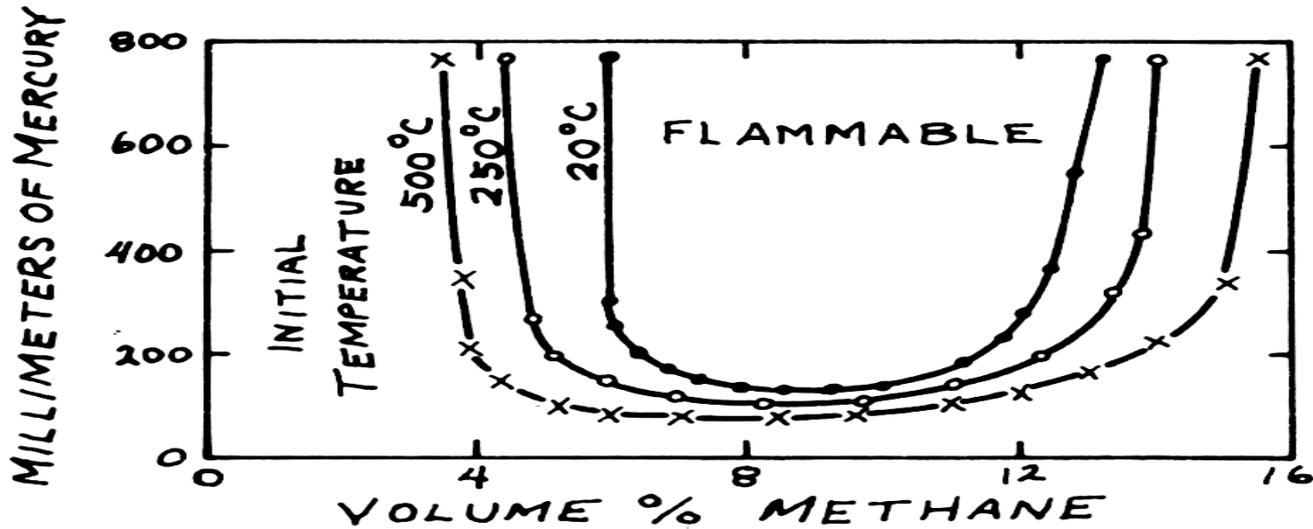
L'ampiezza della zona di infiammabilità delle polveri è maggiore di quella dei gas e vapori. Infatti il limite inferiore di infiammabilità dei combustibili gassosi (eccettuati idrogeno e acetilene) cade generalmente tra 35 e 50 mg/l, mentre quello delle polveri tra 15 e 30 mg/l.

|                 | Limite inf.<br>(mg/litro) |
|-----------------|---------------------------|
| Caffè           | 85                        |
| Carbone         | 55                        |
| Carbone attivo  | 100                       |
| Legno           | 20                        |
| Metil cellulosa | 30                        |
| Polipropilene   | 20                        |
| Zolfo           | 35                        |



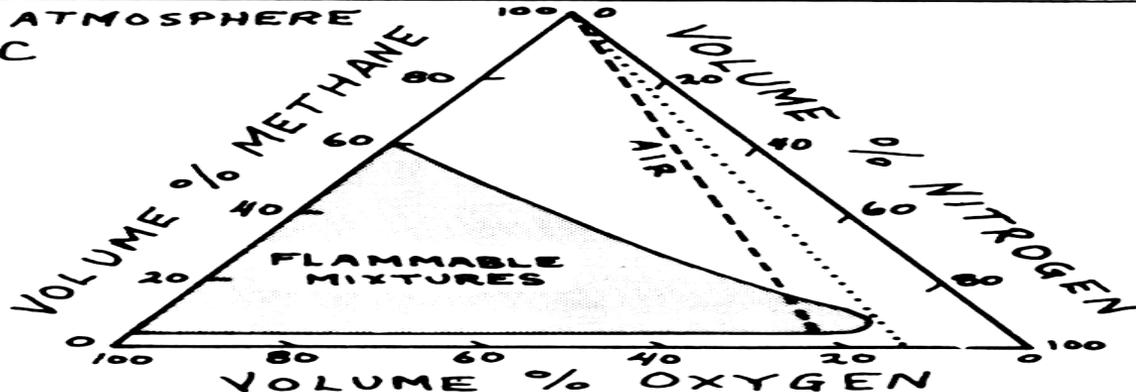
# INFIAMMABILITA' (cont.)

INFLUENCE OF PRESSURE & TEMPERATURE ON FLAMMABILITY OF METHANE IN AIR



METHANE - OXYGEN - NITROGEN SYSTEM FLAMMABILITY DIAGRAM

ONE ATMOSPHERE  
26°C



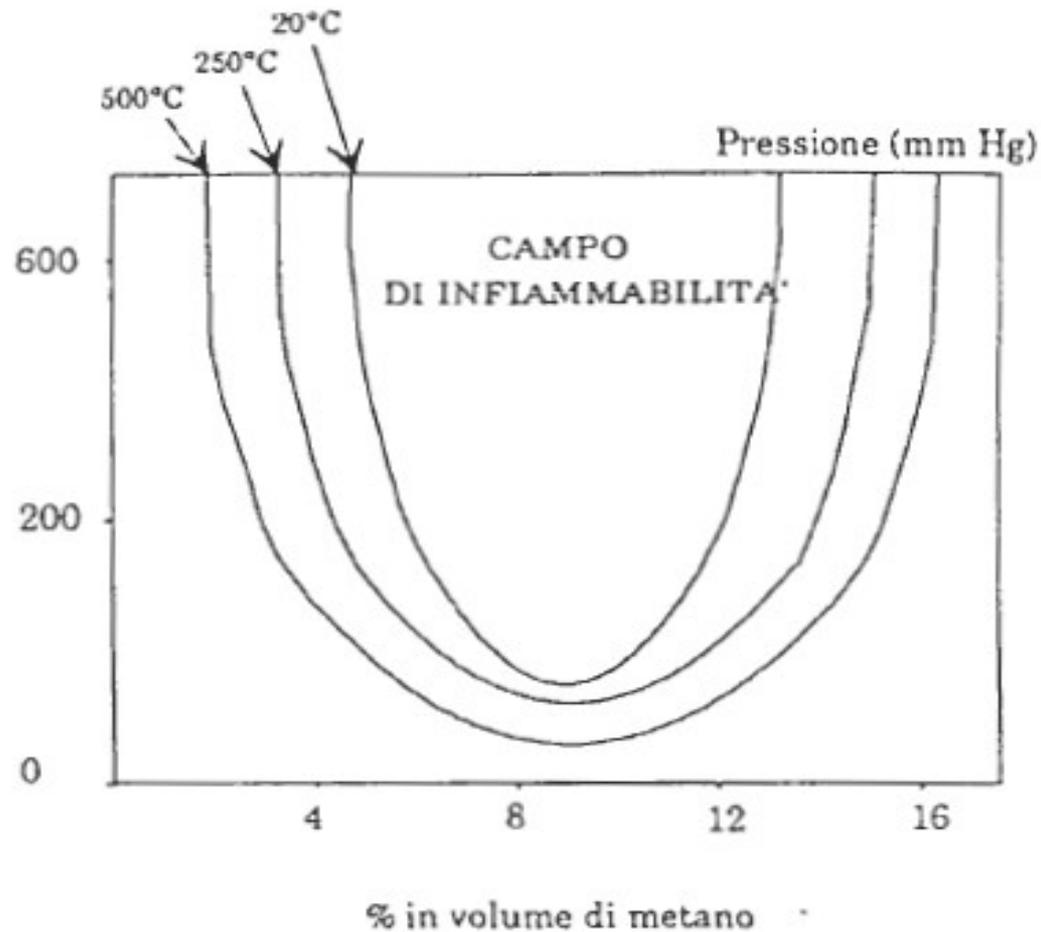


Fig. 7.12. Limiti di esplosività per miscela metano - aria.  
Rapporto stechiometrico di combustione  
9.4% in volume

