



Dipartimento di Ingegneria Civile e Industriale

**«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

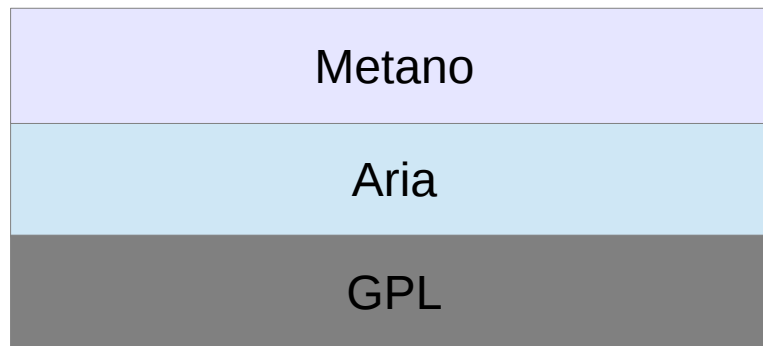
Il propagarsi di un incendio e più in particolare di una fiamma richiede la presenza contemporanea di tre requisiti fondamentali:

- **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

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



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. (% vol)	Limite sup. (% 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



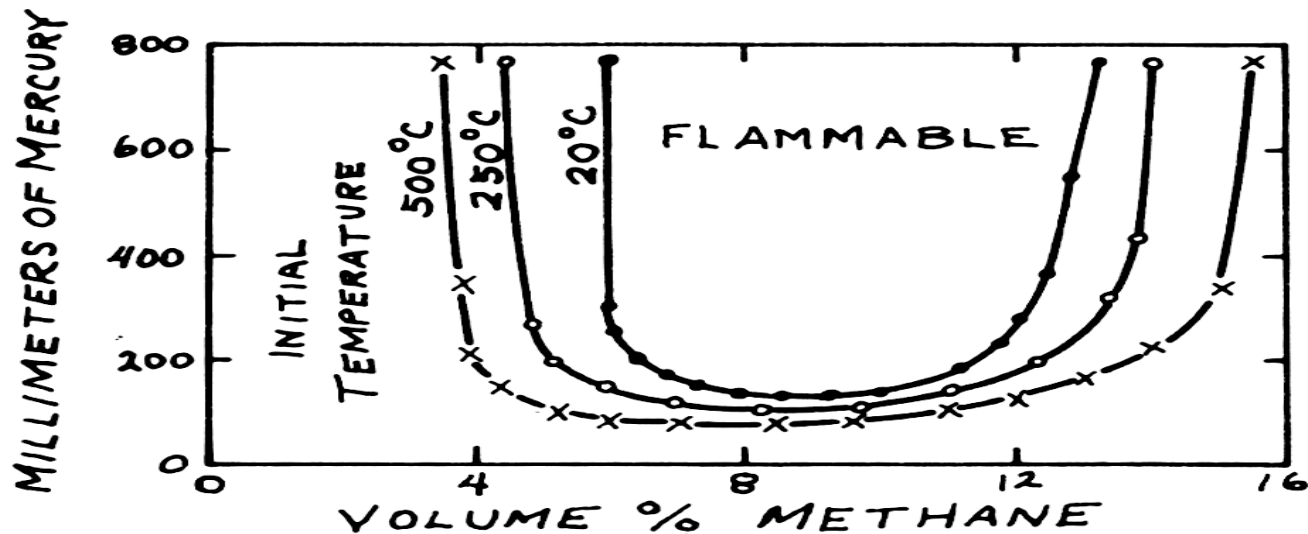
L'ampiezza della zona di infiammabilità delle polveri è maggiore di quella dei gas e vapori. Infatti il limite inferiore di infiammabilità dei combustibili gassosi (eccettuati idrogeno e acetilene) cade generalmente tra 35 e 50 mg/l, mentre quello delle polveri tra 15 e 30 mg/l.

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



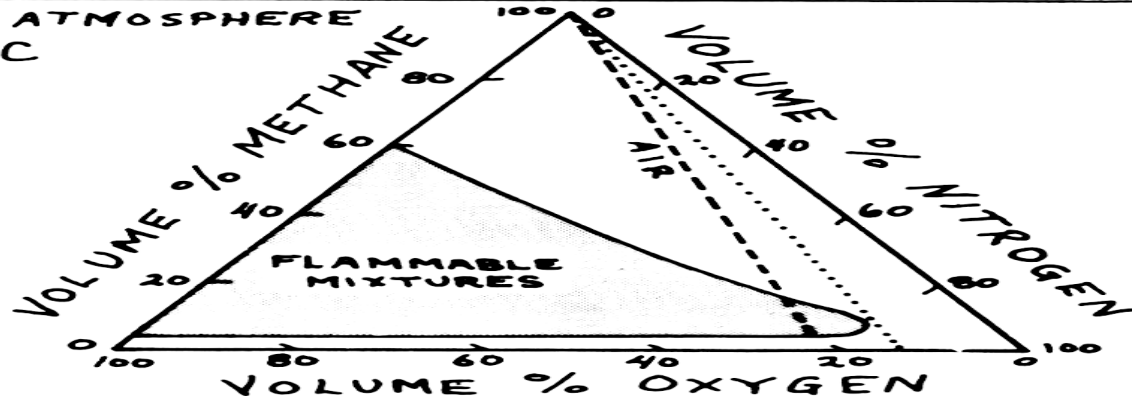
INFIAMMABILITA' (cont.)

INFLUENCE OF PRESSURE & TEMPERATURE
ON FLAMMABILITY OF METHANE IN AIR



METHANE - OXYGEN - NITROGEN
SYSTEM FLAMMABILITY DIAGRAM

ONE ATMOSPHERE
26°C



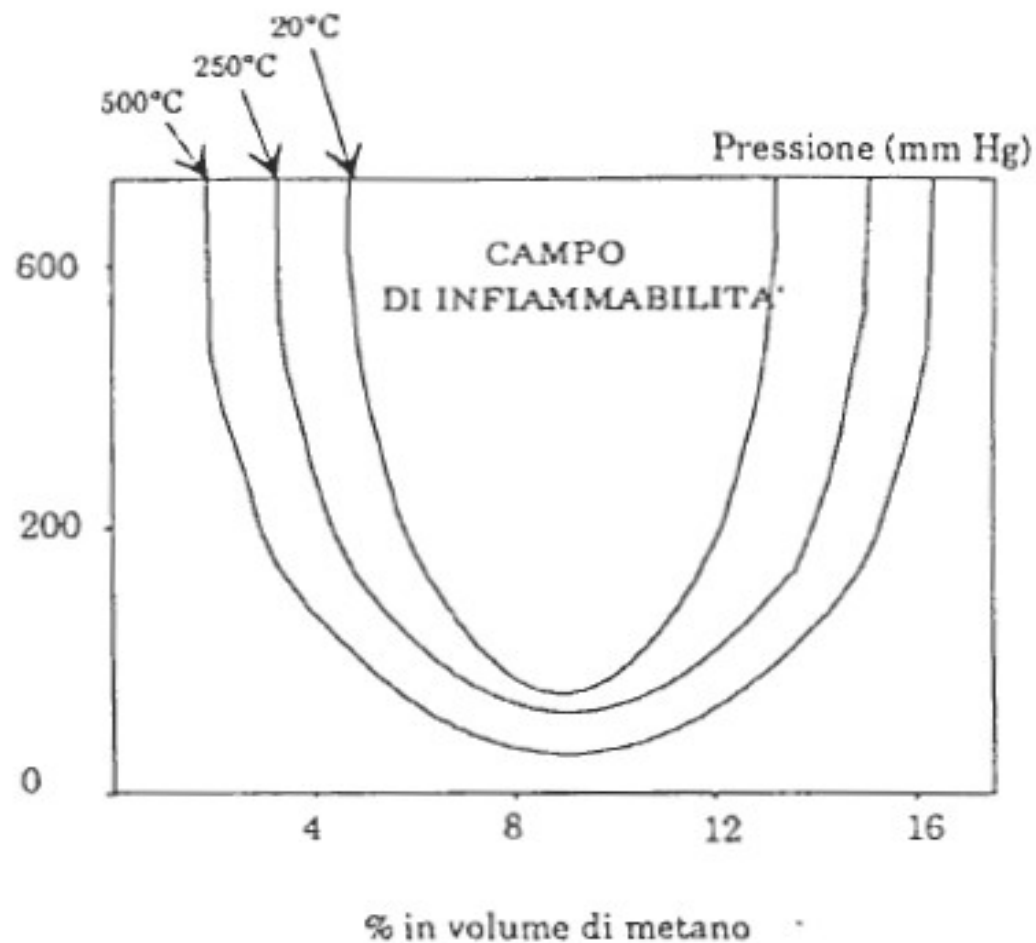


Fig. 7.12. Limiti di esplosività per miscela metano - aria.
Rapporto stechiometrico di combustione
9.4% in volume



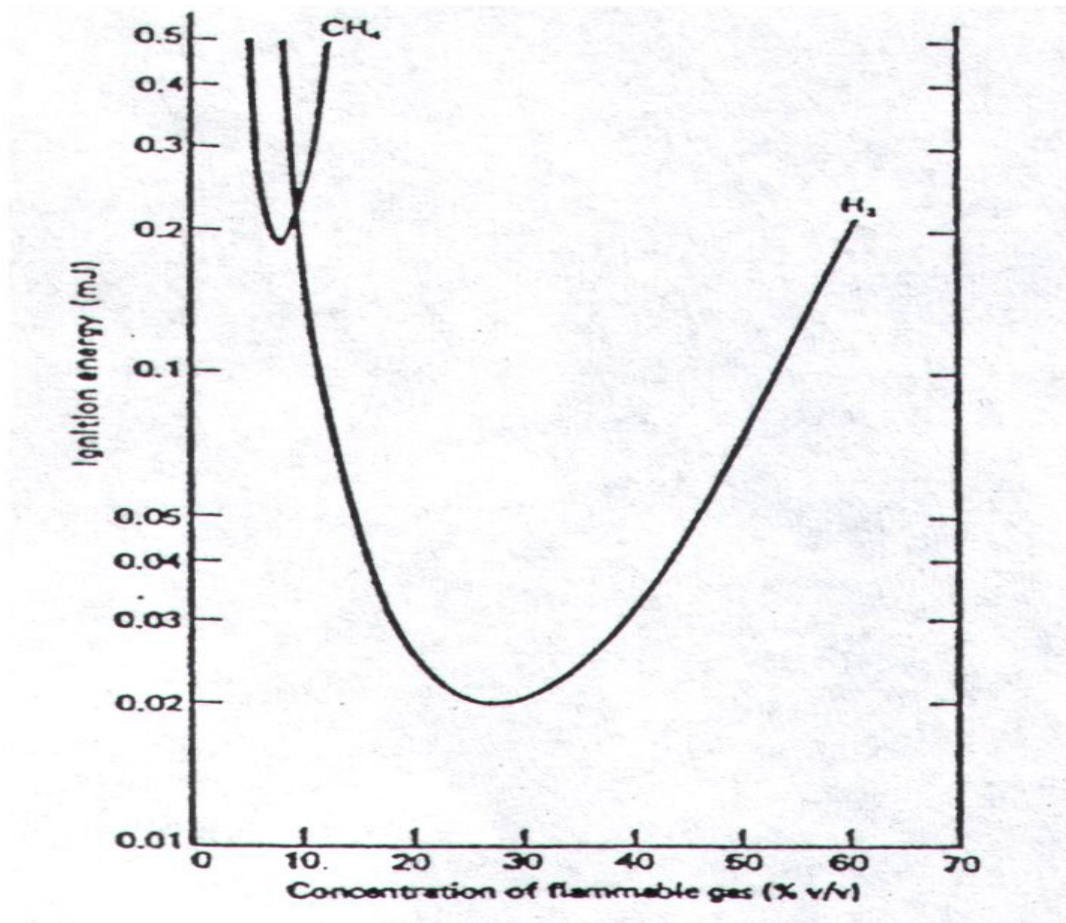
Energia di accensione

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 1.2 TYPICAL COMBUSTION PROPERTIES OF SOME HYDROCARBON GASES AND HYDROGEN IN AIR

Fuel	Molecular weight	A Flammability limits % w/v gas		% Gas at stoichiometric ratio	B % Gas at maximum burning velocity	B Maximum laminar burning velocity S_u (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	32	6.5	7.4	0.80
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 Jones¹

B Value for H_2 from Rose and Cooper². Value for C_2H_2 as recommended by Andrews and Bradley³

Other values based on comparative data from Gerstein *et al*⁴ which have been corrected in line with a currently accepted value of 0.45 m/s for methane-air - See Andrews and Bradley³

C Values marked by * from Lewis and Von Elbe¹, other values from Perry and Chilton⁵

C Adiabatic flame temperature T_f K	Expansion ratio T_f/T_i ($T_i = 288K$)	D Maximum laminar flame speed (m/s)	E Auto-ignition temperature K	F Minimum ignition energy, millijoules	G Net calorific value (288K, 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	658	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 $S_u = S_u(T/T_i)$ - See Section 1.3.3

E Value for Hydrogen from Perry and Chilton⁵ - all others from Zabetakis⁶

F Values from Lewis and Von Elbe¹. Values represent minimum energy stored in test circuit prior to spark discharge