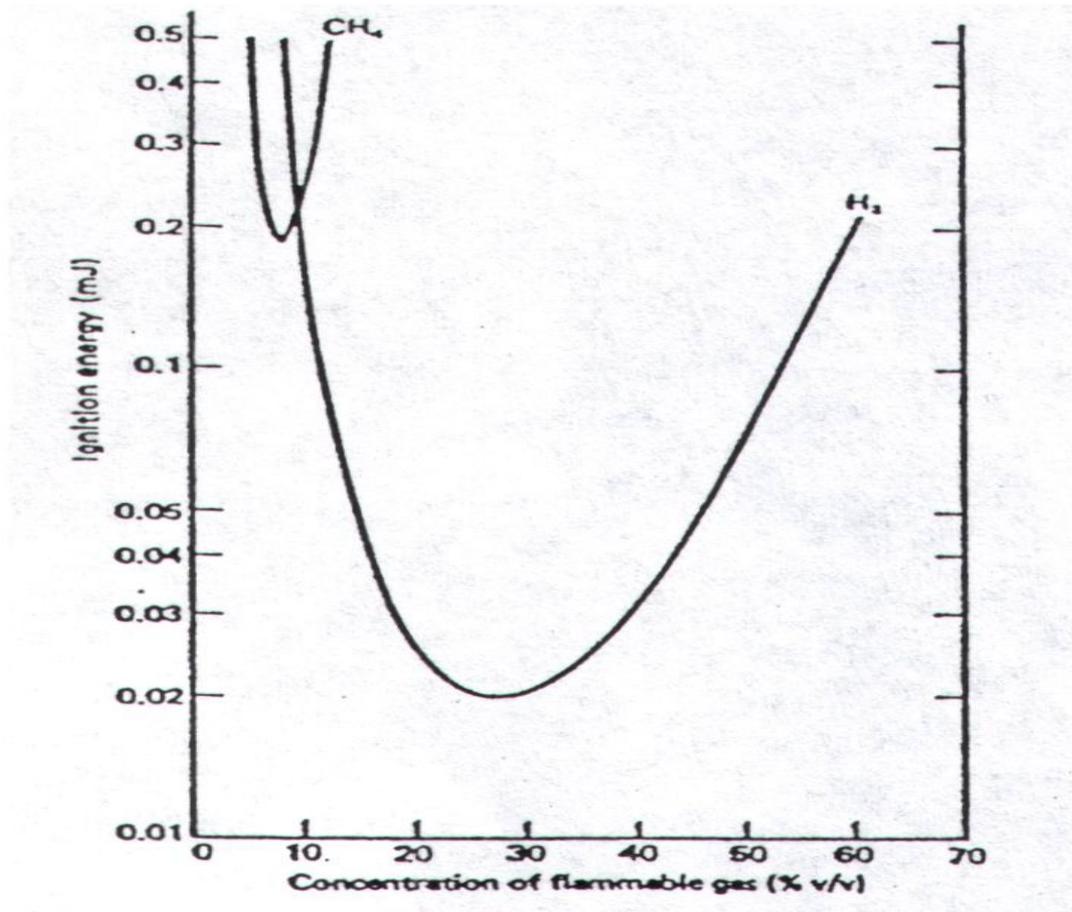


# Energia di accensione

Per avere l'accensione di una miscela aria combustibile, al di sotto della temperatura di accensione, è necessaria la presenza di un innesco, cioè di una fonte di ignizione.

Le possibili fonti di ignizione differiscono per energia fornita, durata e livello di temperatura.

# Energia di accensione





# Energia di ignizione

- |                     |       |    |
|---------------------|-------|----|
| • Acetilene         | 0.02  | mJ |
| • Carbone           | 60    | “  |
| • Idrogeno          | 0.02  | “  |
| • Metano            | 0.2   | “  |
| • Ossido di etilene | 0.087 | “  |
| • Polipropilene     | 30    | “  |
| • Propano           | 0.3   | “  |
| • Propilene         | 0.282 | “  |
| • Zolfo             | 15    | “  |
| •                   |       |    |



# Tipi di innesco

L'ignizione può anche avvenire in modo indiretto, nel caso in cui si abbia la trasmissione del calore da un locale dove è presente l'incendio ad un altro.



# Tipi di innesco

L'ignizione può avvenire in modo **diretto** per mezzo di:

una scintilla o un **arco elettrico**

- **Attrito**

- una **scintilla** o un **arco elettrico**

- una **fiamma**

- un **materiale incandescente**

- **spontaneamente** come risultato di un'azione chimica o catalitica



# Sorgenti di Innesco

## Dirette

Fiamma,  
mozzicone di sigaretta,  
fiammifero,  
scintille di origine  
meccanica  
operazioni di taglio e  
saldatura alla fiamma,  
arco elettrico,  
lampade,  
resistenze elettriche,  
scariche elettrostatiche,  
attrito  
apparecchi elettrici.

## Indirette

Trasmissione del calore per  
convezione,  
conduzione  
irraggiamento  
(Es.: corrente di aria calda  
generata da un incendio  
e diffusa attraverso un  
vano scala o un cavedio;  
propagazione del calore  
attraverso elementi  
metallici strutturali  
dell'edificio; superfici  
calde)

**Table 1.3** TYPICAL COMBUSTION PROPERTIES OF SOME HYDROCARBON GASES AND HYDROGEN IN AIR

| Fuel                    | Molecular weight | A<br>Flammability limits<br>% w/v gas |       | % Gas at stoichiometric ratio | B<br>% Gas at maximum burning velocity | B<br>Maximum laminar burning velocity $S_L$ (m/s) |
|-------------------------|------------------|---------------------------------------|-------|-------------------------------|--|---|
|                         |                  | Lower                                 | Upper |                               |  |   |
| Hydrogen $H_2$          | 2                | 4                                     | 75    | 30                            | 54                                     | 3.5   |
| Methane $CH_4$          | 16               | 5                                     | 15    | 9.5                           | 10                                     | 0.45  |
| Ethane $C_2H_6$         | 30               | 3                                     | 12.5  | 5.6                           | 6.3                                    | 0.53  |
| Propane $C_3H_8$        | 44               | 2.2                                   | 9.5   | 4.0                           | 4.5                                    | 0.52  |
| Butane $C_4H_{10}$      | 58               | 1.9                                   | 8.5   | 3.1                           | 3.5                                    | 0.50  |
| Pentane $C_5H_{12}$     | 72               | 1.5                                   | 7.8   | 2.6                           | 2.9                                    | 0.52  |
| Hexane $C_6H_{14}$      | 86               | 1.2                                   | 7.5   | 2.2                           | 2.5                                    | 0.52  |
| Heptane $C_7H_{16}$     | 100              | 1.2                                   | 6.7   | 1.9                           | 2.3                                    | 0.52  |
| Acetylene $C_2H_2$      | 26               | 2.5                                   | 80    | 7.7                           | 9.3                                    | 1.98  |
| Ethylene $C_2H_4$       | 28               | 3.1                                   | 38    | 6.5                           | 7.4                                    | 0.83  |
| Propylene $C_3H_6$      | 42               | 2.4                                   | 10.3  | 4.4                           | 5.0                                    | 0.66  |
| Butylene $C_4H_8$       | 56               | 1.7                                   | 9.5   | 3.4                           | 3.9                                    | 0.57  |
| Benzene $C_6H_6$        | 78               | 1.4                                   | 7.1   | 2.7                           | 3.3                                    | 0.62  |
| Cyclohexane $C_6H_{12}$ | 84               | 1.3                                   | 8.0   | 2.3                           | 2.7                                    | 0.52  |

A From Coward and Jones<sup>1</sup>

B Value for  $H_2$  from Rose and Cooper<sup>2</sup>. Value for  $C_2H_2$  as recommended by Andrews and Bradley<sup>3</sup>

Other values based on comparative data from Gerstein *et al*<sup>4</sup> which have been corrected in line with a currently accepted value of 0.45 m/s for methane-air - See Andrews and Bradley<sup>3</sup>

C Values marked by \* from Lewis and Von Elbe<sup>1</sup>, other values from Perry and Chilton<sup>5</sup>

| C<br>Adiabatic flame temperature $T_f$ , K | Expansion ratio $T_f/T_i$ ( $T_i = 298K$ ) | D<br>Maximum laminar flame speed (m/s) | E<br>Auto-ignition temperature K | F<br>Minimum ignition energy, millijoules | G<br>Net calorific value (298K, 1 atm) $MJ/m^3$ | Fuel                    |
|--|--|--|----------------------------------|---|---|-------------------------|
| 2318*                                      | 8.0  | 28.0                                   | 847                              | 0.02                                      | 10.2  | Hydrogen $H_2$          |
| 2148*                                      | 7.4  | 3.5                                    | 813                              | 0.29                                      | 34  | Methane $CH_4$          |
| 2168*                                      | 7.5  | 4.0                                    | 788                              | 0.24                                      | 60.5  | Ethane $C_2H_6$         |
| 2198*                                      | 7.6  | 4.0                                    | 723                              | 0.25                                      | 86.4  | Propane $C_3H_8$        |
| 2168*                                      | 7.5  | 3.7                                    | 678                              | 0.25                                      | 112.4   | Butane $C_4H_{10}$      |
| 2232                                       | 7.7  | 4.0                                    | 533                              | 0.25                                      | 138.1   | Pentane $C_5H_{12}$     |
| 2221                                       | 7.7  | 4.0                                    | 498                              | 0.25                                      | 164.4   | Hexane $C_6H_{14}$      |
| 2196                                       | 7.6  | 4.0                                    | 488                              | 0.25                                      | 190.4   | Heptane $C_7H_{16}$     |
| 2598*                                      | 9.0  | 14.2                                   | 578                              | 0.02                                      | 51  | Acetylene $C_2H_2$      |
| 2248*                                      | 7.8  | 6.5                                    | 763                              | 0.12                                      | 58  | Ethylene $C_2H_4$       |
| 2208*                                      | 7.7  | 5.1                                    | 733                              | 0.28                                      | 81.5  | Propylene $C_3H_6$      |
| 2203*                                      | 7.6  | 4.3                                    | 688                              | 0.28                                      | 107.1   | Butylene $C_4H_8$       |
| 2287                                       | 7.9  | 4.9                                    | 833                              | 0.22                                      | 134   | Benzene $C_6H_6$        |
| 2232                                       | 7.8  | 4.1                                    | 518                              | 0.24                                      | 167.3   | Cyclohexane $C_6H_{12}$ |

D Assumes  $S_L = S_L(T/T_i)$  - See Section 1.3.3

E Value for Hydrogen from Perry and Chilton<sup>5</sup> - all others from Zabetakis<sup>6</sup>

F Values from Lewis and Von Elbe<sup>1</sup>. Values represent minimum energy stored in test circuit prior to spark discharge

G Values from Rose and Cooper<sup>2</sup>



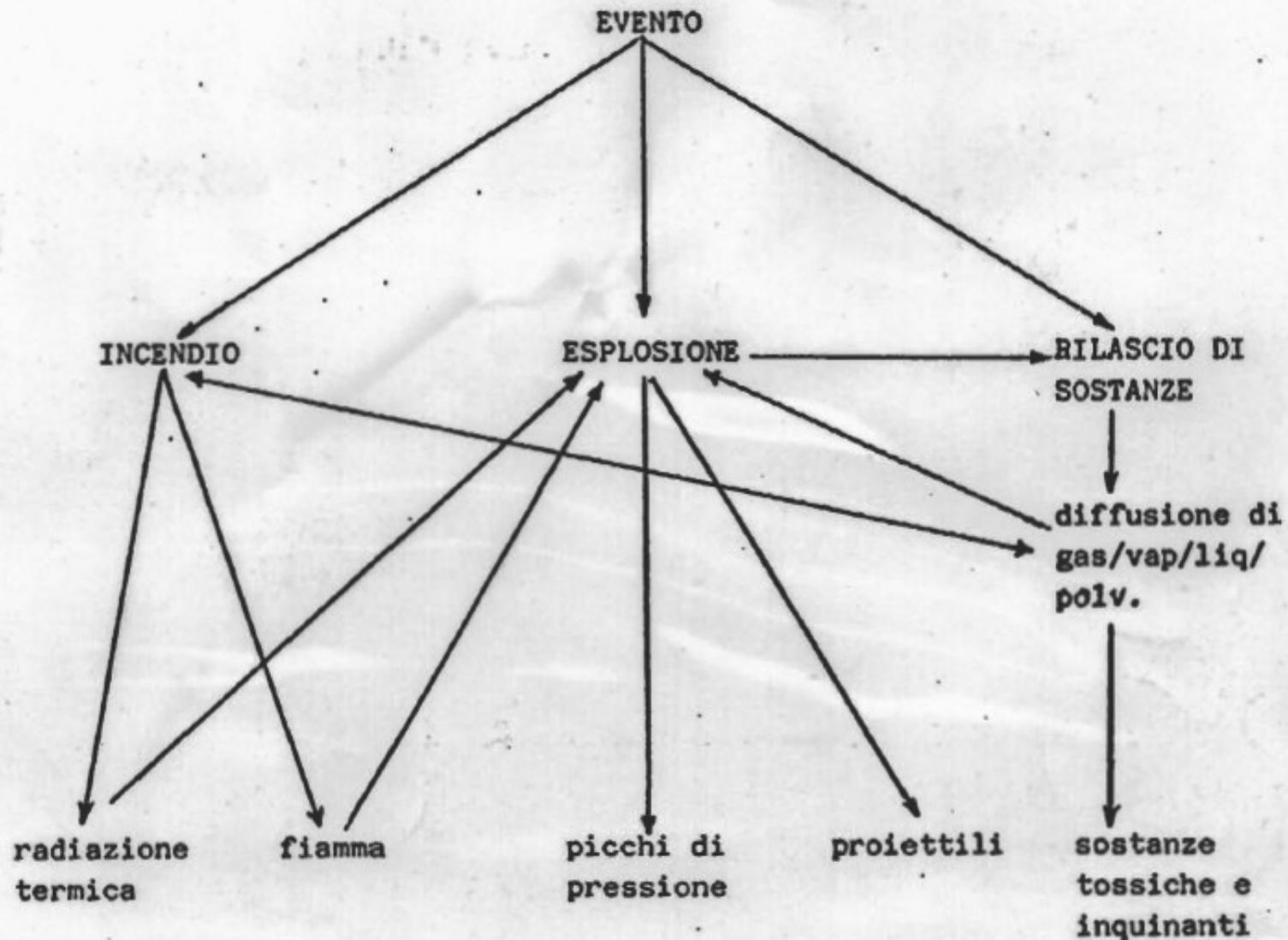
# Combustibili

| Combustibili        | Temp. accens.<br>(°C) | Temp. infiam.<br>(°C) | Energia ignizione<br>(in j) | Campo infiam. (% in aria) |
|---------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------------|---------------------------|
| Metano              | 540                   | -180                  | 0,470                       | 5 + 15                    |
| Etano               | 520                   | -134                  | 0,285                       | 3 + 15,5                  |
| Propano             | 465                   | -102                  | 0,305                       | 2 + 9,5                   |
| n-Pentano           | 285                   | -40                   | 0,49                        | 1,4 + 8                   |
| Ciclopentano        | 380                   | -38                   | 0,540                       | n.d.                      |
| Etilene             | 425                   | -135                  | 0,096                       | 2,7 + 34                  |
| Acetilene           | 300                   | -18                   | 0,020                       | 1,5 + 82                  |
| Benzene             | 550                   | -11                   | 0,550                       | 1 + 8                     |
| Alcool metilico     | 385                   | 10                    | 0,210                       | 5,4 + 44                  |
| Alcool isopropilico | 400                   | 11                    | 0,650                       | 2 + 12                    |
| Acetone             | 465                   | -19                   | 1,150                       | 2,5 + 13                  |
| Idrogeno            | 560                   |                       | 0,020                       | 4 + 75                    |