G Values from Rose and Cooper²



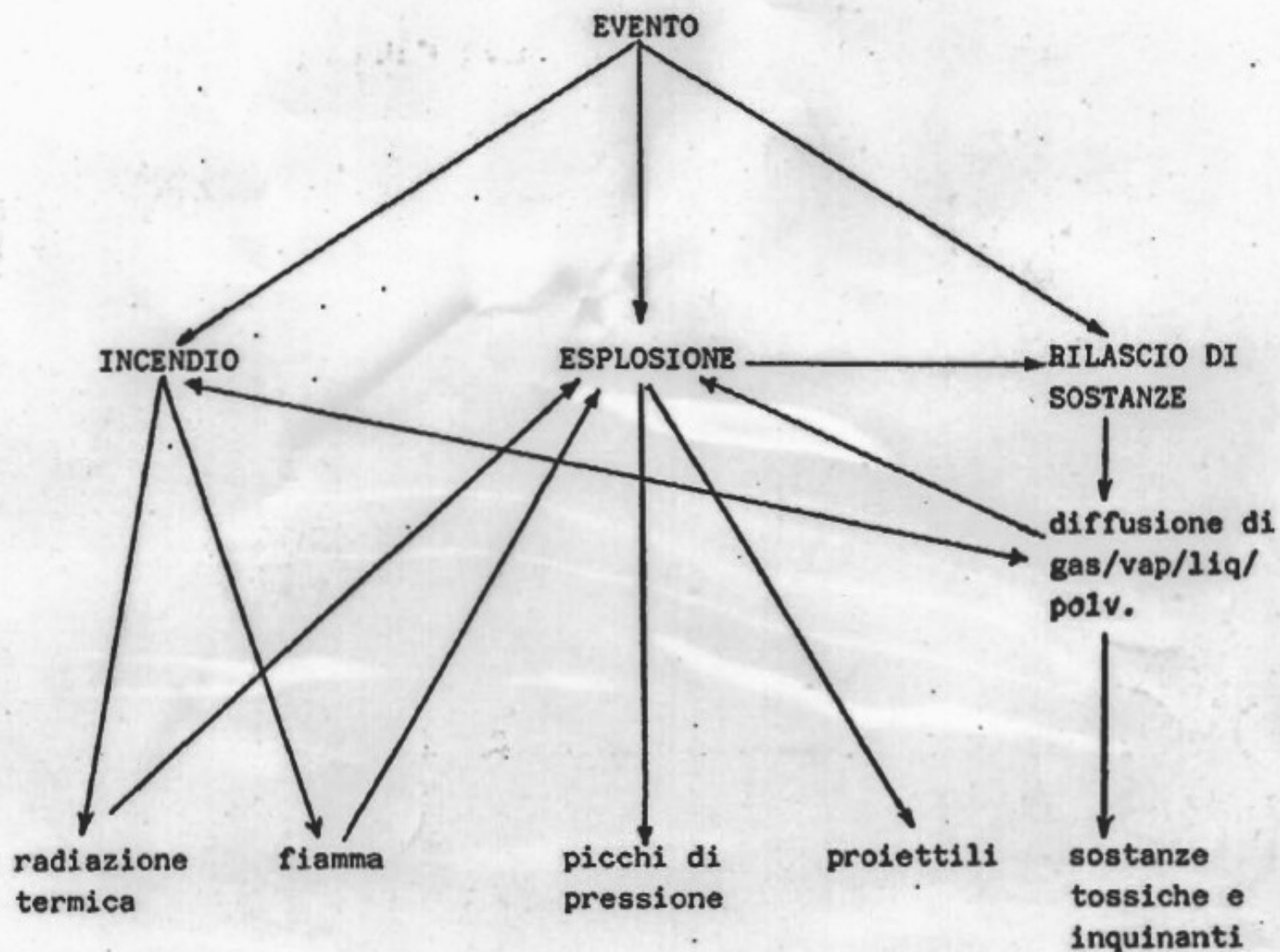
Combustibili

Combustibili	Temp. accens. (°C)	Temp. infiam. (°C)	Energia ignizione (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 relativo all'aria	Temperatura di inflammabilità	Temperatura accensione °C	Campo di inflammabilità nell'aria - % in volume	kcal/kg 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 ESPLOSIONE 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 ₂ 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 FLUIDI O DI
COMBUSTIBILI GASSOSI IN VOLUMI LIBERI O DI VOLUMI
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





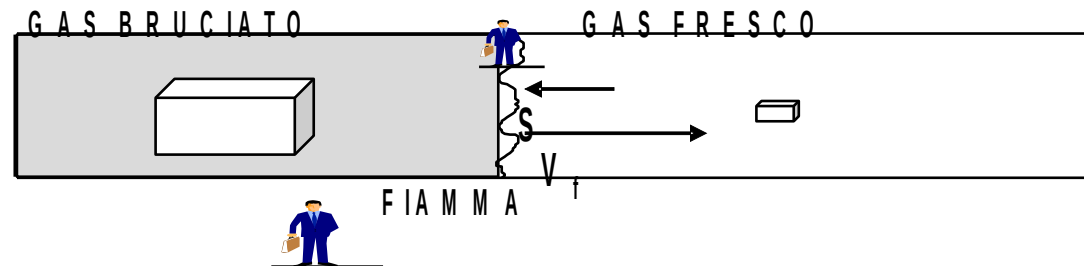
NAVE

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 = $(T_f / T_i) (N_b / N_u)$





$$\rho_u u_u = \rho_b u_b$$

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

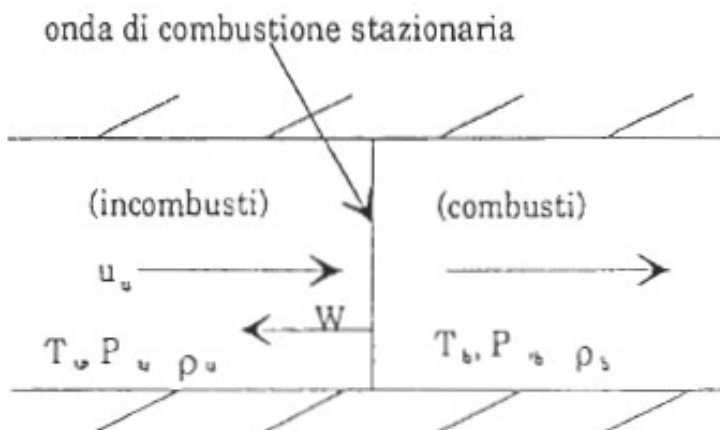
$$\frac{u_u^2}{2} + C_p T_u + q = \frac{u_b^2}{2} + C_p T_b$$

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 combusti 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.)



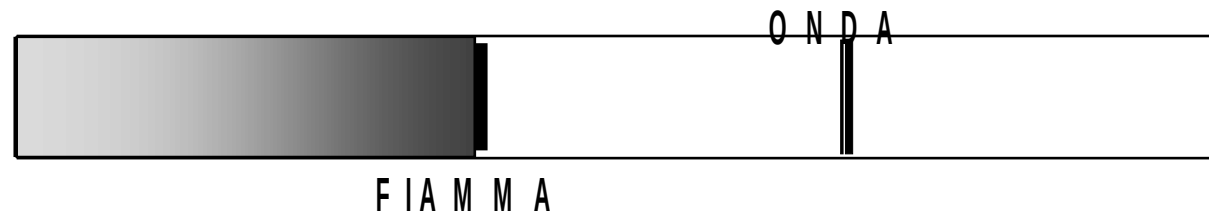
W = velocità dell'onda rispetto ad un sistema fisso di coordinate.
 u = velocità del gas relative all'onda.

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

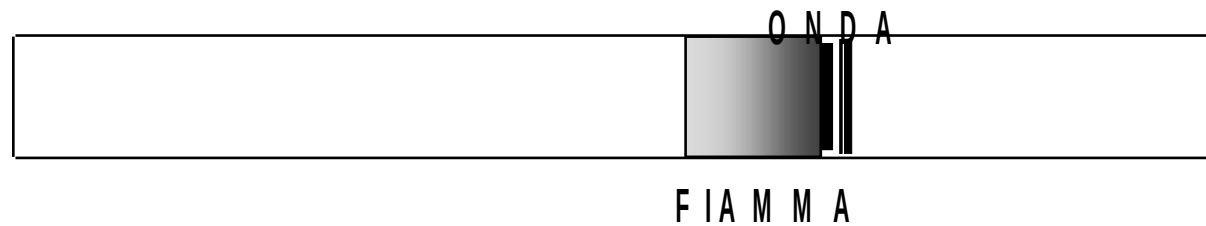


DETONAZIONE

DEFLAGRAZIONE



DETONAZIONE



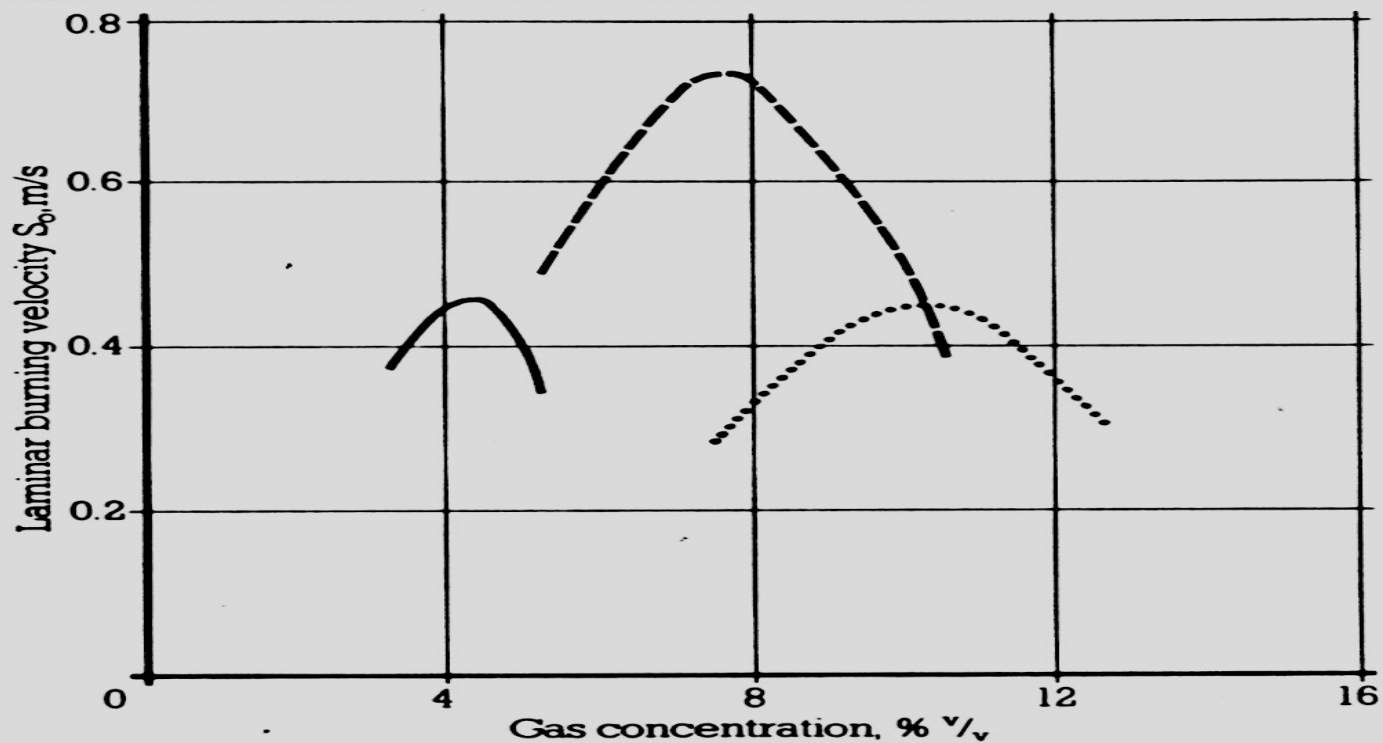


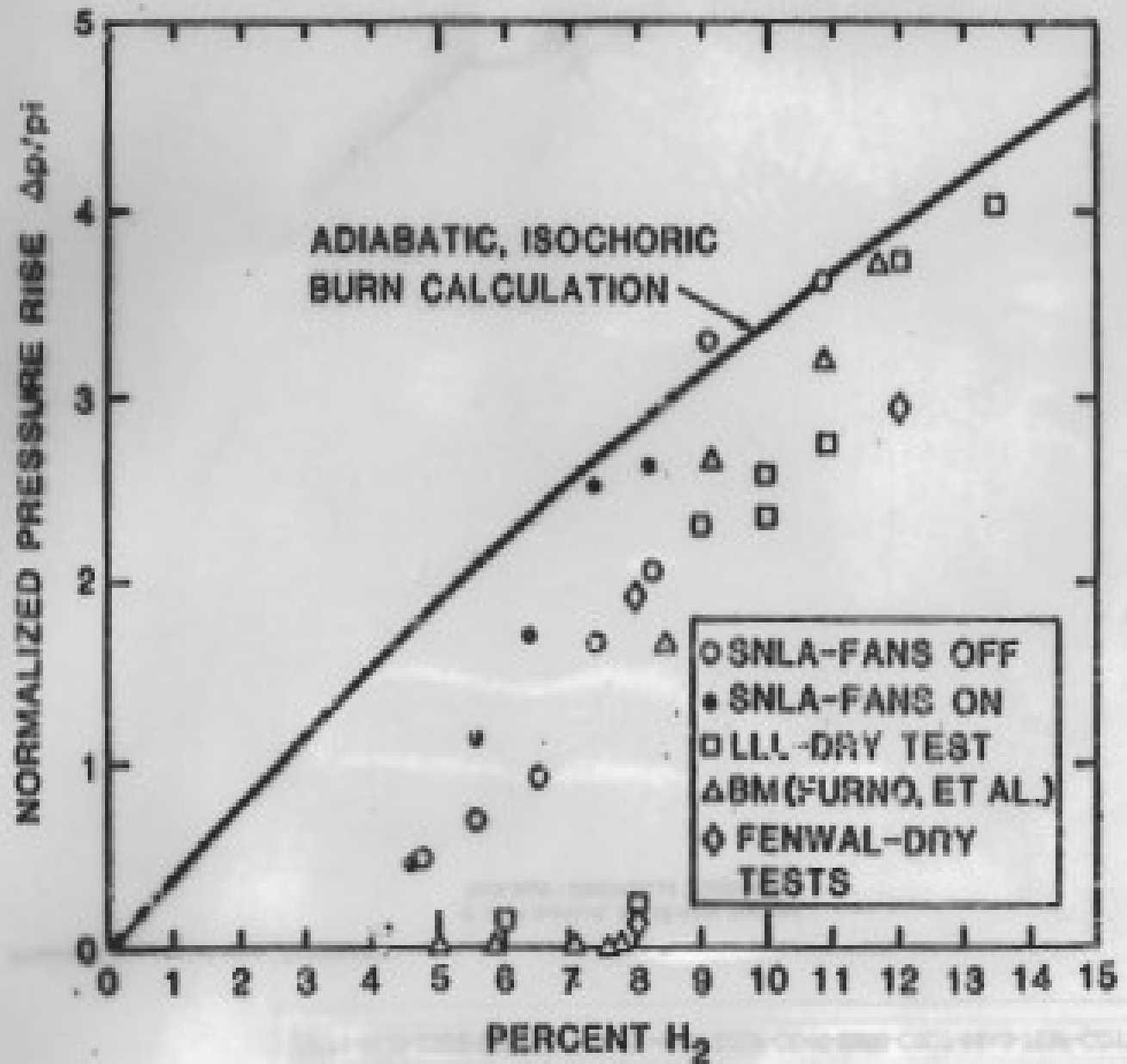
BURNING VELOCITY

EFFECT OF GAS CONCENTRATION ON BURNING VELOCITY

Results from Gibbs and Calcote¹⁰—see table 1.2 for recommended maximum values for different fuels

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





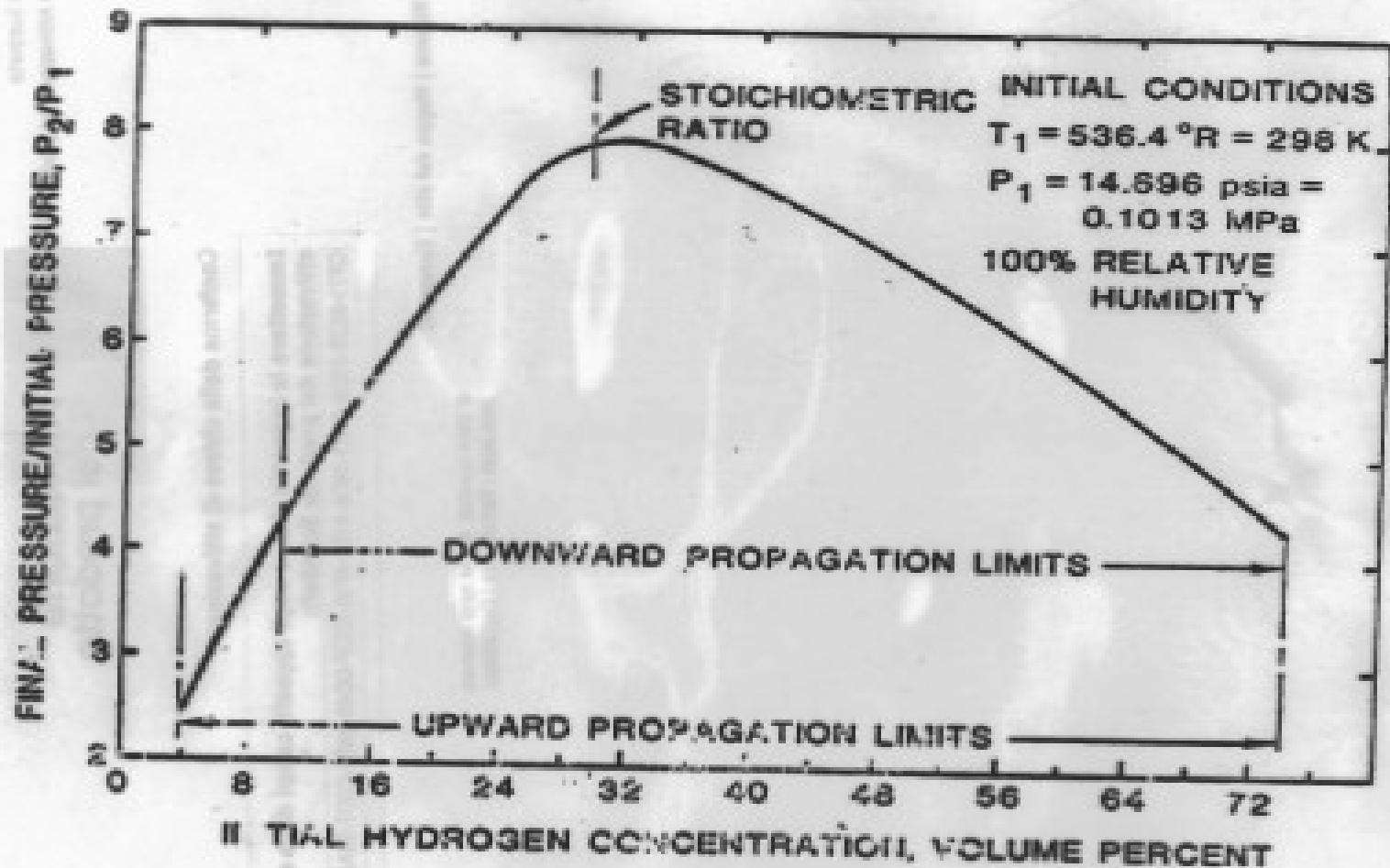


Figure 2-10. Theoretical Adiabatic, Constant-Volume Combustion Pressure for Hydrogen-Air Mixtures