# Altre caratteristiche

|                | Peso specifico<br>relativo all'aria | Temperatura di<br>infiammabilità | Temperatura<br>accensione °C | Campo di<br>infiammabilità<br>nell'aria - % in<br>volume | kcal/kg<br>Potere calorifico |
|----------------|-------------------------------------|----------------------------------|------------------------------|--|------------------------------|
| Acetilene      | 0,90                                | gas                              | 300                          | 1,5-----82   | 1175                         |
| Alcol metilico | 1,11                                | 11°C                             | 455                          | 5,5----26,5  | 5280                         |
| Benzine        | >2,50                               | <0°C                             | 280                          | 0,7  | 10500                        |
| Butano         | 2,05                                | gas                              | 365                          | 1,5--8,5   | 11800                        |
| Idrogeno       | 0,07                                | gas                              | 560                          | 4,0-----75   | 29000                        |
| Metano         | 0,55                                | gas                              | 537                          | 5,0----15  | 11950                        |
| Propano        | 1,56                                | gas                              | 466                          | 2,1---9,5  | 11080                        |





# ESPLOSIONE

L'ESPLOSIONE E' L'IMPROVVISO RILASCIO  
DELL'ENERGIA CHE, IN UNA DELLE TANTE  
FORME POSSIBILI, E' IMMAGAZINATA IN UN  
SISTEMA

UN METODO EMPIRICO DI DISCRIMINAZIONE RICONOSCE  
COME ESPLOSIONI SOLTANTO QUEI PROCESSI IN CUI GLI  
EFFETTI DELLE ONDE DI PRESSIONE ASSOCIATE AL  
RILASCIO DI ENERGIA, SONO PERCEPIBILI ALL'ORECCHIO  
UMANO



# E N E R G I A

*L'energia può essere presente sotto varie forme quali nucleare, di pressione, chimica, elettrica e così via.*

## E S E M P I

|   | K J / K g           |
|---|---------------------|
| FUSIONE NUCLEARE                          | $3.3 \cdot 10^{11}$ |
| FISSIONE NUCLEARE                         | $8.2 \cdot 10^{10}$ |
| H <sub>2</sub> LIQUIDO + OSSIGENO LIQUIDO | 16700               |
| TNT                                       | 4500                |
| MISCELA DIMETANO ARIA                     | 3594                |
| CARBONE                                   | 2930                |



# T I P I D I E S L O S I O N I

ESPLOSIONI DI POLVERE O DI COMBUSTIBILI FLUIDO DI  
COMBUSTIBILI GASSOSI IN VOLUME LIBERO O IN VOLUME  
CONFINATI

ESPLOSIONI DI SERBATOIO CONTENENTI FLUIDI IN  
PRESSIONE CHE HANNO L'INNESCO IN UN PUNTO  
DEBOLE DELLA STRUTTURA

ESPLOSIONI DI VAPORE CHE SI PRODUCONO QUANDO DUE  
SOSTANZE DI DIVERSA TEMPERATURA SONO  
RAPIDAMENTE MISCELATE TRA DI LORO

ESPLOSIONI CHIMICHE CAUSATE DA REAZIONI CHE  
SFUGGONO PER INCONTROLLATE VARIAZIONI DEL  
PROCESSO

ESPLOSIONI IN FASE CONDENSATA

ESPLOSIONI NUCLEARI



Esplosione in una cartiera



Esplosione in un Inceneritore





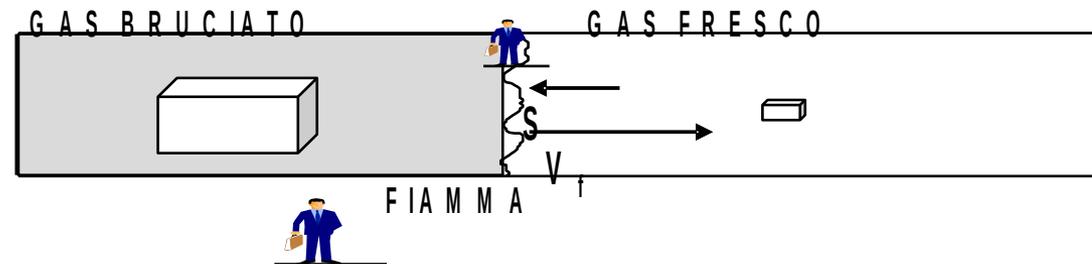
NAVE

C  
H  
I  
M  
I  
C  
H  
I  
E  
R  
A



# PROPAGAZIONE

## SCHEMA DI PROPAGAZIONE PIANA

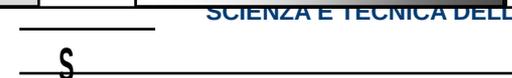
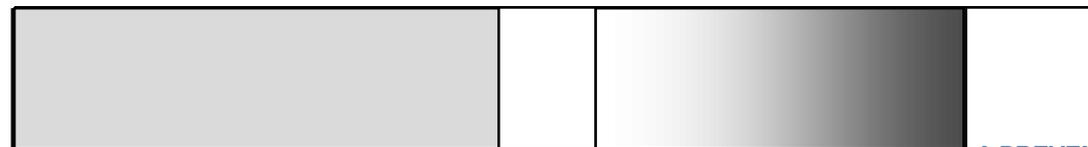


$$V_f = S E$$

$V_f$  = VELOCITA' DELLA FIAMMA

$S$  = VELOCITA' DI BRUCIAMENTO

$E$  = FATTORE DI ESPANSIONE =  $(T_f/T_i) (N_b/N_u)$



$$\rho_u u_u = \rho_b u_b$$

$$P_u + \rho_u u_u^2 = P_b + \rho_b u_b^2$$

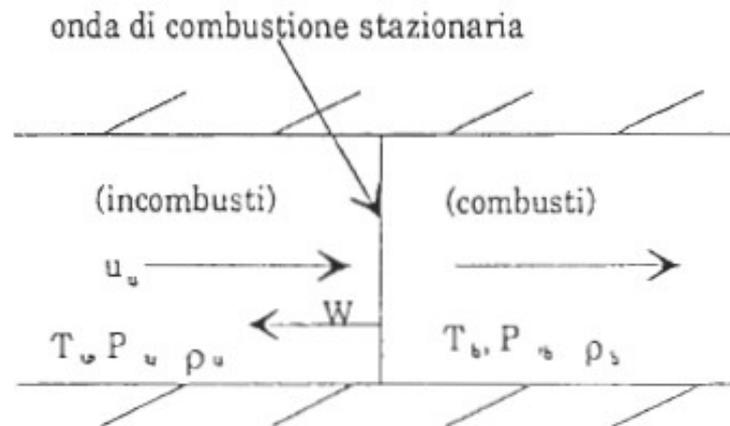
$$\frac{u_u^2}{2} + C_p T_u + q = \frac{u_b^2}{2} + C_p T_b$$

Le equazioni di bilancio sono state scritte con riferimento ad un sistema di coordinate solidale con l'onda di combustione (che si assume con velocità costante, uguale in modulo e opposta in verso alla velocità  $u_u$  dei gas incombusti); si è inoltre assunto che i calori specifici dei gas combustibili e di quelli incombusti siano uguali e costanti nel corso del processo. L'introduzione di tali

bilancio della massa (7.29.)

bilancio della quantità di moto (7.30.)

bilancio dell'energia (7.31.)



$W$  = velocità dell'onda rispetto ad un sistema fisso di coordinate.  
 $u$  = velocità del gas relative all'onda.

Fig. 7.7. Diagramma schematico di un'onda piana e stazionaria di combustione.