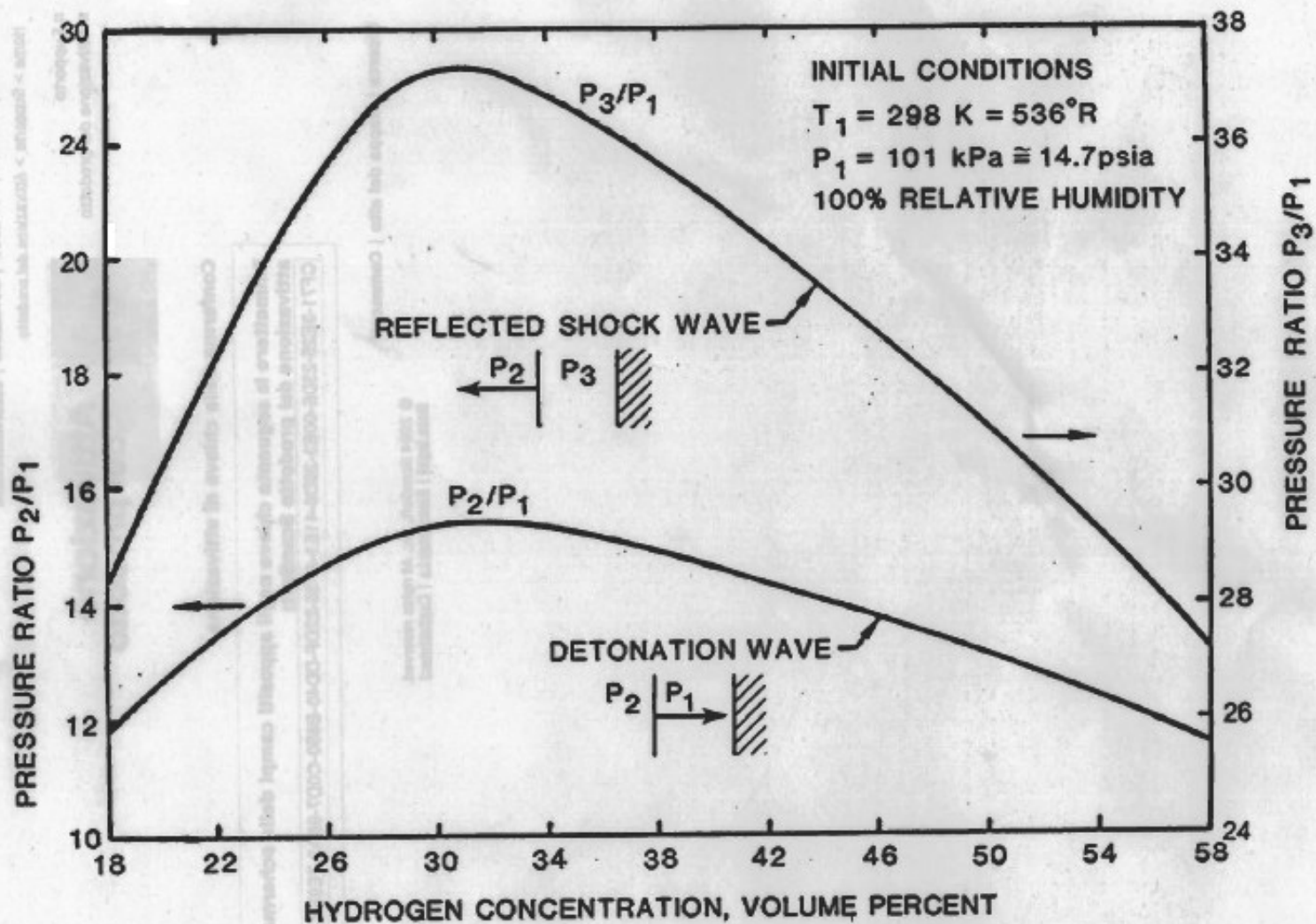
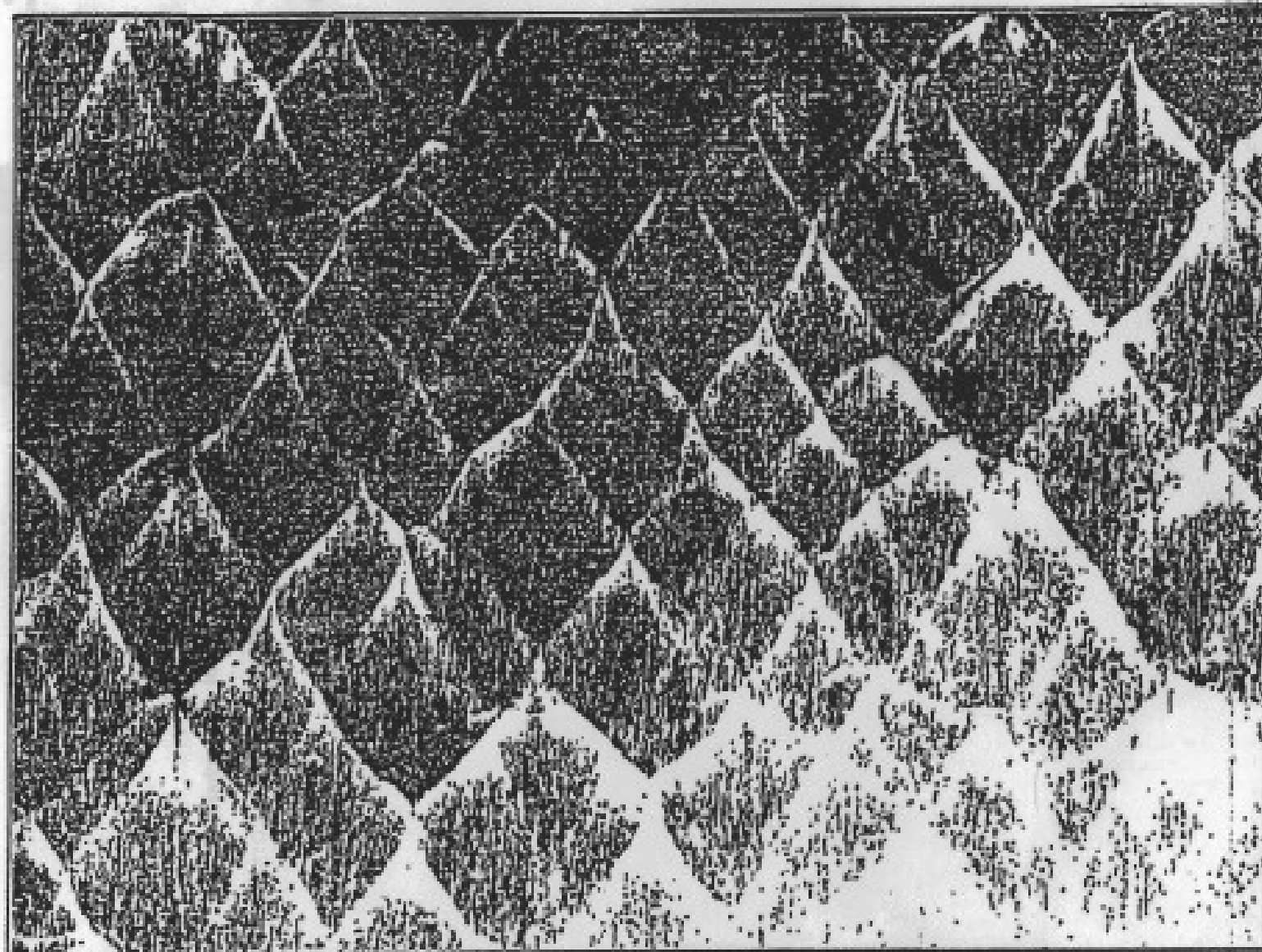
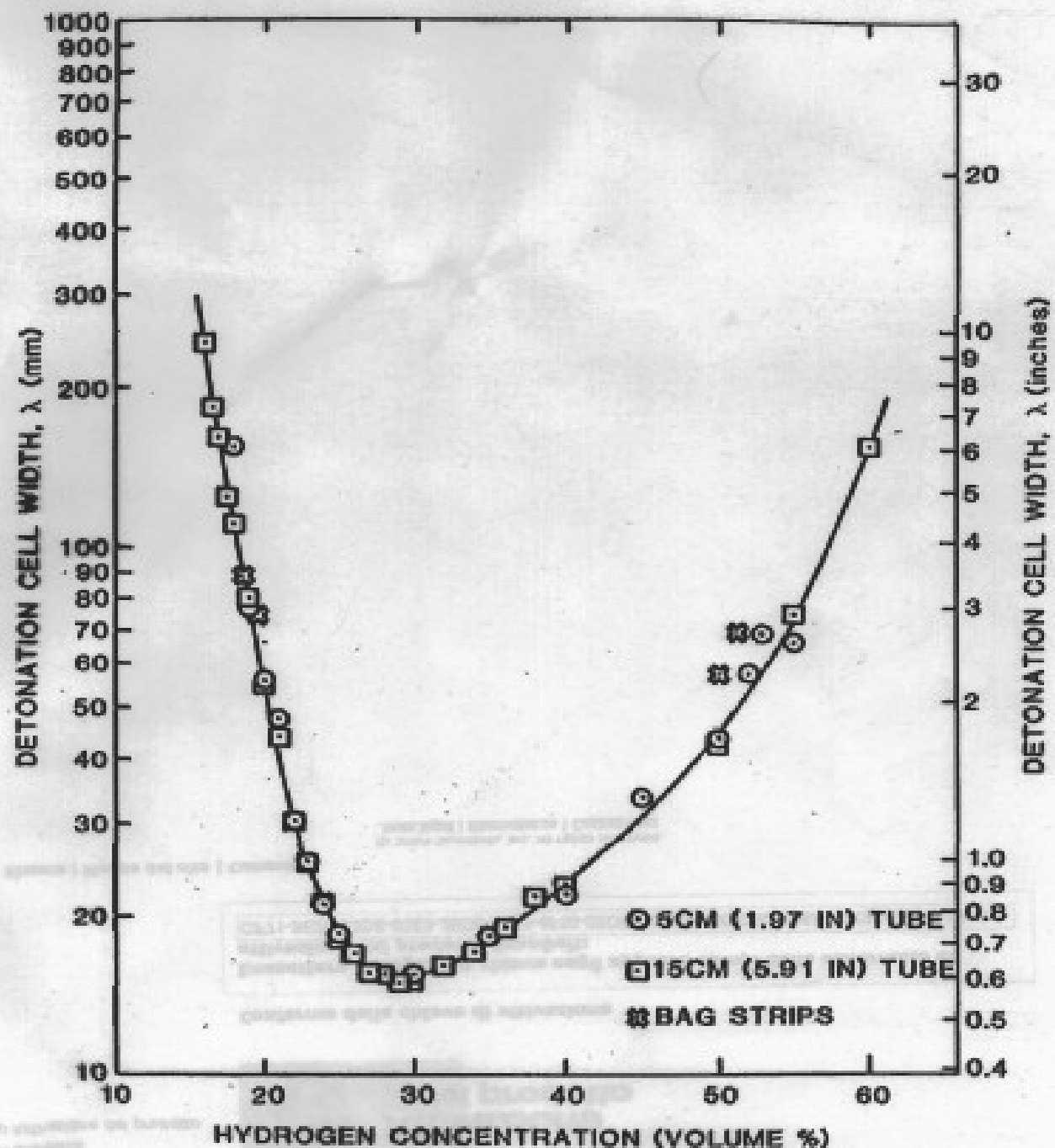
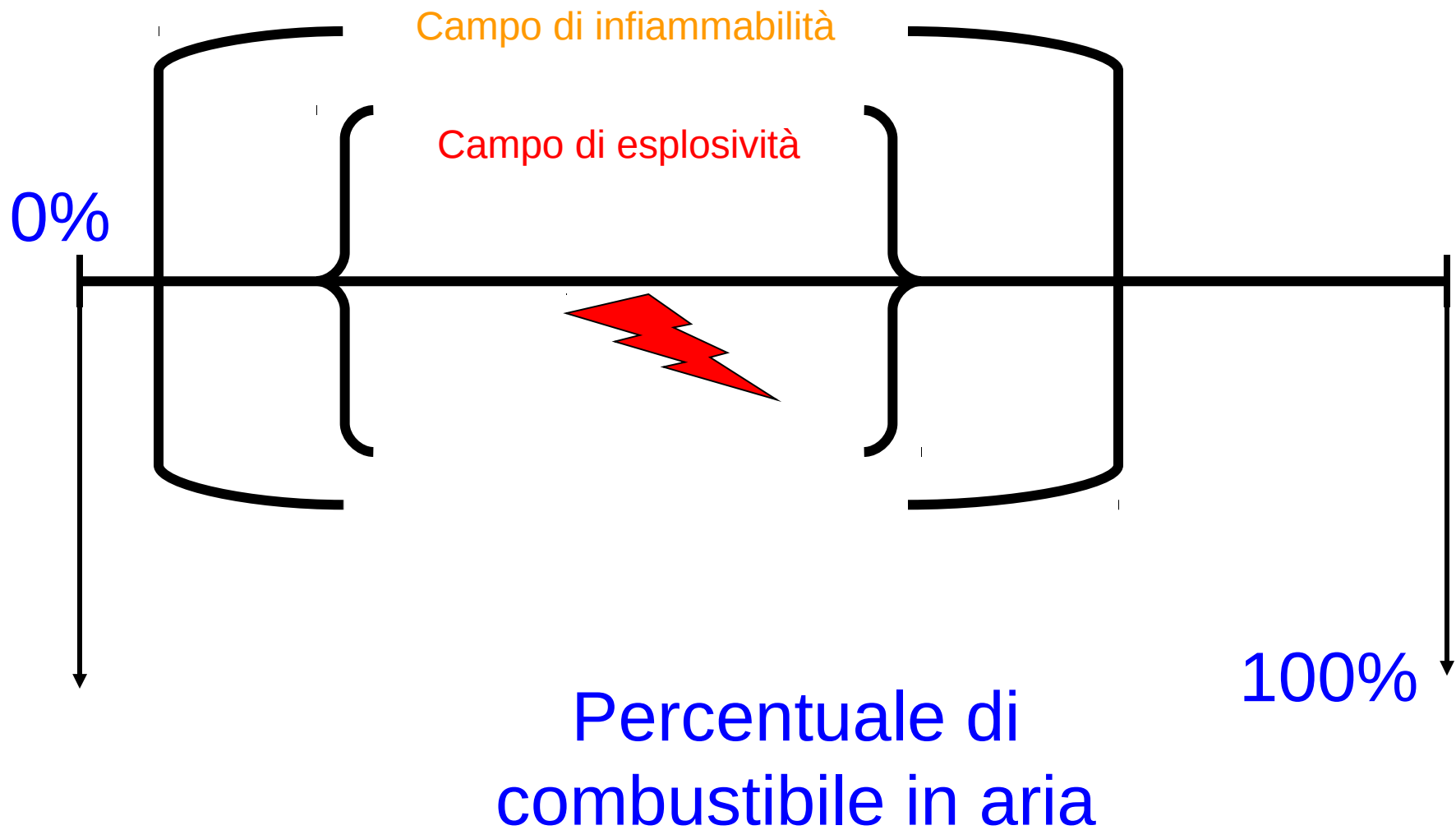
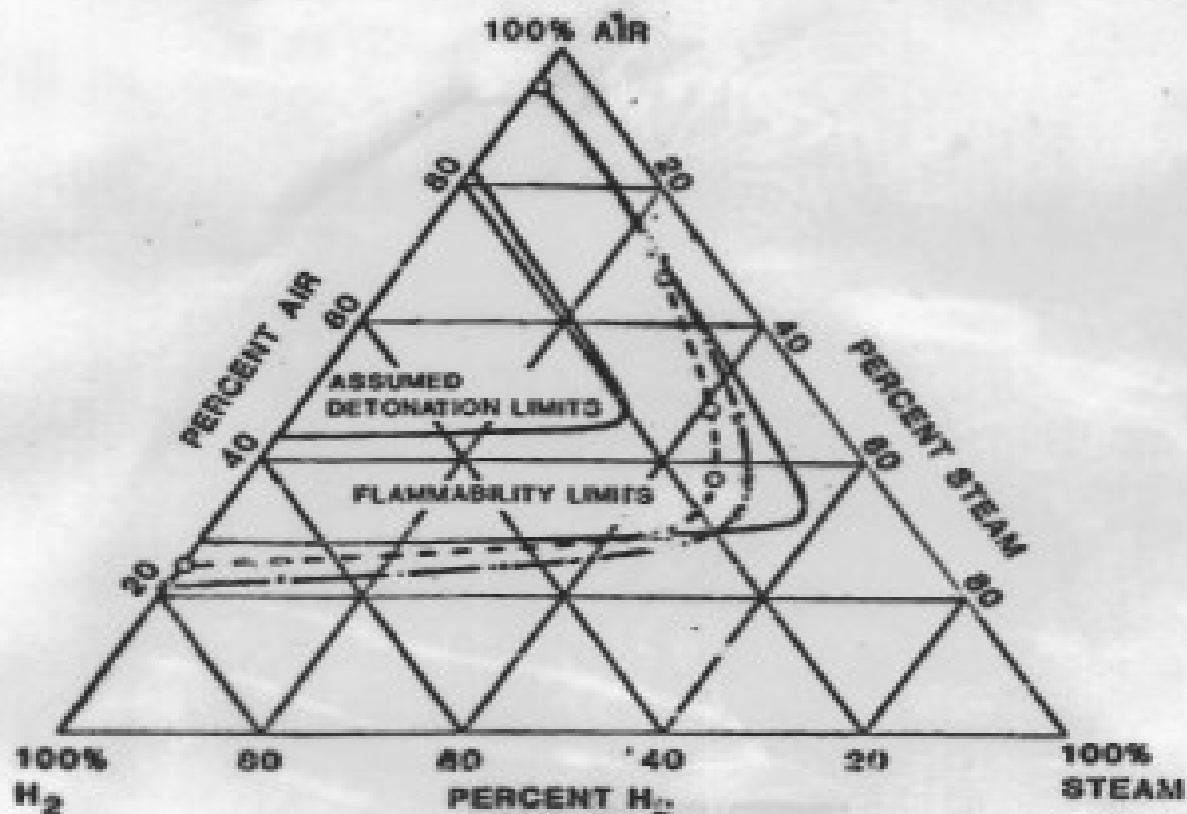


Figure 2-25. Theoretical Detonation Pressure and Normally Reflected Detonation Pressure for Hydrogen:Air Mixtures









FLAMMABILITY LIMITS

———— 68°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

8.1 Limiti di infiammabilità di miscele a più componenti.

Quando il combustibile non è un composto singolo ma una miscela di più solventi e quindi non si trovano dati sperimentali sui limiti di infiammabilità, si può ricorrere a calcoli che si basano su criteri di additività, partendo dai limiti dei singoli composti. Una regola molto usata è quella di **Le Chatelier**, nota come **legge delle miscele**. L'equazione è la seguente:

$$L_i = \frac{100}{\sum_j \frac{\chi_j}{L_{i,j}}} \quad (12)$$

Applicando, per esempio, la regola di Le Chatelier a un gas naturale della seguente composizione:

metano	80%	($L_i = 5,0\%$)
etano	15%	($L_i = 2,9\%$)
propano	4%	($L_i = 2,1\%$)
butano	1%	($L_i = 1,8\%$)

il limite inferiore della miscela risulta:

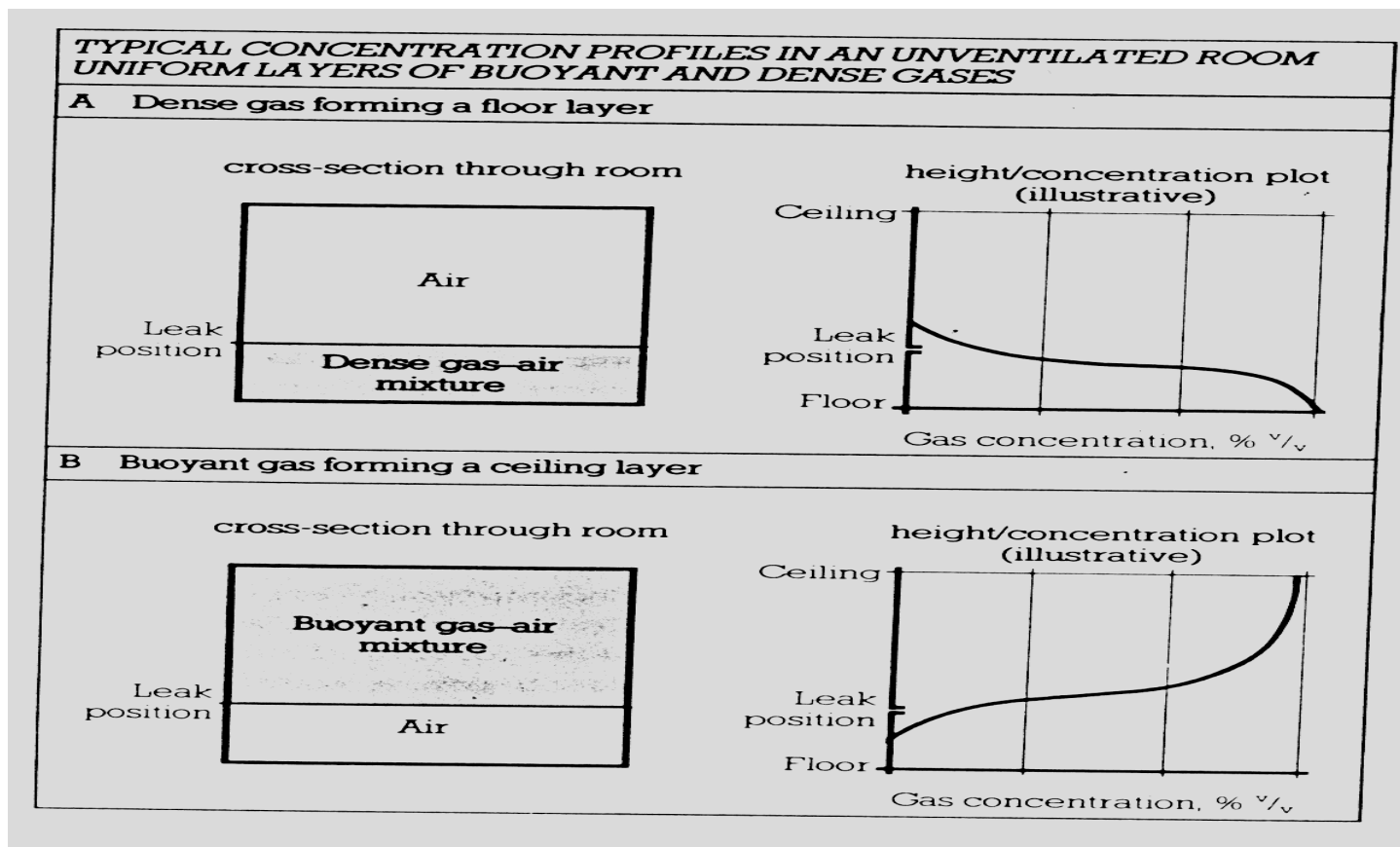
$$L_i = \frac{100}{80/5,0 + 15/2,9 + 4,0/2,1 + 1,0/1,8} = 4,2\%$$