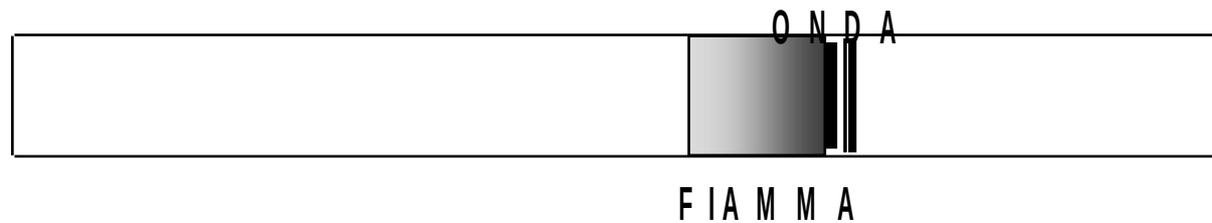


# D E T O N A Z I O N E

## D E F L A G R A Z I O N E



## D E T O N A Z I O N E



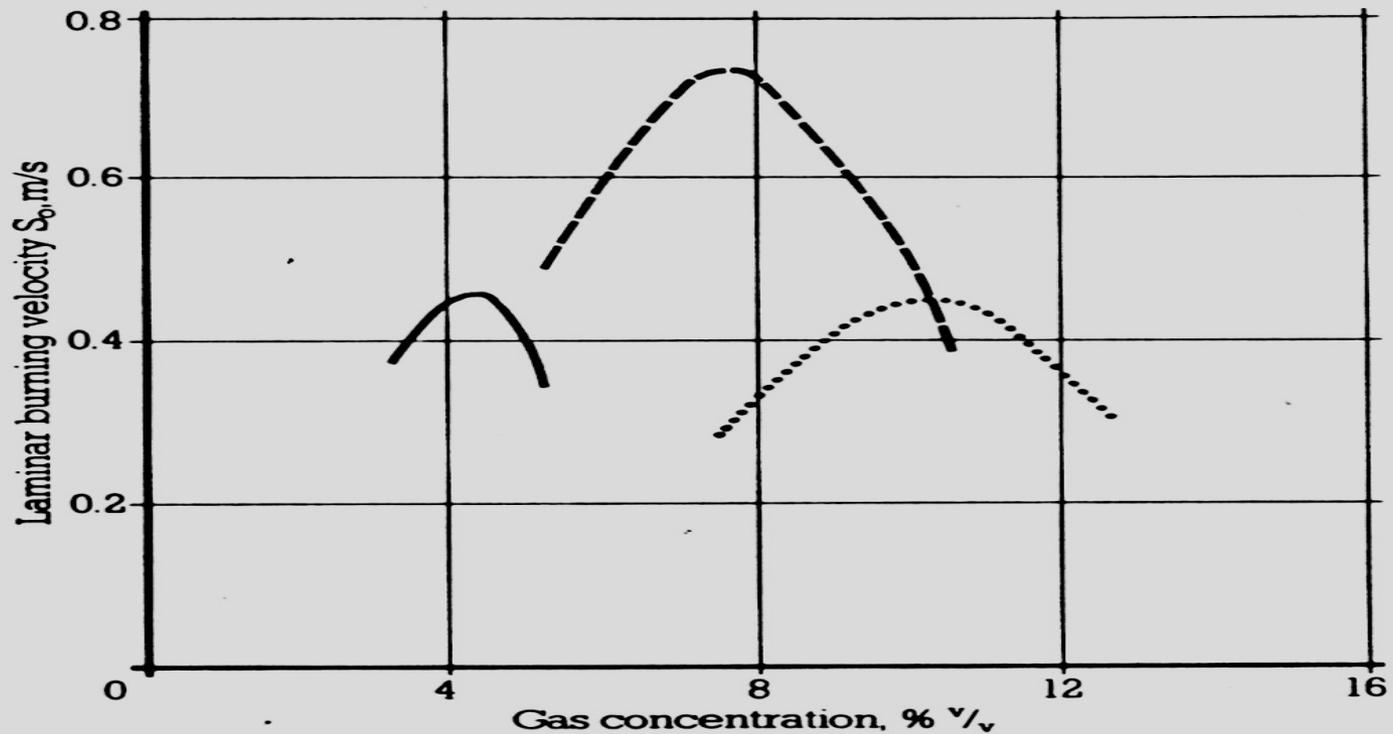


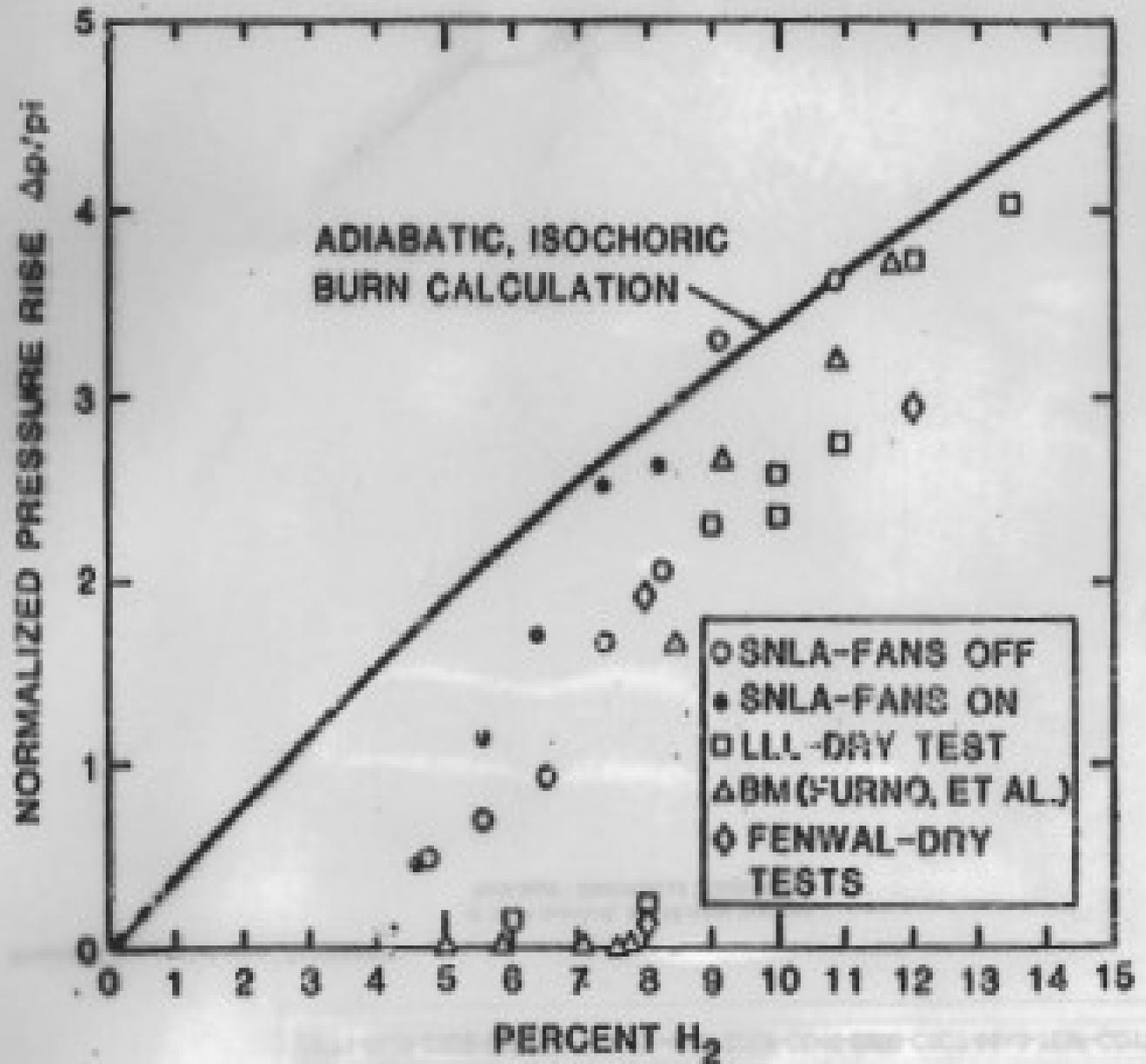
# BURNING VELOCITY

## EFFECT OF GAS CONCENTRATION ON BURNING VELOCITY

Results from Gibbs and Calcote<sup>10</sup>—see table 1.2 for recommended maximum values for different fuels