ACCUMULAZIONE DI GAS

FATTORI CHE INFLUENZANO LA CRESCITA DELLA CONCENTRAZIONE DI GAS NEGLI EDIFICI

- ***DENSITA' DEI GAS***
- ***CARATTERISTICHE DELLA SORGENTE DI PERDITA DI GAS***
- ***VENTILAZIONE***

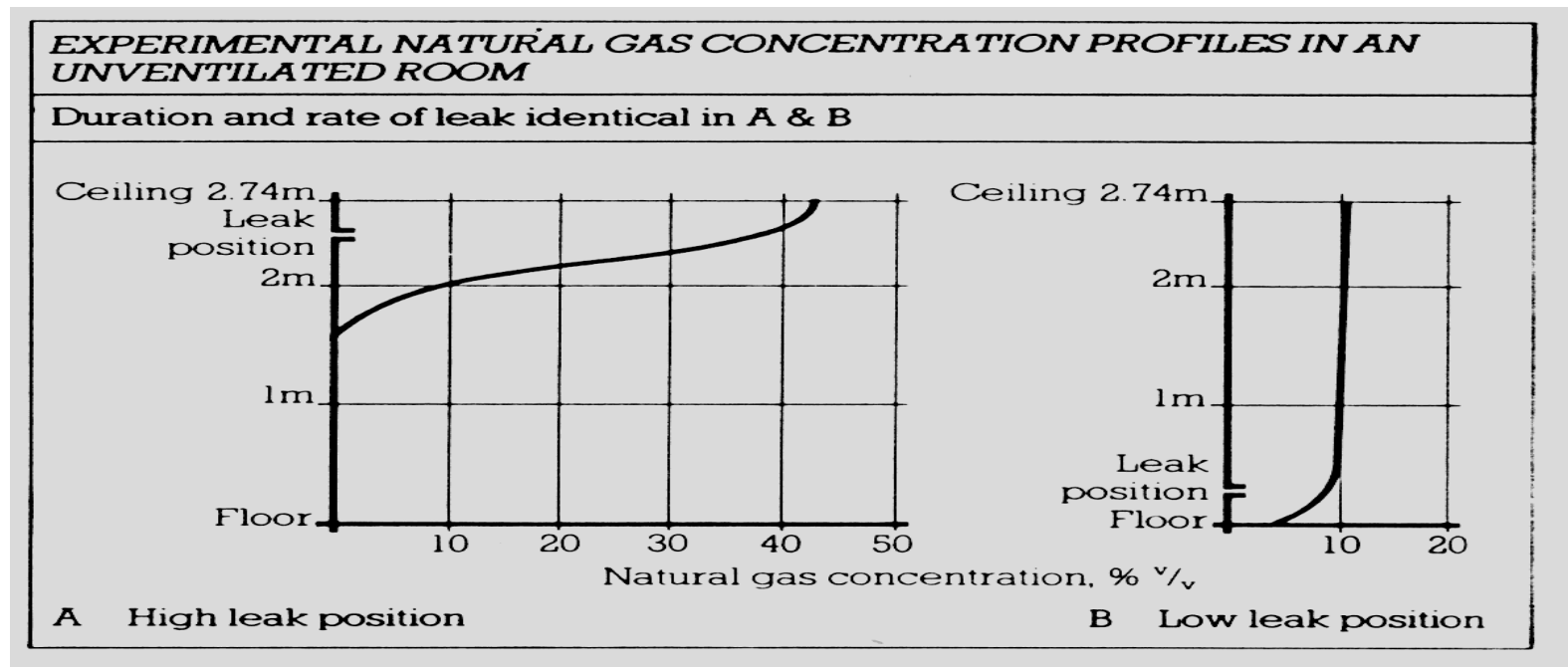
DENSITA'



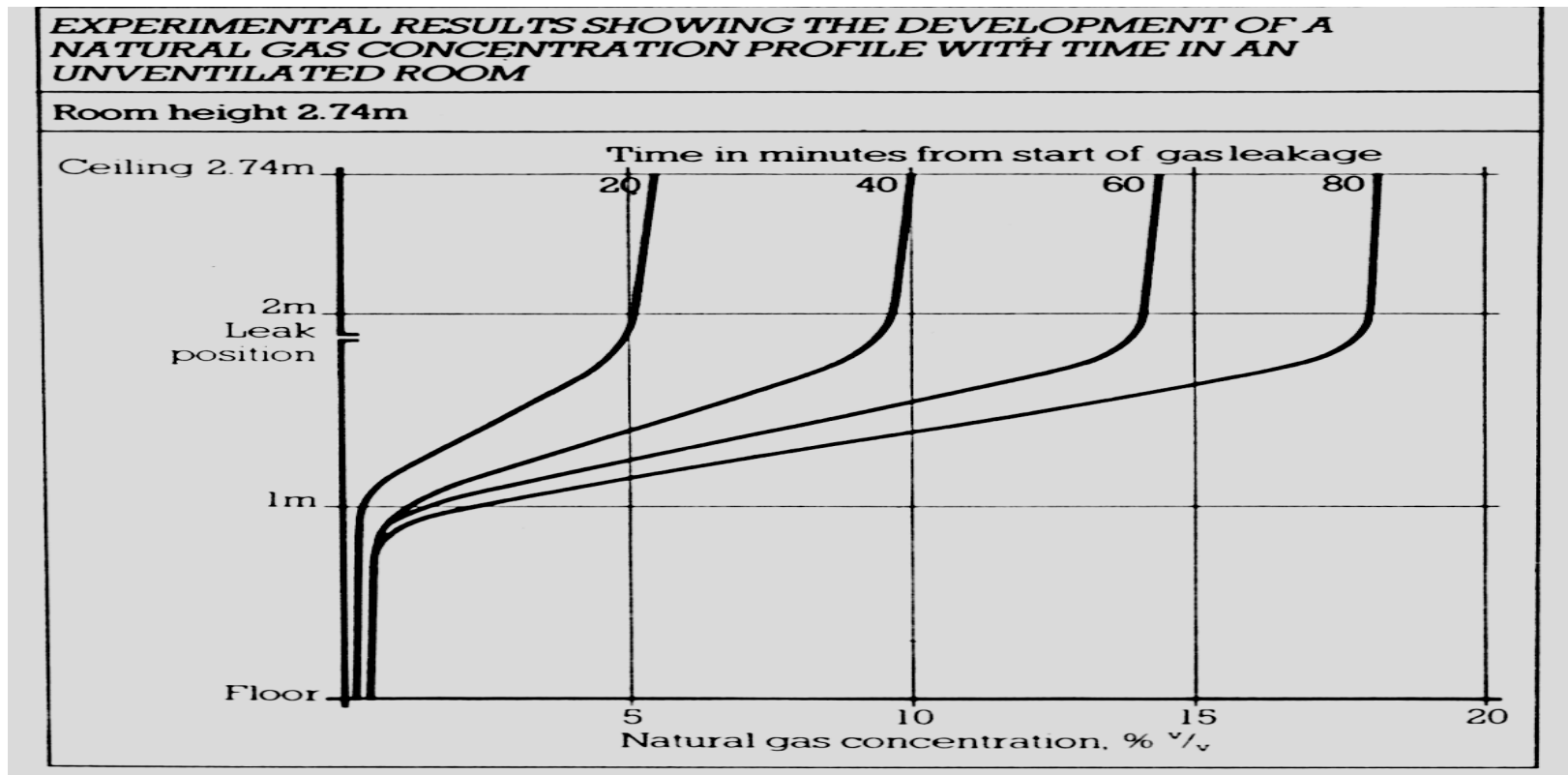
SORGENTE DI PERDITA

□ CARATTERISTICHE DELLA SORGENTE CHE INFLUENZANO L'ACCUMULO DI GAS

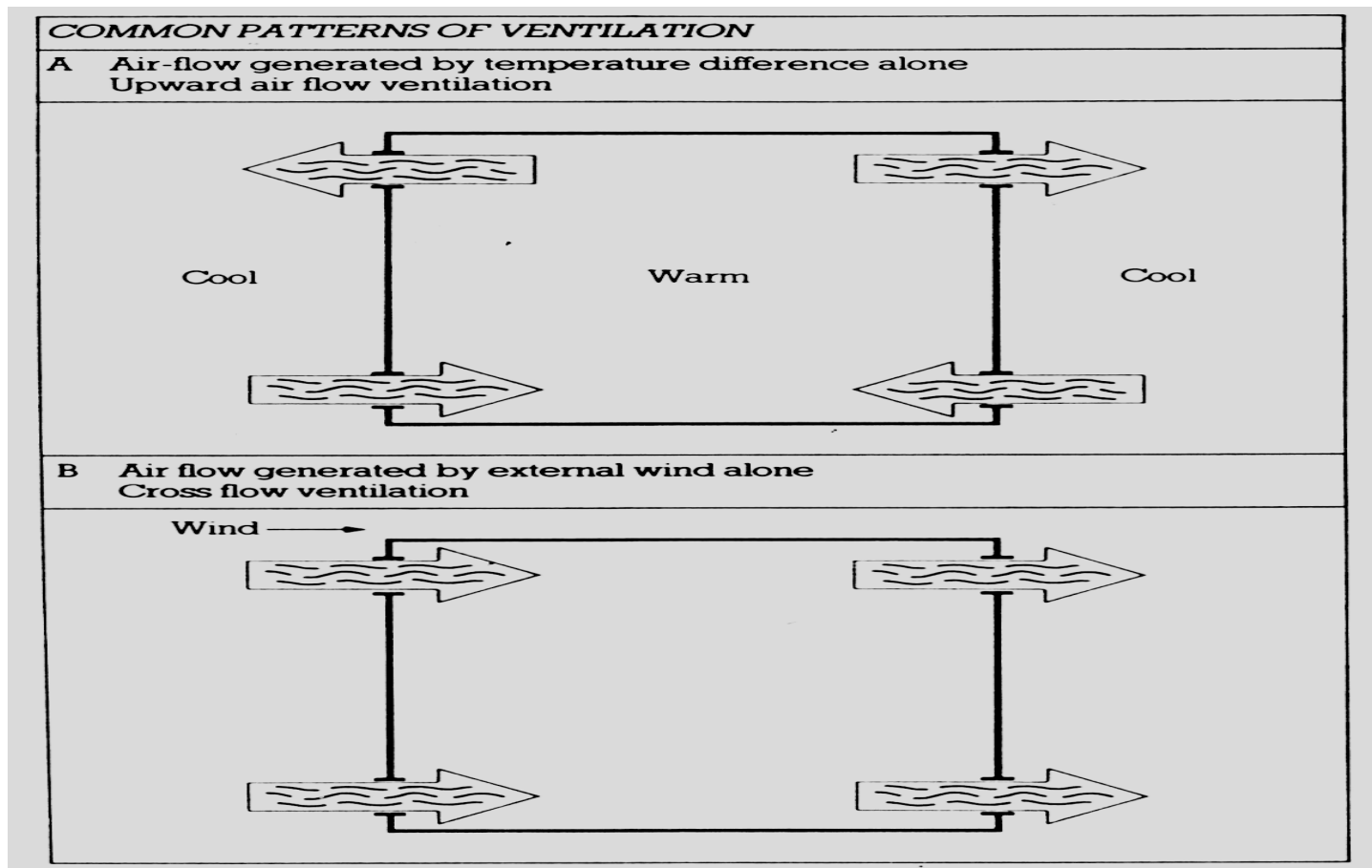
- ***POSIZIONE ED ORIENTAZIONE***
- ***PORTATA DI GAS***
- ***VELOCITA' DEL GAS***



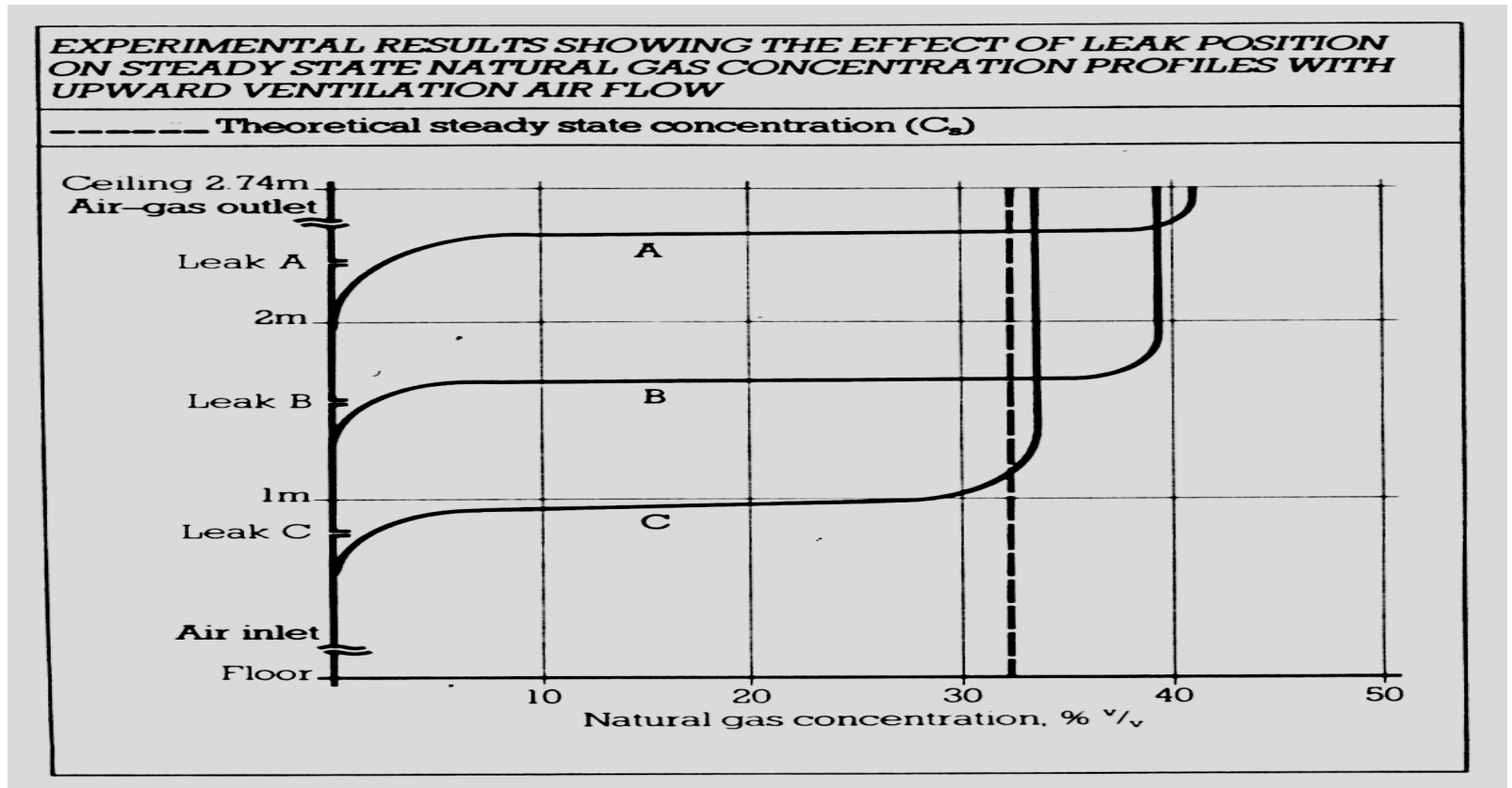
SORGENTE DI PERDITA



VENTILAZIONE



VENTILAZIONE (cont.)



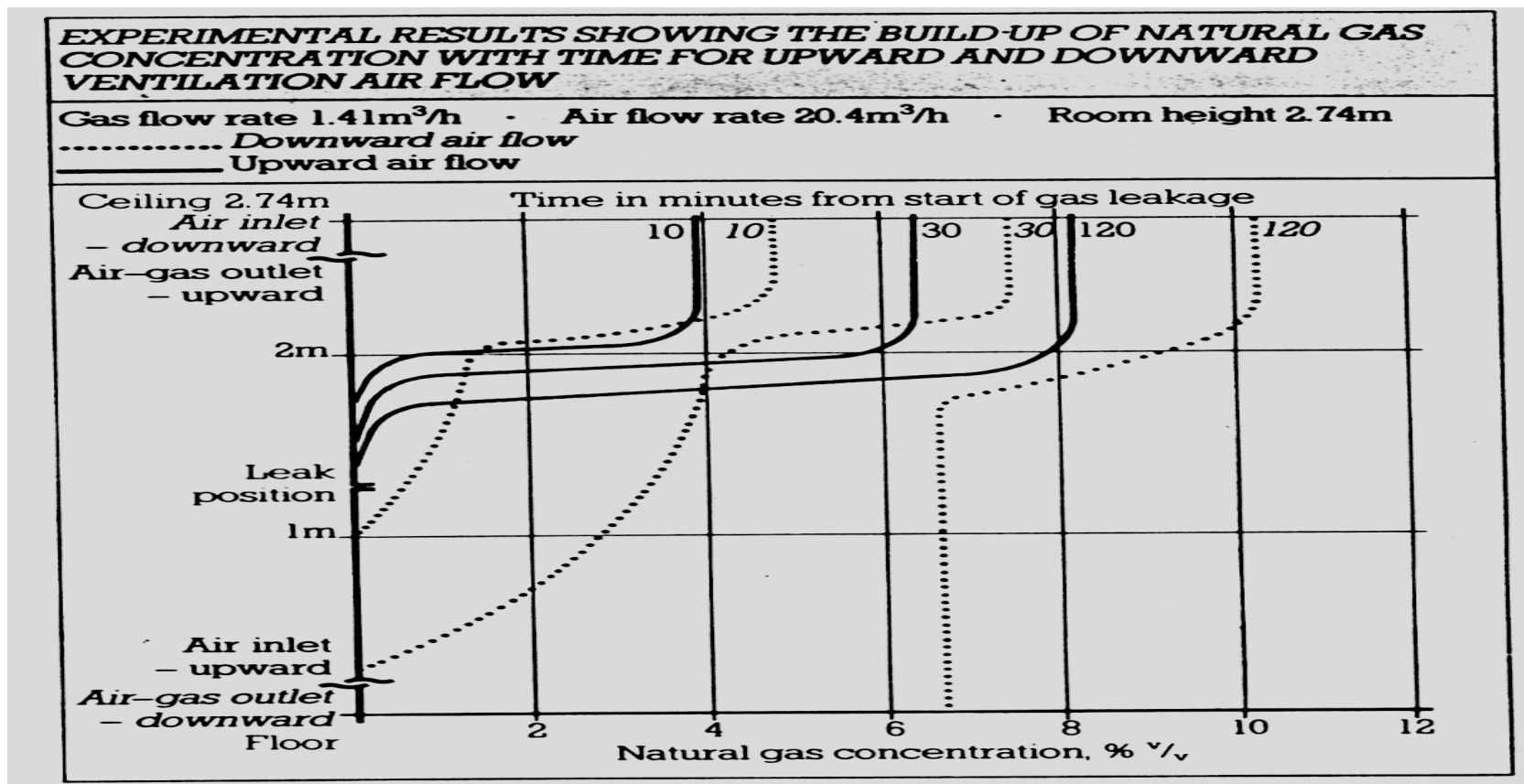
CONCENTRAZIONE STAZIONARIA

$$C_s = 100Q_g / (Q_a + Q_g)$$

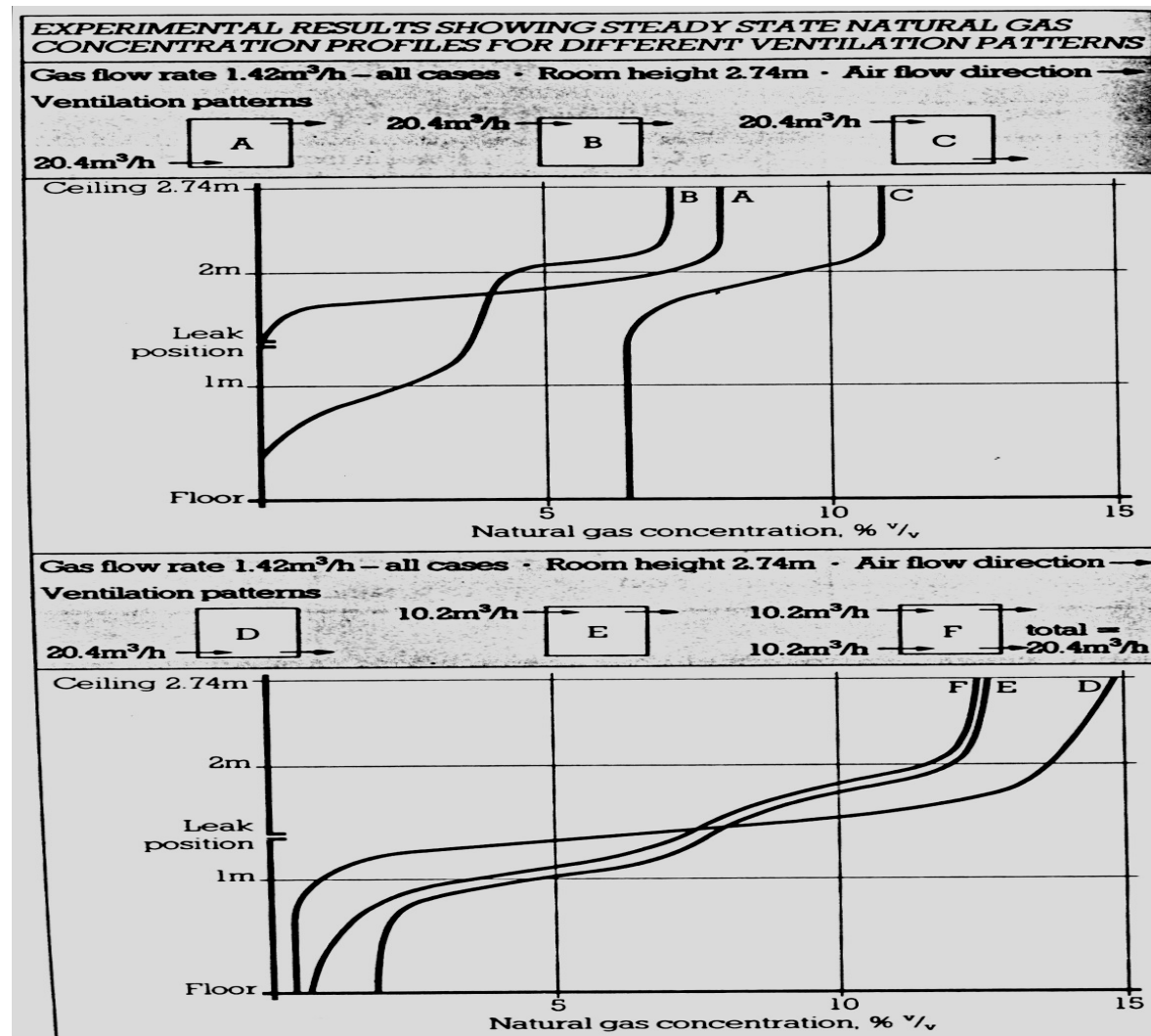
Q_g = PORTATA VOLUMETRICA DI GAS

Q_a = PORTATA VOLUMETRICA DI ARIA

VENTILAZIONE (cont.)



VENTILAZIONE (cont.)



STIMA CONCENTRAZIONE

STIMA DELLA CONCENTRAZIONE DEL GAS CON L'IPOTESI DEL PERFETTO MISCELAMENTO

$$C=[100Qg/(Qg+Qa)]\{1-\exp[-(Qg+Qa)t/V]\}$$

C= CONCENTRAZIONE DEL GAS [%]

Qg=PORTATA GAS ENTRANTE (cost) [Kg/h]

Qa=PORTATA ARIA ENTRANTE (cost) [Kg/h]

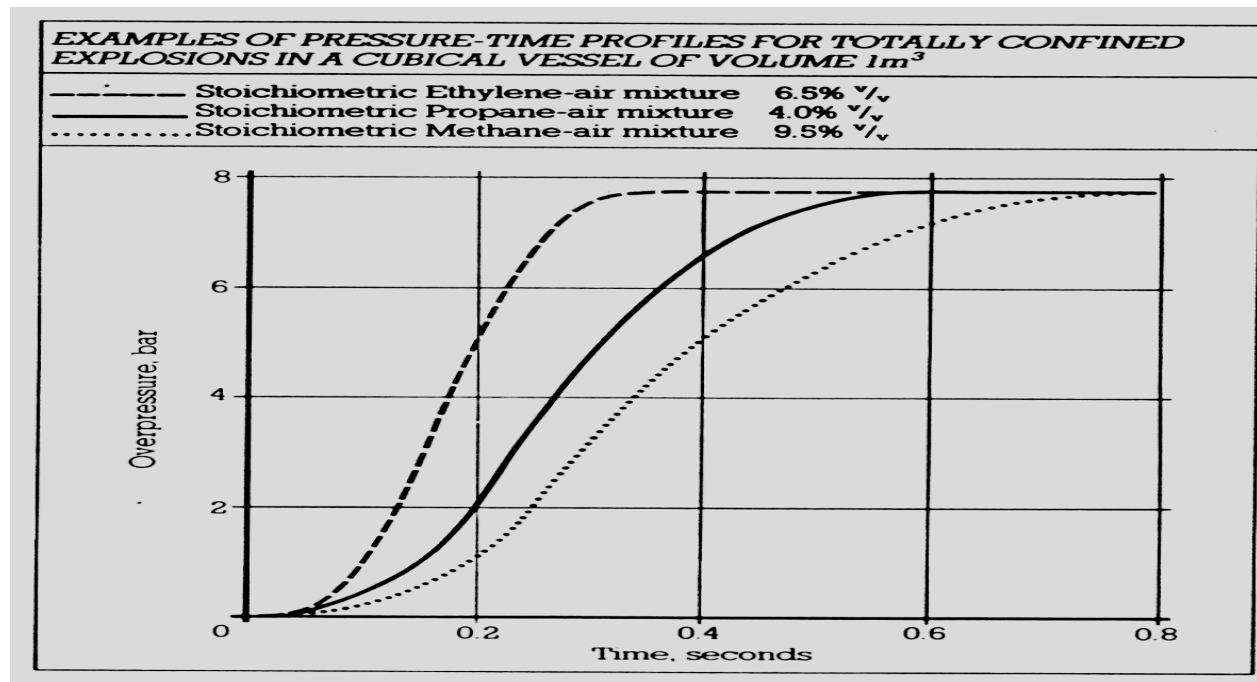
t= TEMPO [s]