— Propane–Air  
 - - - Ethylene–Air  
 ..... Methane–Air





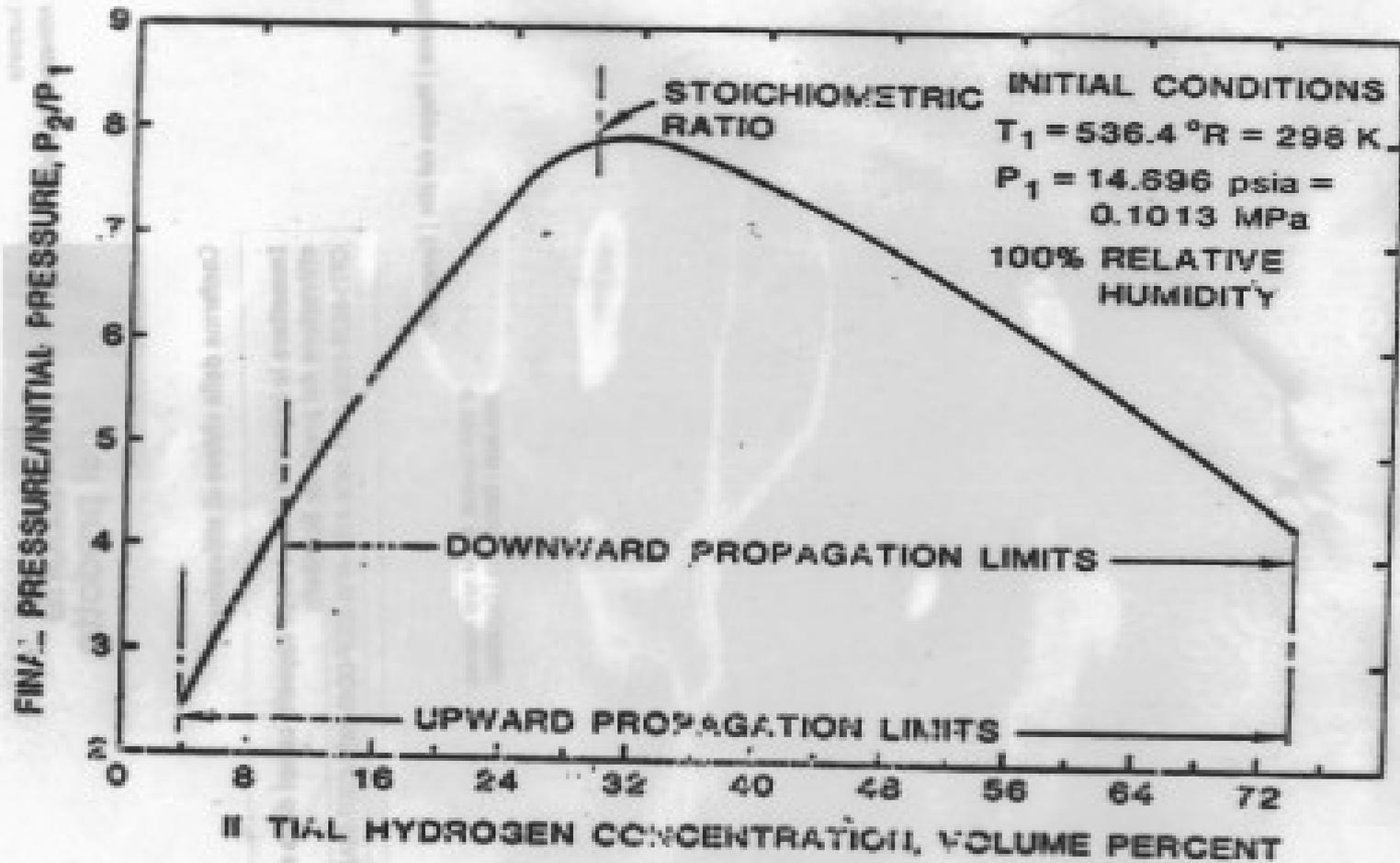


Figure 2-10. Theoretical Adiabatic, Constant-Volume Combustion Pressure for Hydrogen-Air Mixtures