V=VOLUME [m³]

ESPLOSIONI CONFINATE

TIPI DI ESPLOSIONI

- **ESPLOSIONE TOTALMENTE CONFINATA**
- **ESPLOSIONE CONFINATA CON APERTURA DI UNO SFIATO DURANTE L'ESPLOSIONE**



ESPLOSIONE TOTALMENTE CONFINATA

EXAMPLES OF PRESSURE-TIME PROFILES FOR TOTALLY CONFINED EXPLOSIONS IN A CUBICAL VESSEL OF VOLUME 1m^3

----- Stoichiometric Ethylene-air mixture 6.5% v/v
————— Stoichiometric Propane-air mixture 4.0% v/v
..... Stoichiometric Methane-air mixture 9.5% v/v

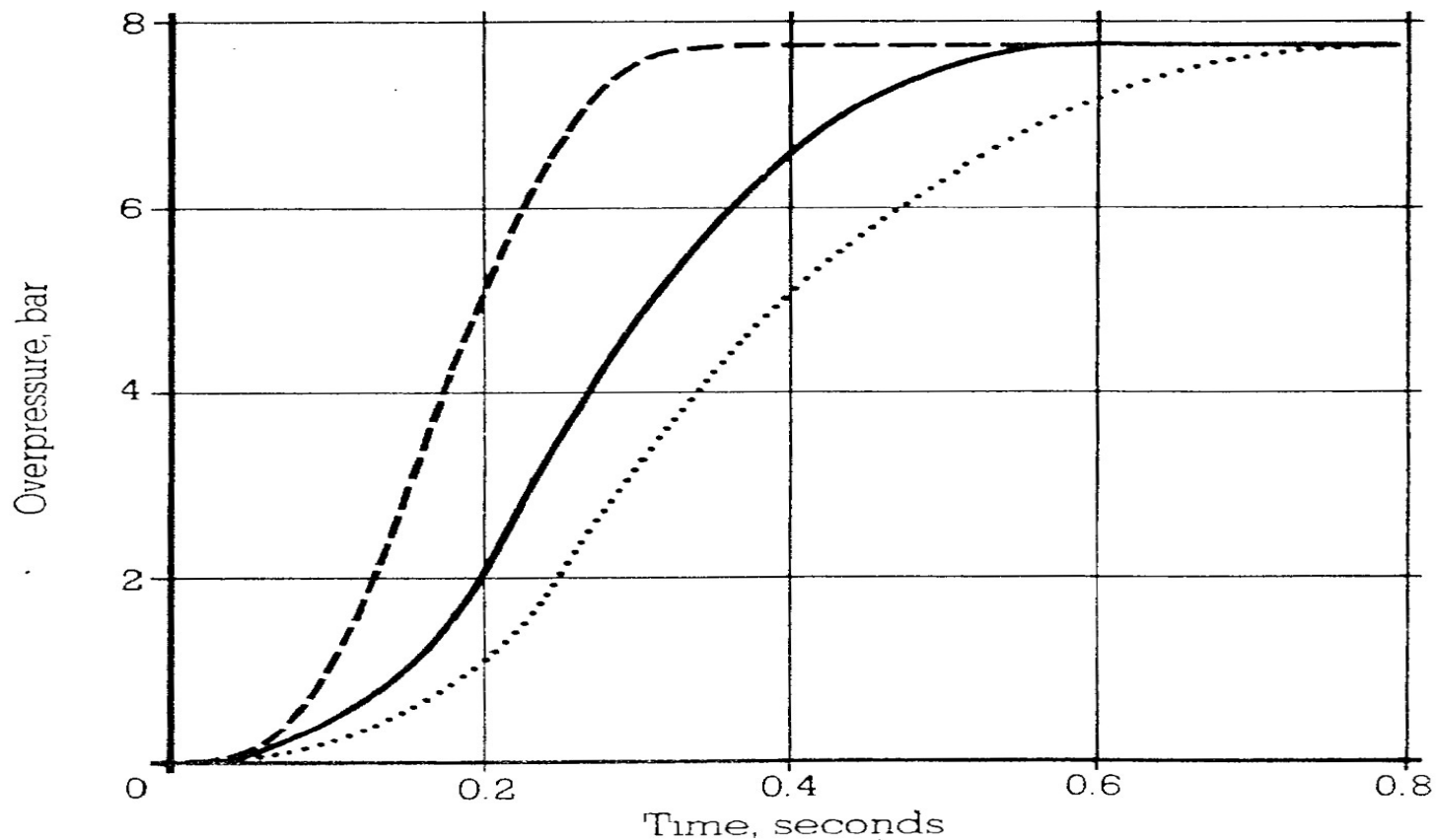


table 1.2

TYPICAL COMBUSTION PROPERTIES OF SOME HYDROCARBON GASES AND HYDROGEN IN AIR

Fuel	Molecular weight	A Flammability limits % w/v gas		% Gas at stoichiometric ratio	B % Gas at maximum burning velocity	B Maximum laminar burning velocity S_u (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	6.6	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	1.58
Ethylene C_2H_4	28	3.1	32	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

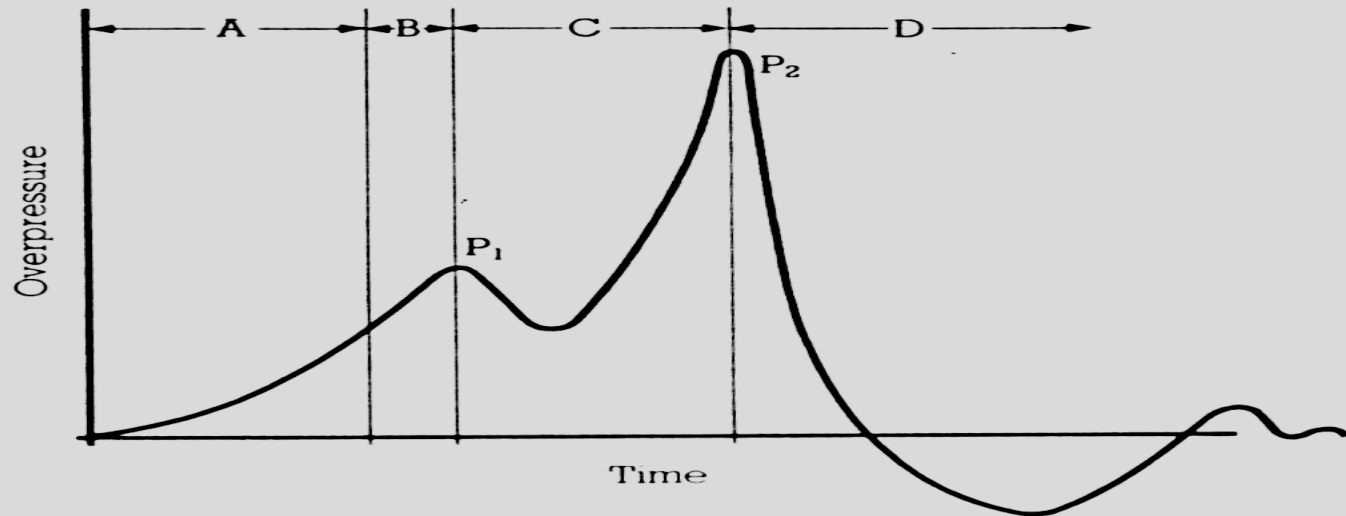
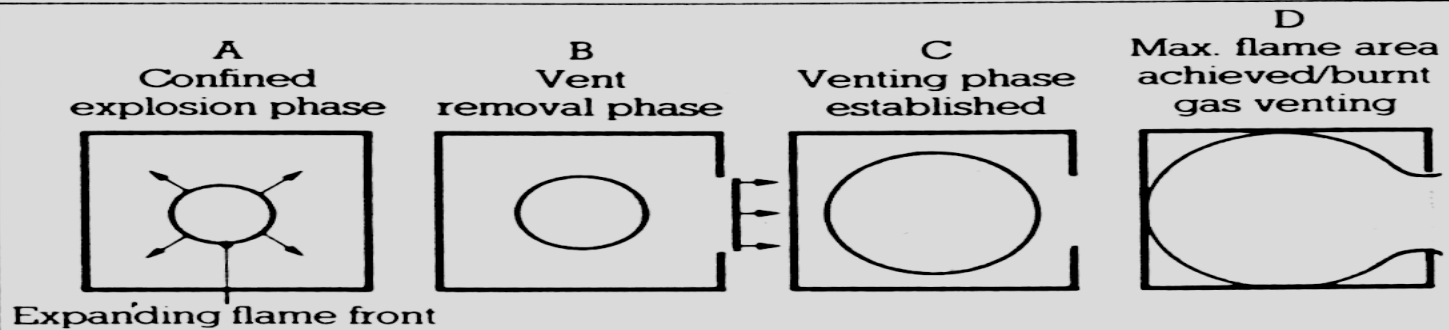
A From Coward and Jones⁸B Value for H_2 from Rose and Cooper³. Value for C_2H_2 as recommended by Andrews and Bradley⁴. Other values based on comparative data from Gerstein *et al.*¹ which have been corrected in line with a currently accepted value of 0.45 m/s for methane-air - See Andrews and Bradley⁴C Values marked by * from Lewis and Von Elbe¹, other values from Perry and Chilton²

C Adiabatic flame temperature T_f K	Expansion ratio T_f/T_i ($T_i = 288K$)	D Maximum laminar flame speed (m/s)	E Auto-ignition temperature K	F Minimum ignition energy, millijoules	G Net calorific value (288K, 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
2195*	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	56	Ethylene C_2H_4
2208*	7.7	5.1	733	0.28	81.5	Propylene C_3H_6
2203*	7.6	4.3	658	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 $S_u = S_u(T_i/T_f)$ - See Section 1.3.3E Value for Hydrogen from Perry and Chilton² - all others from Zabetakis³F Values from Lewis and Von Elbe¹. Values represent minimum energy stored in test circuit prior to spark dischargeG Values from Rose and Cooper³

ESPLOSIONI VENTATE

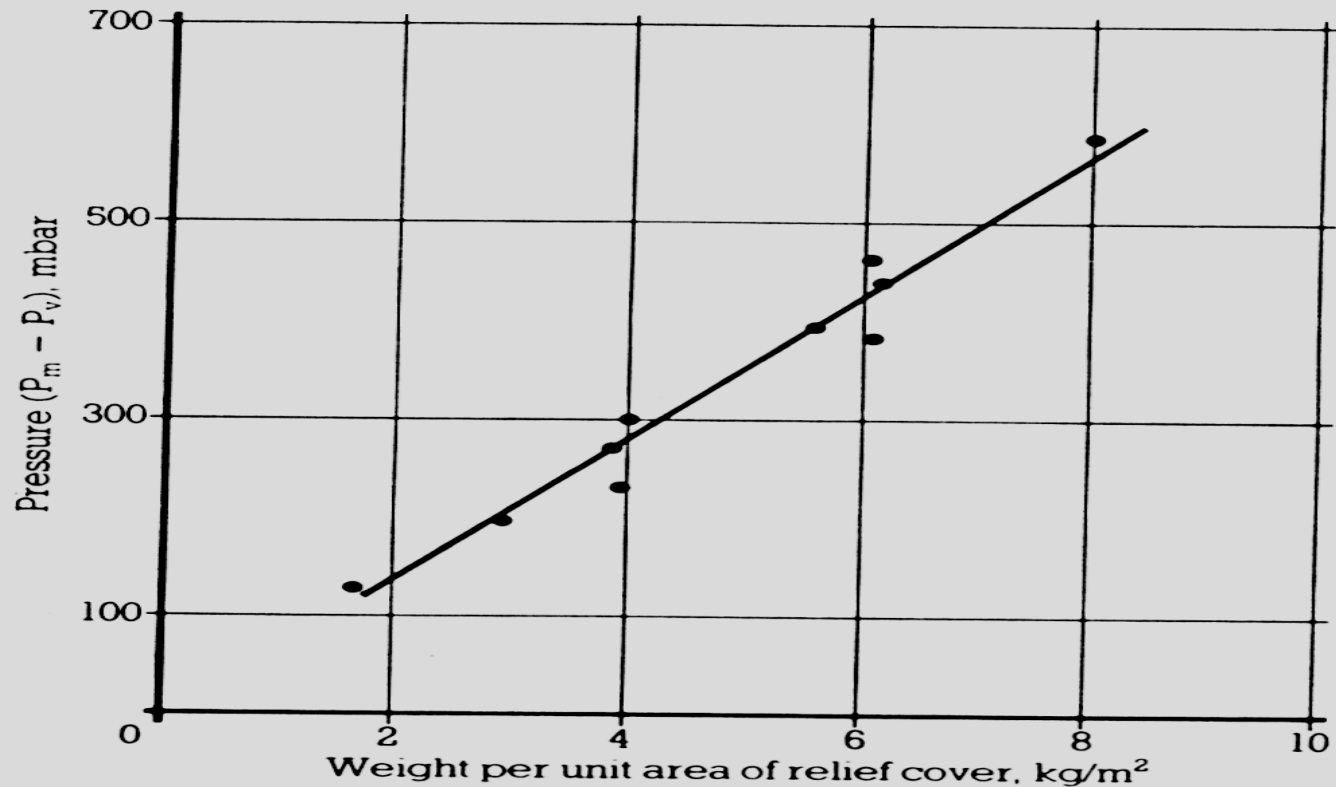
IDEALISED PRESSURE-TIME VARIATION IN A VENTED EXPLOSION
SHOWING FLAME DEVELOPMENT AT EACH STAGE