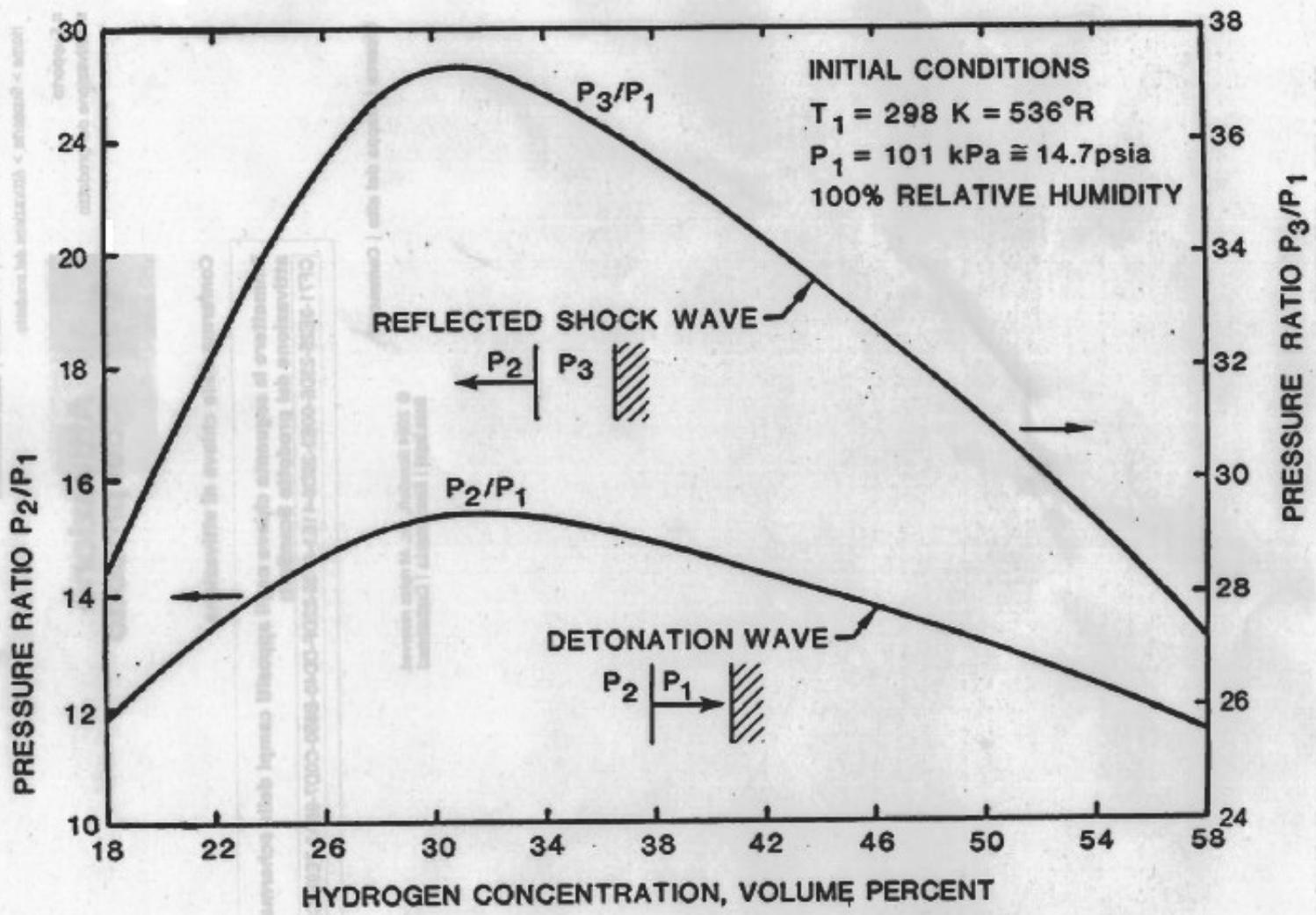
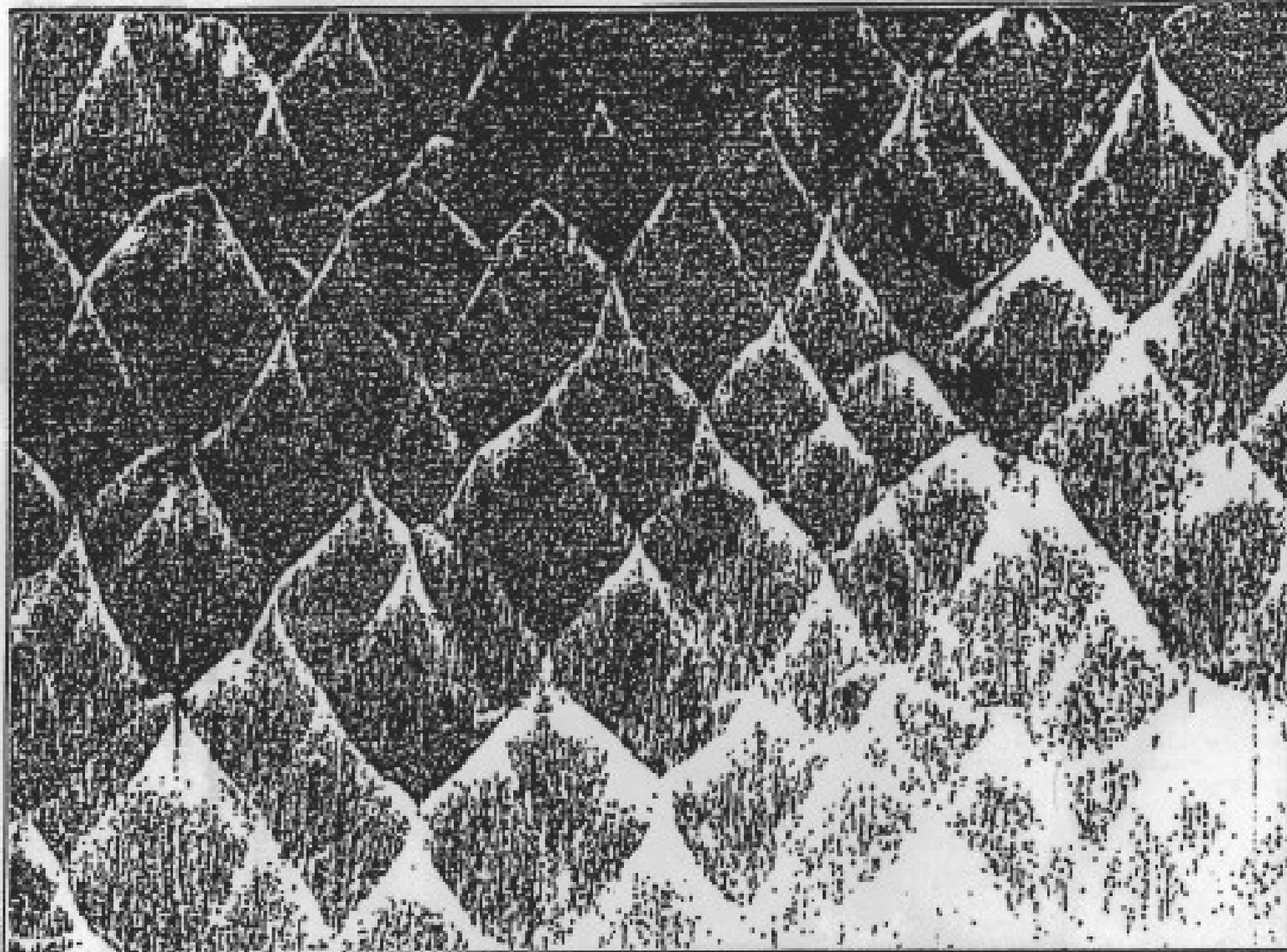
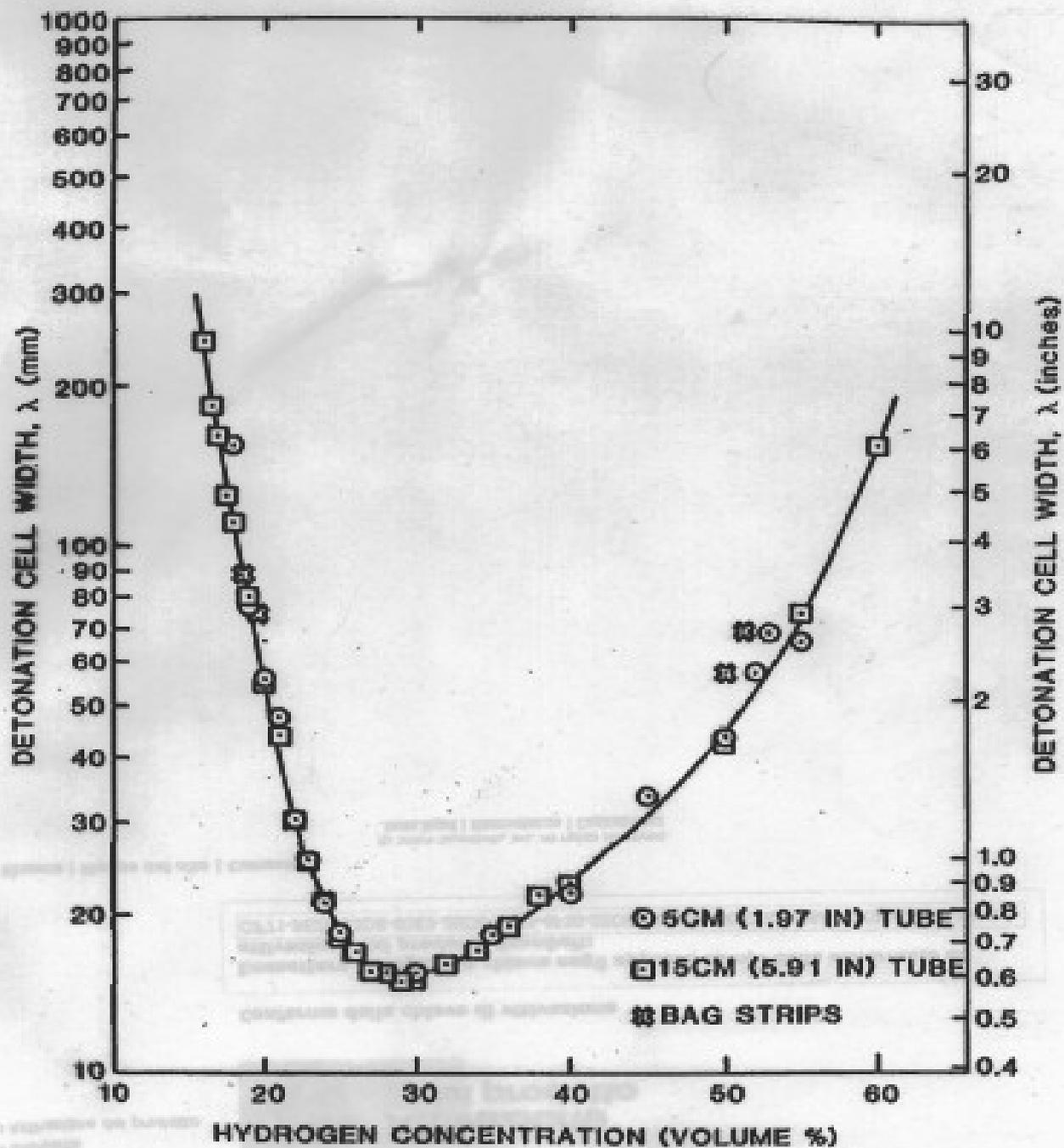
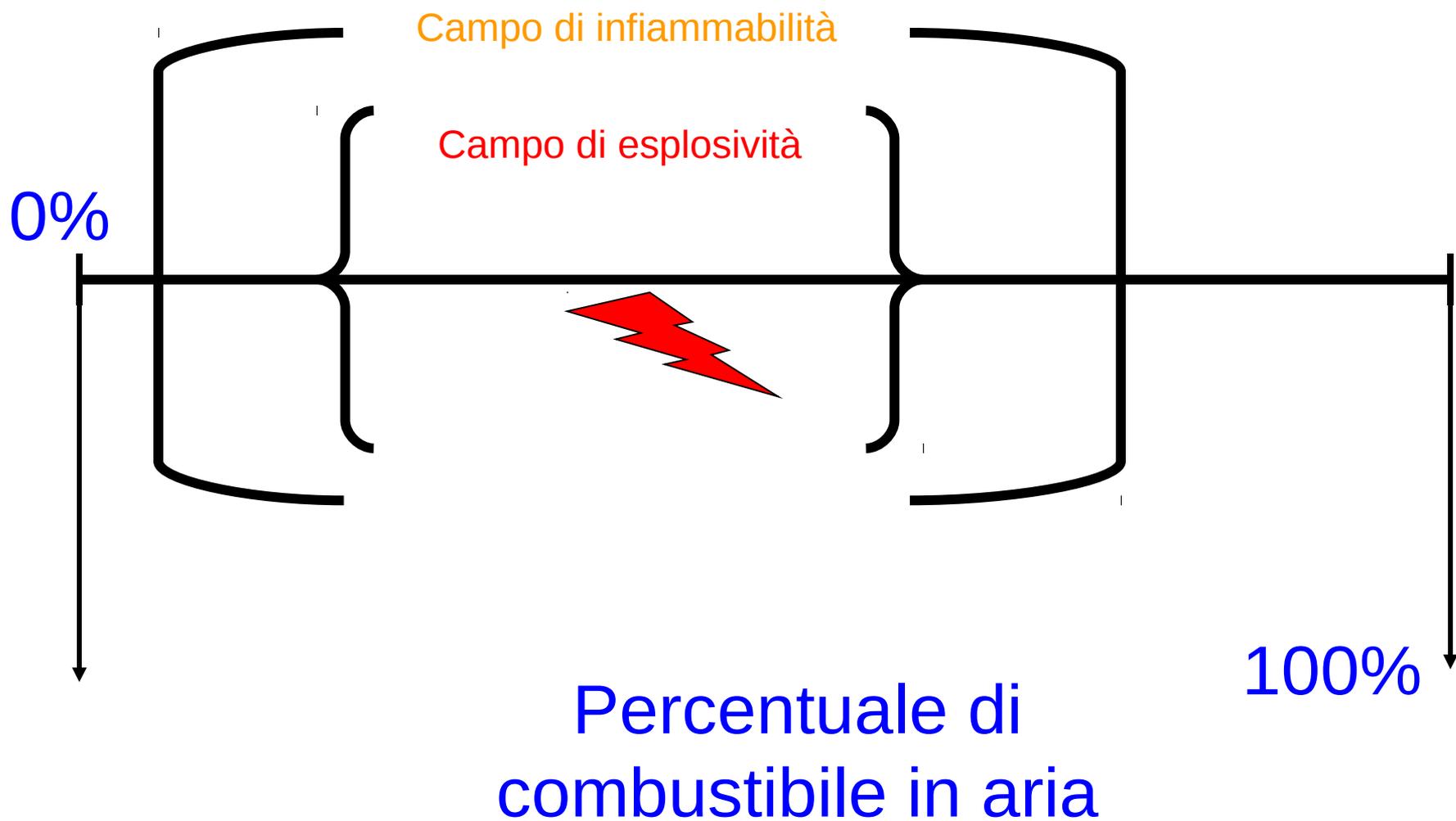
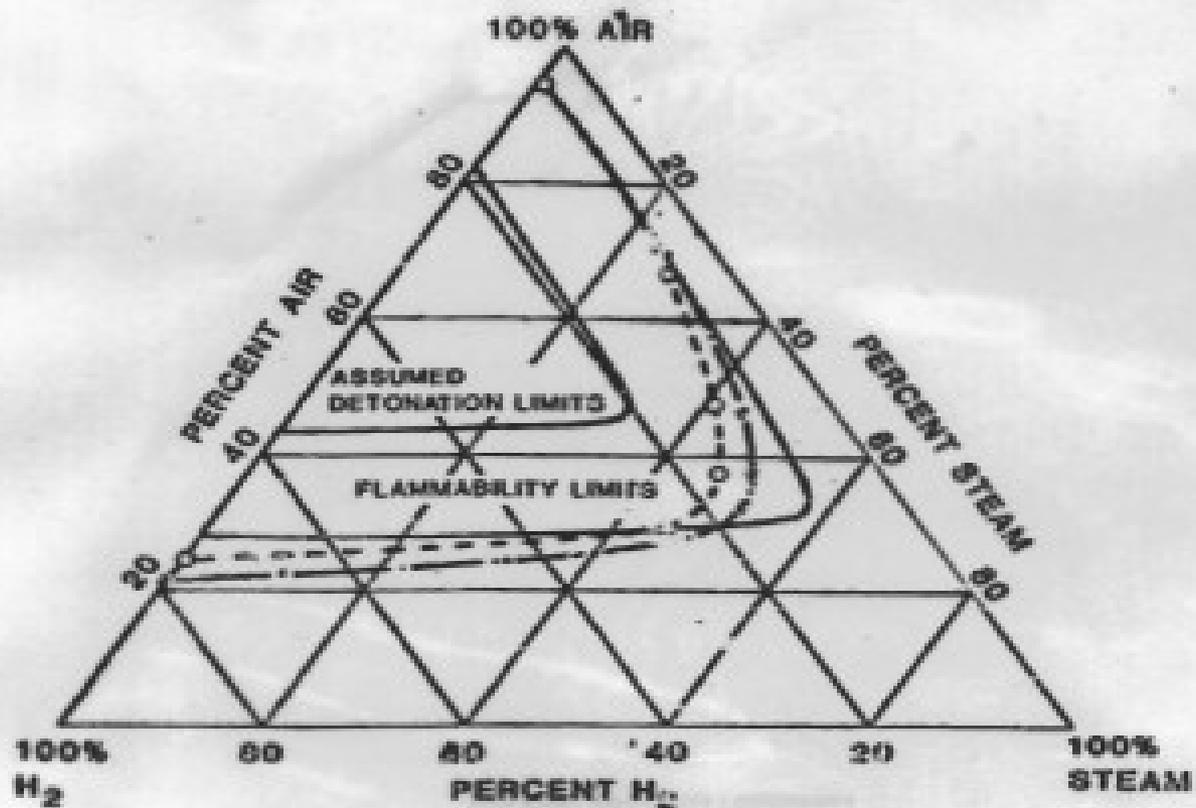


Figure 2-25. Theoretical Detonation Pressure and Normally Reflected Detonation Pressure for Hydrogen:Air Mixtures









**FLAMMABILITY LIMITS**

———— 58°F - 167°F AT 0 psig (20°C - 88°C AT 101 kPa)

○----- 300°F - 0 psig (149°C - 101 kPa)

⊙----- 300°F - 100 psig (149°C - 892 kPa)

Figure 2-16. Flammability and Detonation Limits of Hydrogen:Air:Steam Mixtures