ESPLOSIONI VENTATE

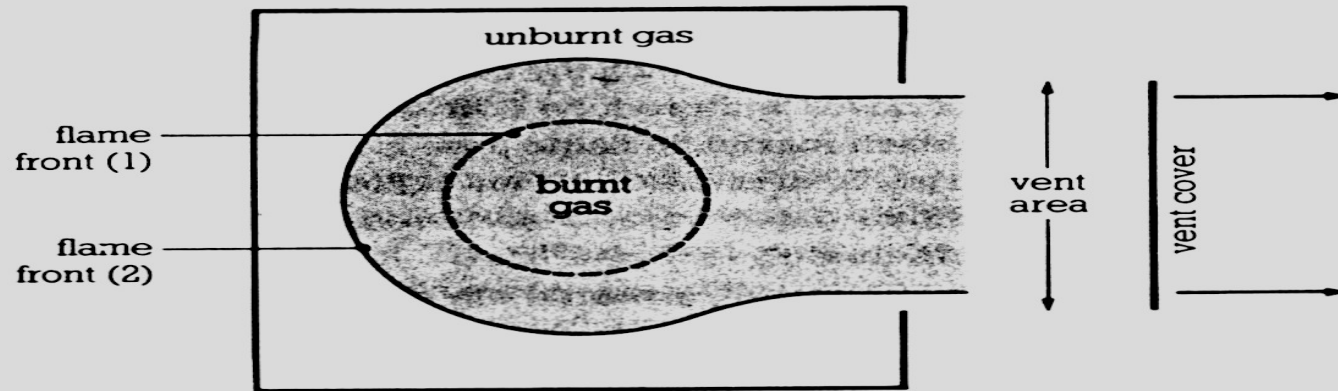
AN EXAMPLE OF THE EFFECT OF WEIGHT OF RELIEF ON THE MAXIMUM PRESSURE GENERATED IN A VENTED EXPLOSION

Experimental results obtained from explosion of natural gas-air mixtures in a cubical vessel, volume 3.54m^3 , vent area 0.26m^2



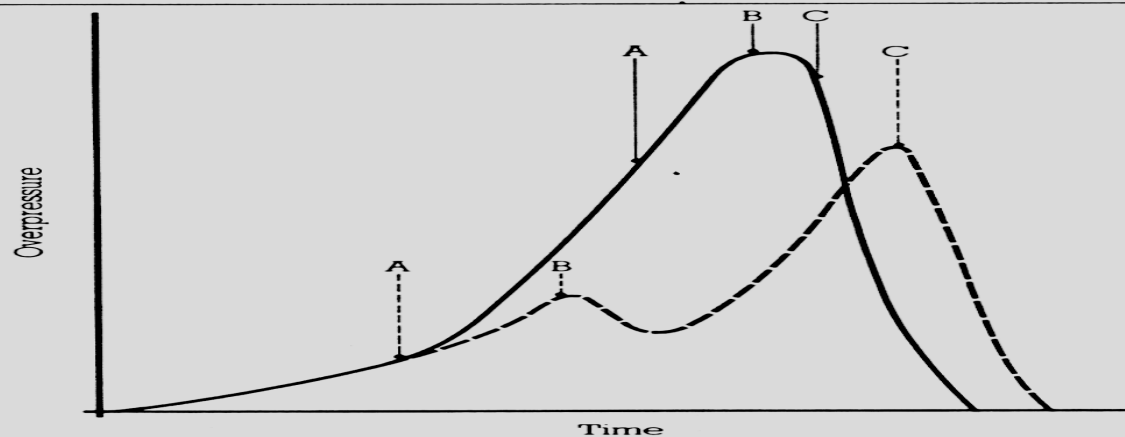
ESPLOSIONI VENTATE

CHANGE IN FLAME SHAPE FROM (1) SPHERICAL TO (2) PEAR SHAPE AFTER VENT REMOVAL



SCHEMATIC PRESSURE-TIME PROFILES FOR VENTED EXPLOSIONS

A: Vent failure
B: Outflow of gases established
C: Onset of burnt gas venting
———— High failure pressure vent cover
----- Low failure pressure vent cover



ESPLOSIONI VENTATE

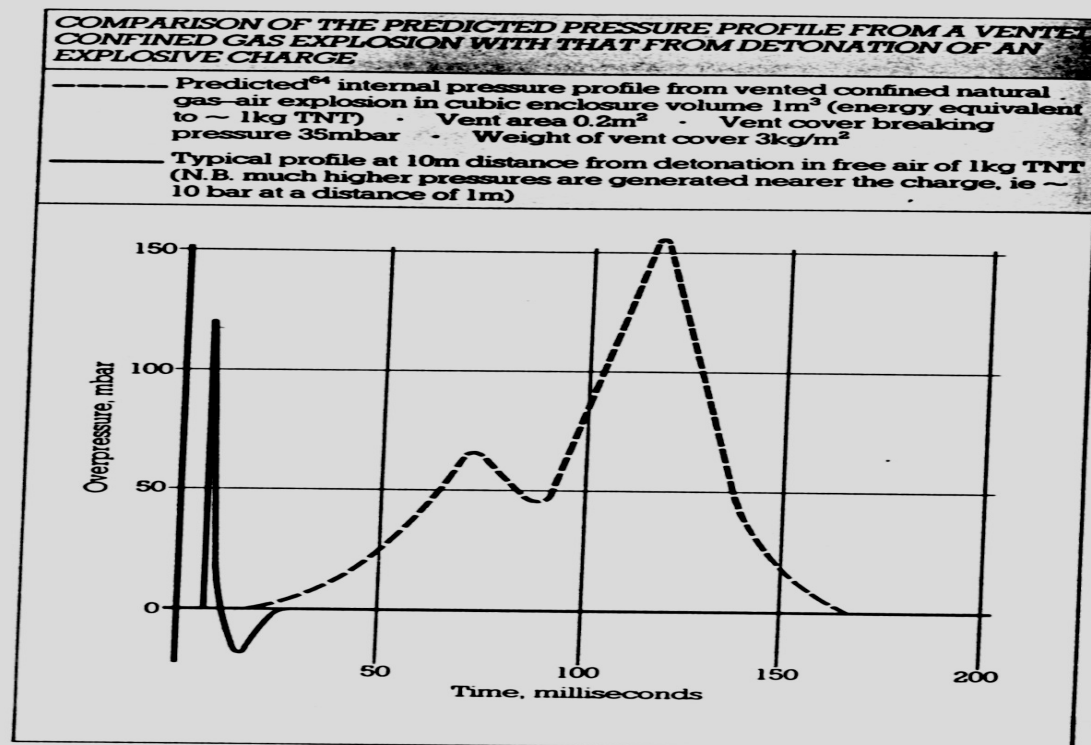
SCOSTAMENTI DAL COMPORTAMENTO IDEALE SFERICO

- ***DISTRIBUZIONE DEL GAS NON UNIFORME NELL'AMBIENTE***
- ***GEOMETRIA DEL VOLUME***
- ***PUNTO DI IGNIZIONE***
- ***IGNIZIONI MULTIPLE***
- ***PRESENZA DI MECCANISMI CHE ACCELERANO LA FIAMMA***
 - ***TURBOLENZA***
 - ***INSTABILITA' DELLA FIAMMA***

FORMULE EMPIRICHE

A SUMMARY OF COMMONLY USED EMPIRICAL FORMULAE AND THEIR RANGES OF APPLICATION all pressures in mbar		
Formula $P_1 = S_o (4.3 KW + 28)/V^{1/3}$ $P_2 = 58 S_o K$	Author Cubbage and Simmonds, ^{49,50}	Range of application $L_{max} : L_{min} \leq 3 : 1$ $K \leq 5$ $W \leq 24 \text{ kg/m}^2$
Comments Vent cladding can be of any material provided that no restraining force (other than the minimum of friction) is used to maintain the vent in position.		
Formula $P_m = P_v + 23 (S_o^2 KW/V^{1/3}) (\dots [f(\lambda, \lambda_o)])$	Author Cubbage and Marshall, ³⁴	Range of application $L_{max} : L_{min} \leq 3 : 1$ $K \leq 4$ $2.4 \text{ kg/m}^2 \leq W \leq 24 \text{ kg/m}^2$ $P_v \leq 490 \text{ mbar}$
Comments Predicts maximum pressure generated, irrespective of whether this is P_1 or P_2 . For $\lambda \leq 750 \text{ kJ/m}^3$, and $P_v < 350 \text{ mbar}$, use $f(\lambda, \lambda_o) = 1 - \exp [-(\lambda - \lambda_o)/(\lambda + \lambda_o)]$. For $\lambda \leq 750 \text{ kJ/m}^3$, and $P_v > 350 \text{ mbar}$, use $f(\lambda, \lambda_o) = (\lambda - \lambda_o)/\lambda$. For hazard assessment use $f(\lambda, \lambda_o) = 1$ to calculate maximum possible pressure rise. Vent cladding can be any material (preferably friable), provided it is held in place by a positive force.		
Formula $P_m = 1.5 P_v + 77.7 S_o K$	Author Rasbash, ⁵¹	Range of application $L_{max} : L_{min} \leq 3 : 1$ $K \leq 5$ $W \leq 24 \text{ kg/m}^2$ $P_v \leq 70 \text{ mbar}$
Comments Formula essentially predicts the second peak pressure, P_2 . Vent cladding can be any material held in place by a positive force.		
Formula $P_m = 1.5 P_v + \dots S_o \{ [(4.3 KW + 28)/V^{1/3}] + 77.7 K \}$	Author Rasbash <i>et al.</i> , ⁵²	Range of application $L_{max} : L_{min} \leq 3 : 1$ $K \leq 5$ $W \leq 24 \text{ kg/m}^2$ $P_v \leq 70 \text{ mbar}$
Comments Predicts maximum pressure generated, irrespective of whether this is P_1 or P_2		

IMPULSO



On first thought it might be assumed that

TIPI DI CARICHI

t_d = DURATA DELL'IMPULSO

T_N = PERIODO NATURALE DI OSCILLAZIONE

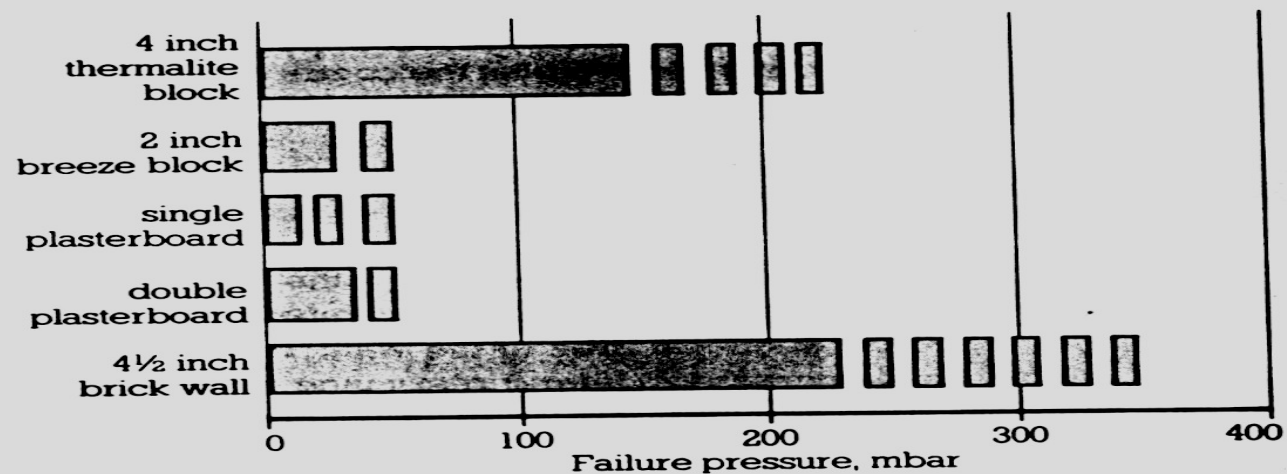
- $t_d > T_N$ CARICHI STATICI
- $t_d = T_N$ CARICHI STATICI
- $t_d < T_N$ CARICHI DINAMICI

TYPICAL PERIODS OF VIBRATION OF STRUCTURAL ELEMENTS AND DURATION OF PRESSURE PULSES	
	Period/Duration (milliseconds)
Concrete floors	10–30
Concrete walls	10–15
Brick walls	20–40
Confined gas explosion	100–300
Pressure wave from detonation of an explosive charge	1–10

RESISTENZA

COMPARISON OF FAILURE PRESSURES OF DIFFERENT WALL CONSTRUCTIONS

All walls have area 5.1 m^2
 Unbroken line represents no damage
 Broken line represents possible cracking
 End of broken line represents failure



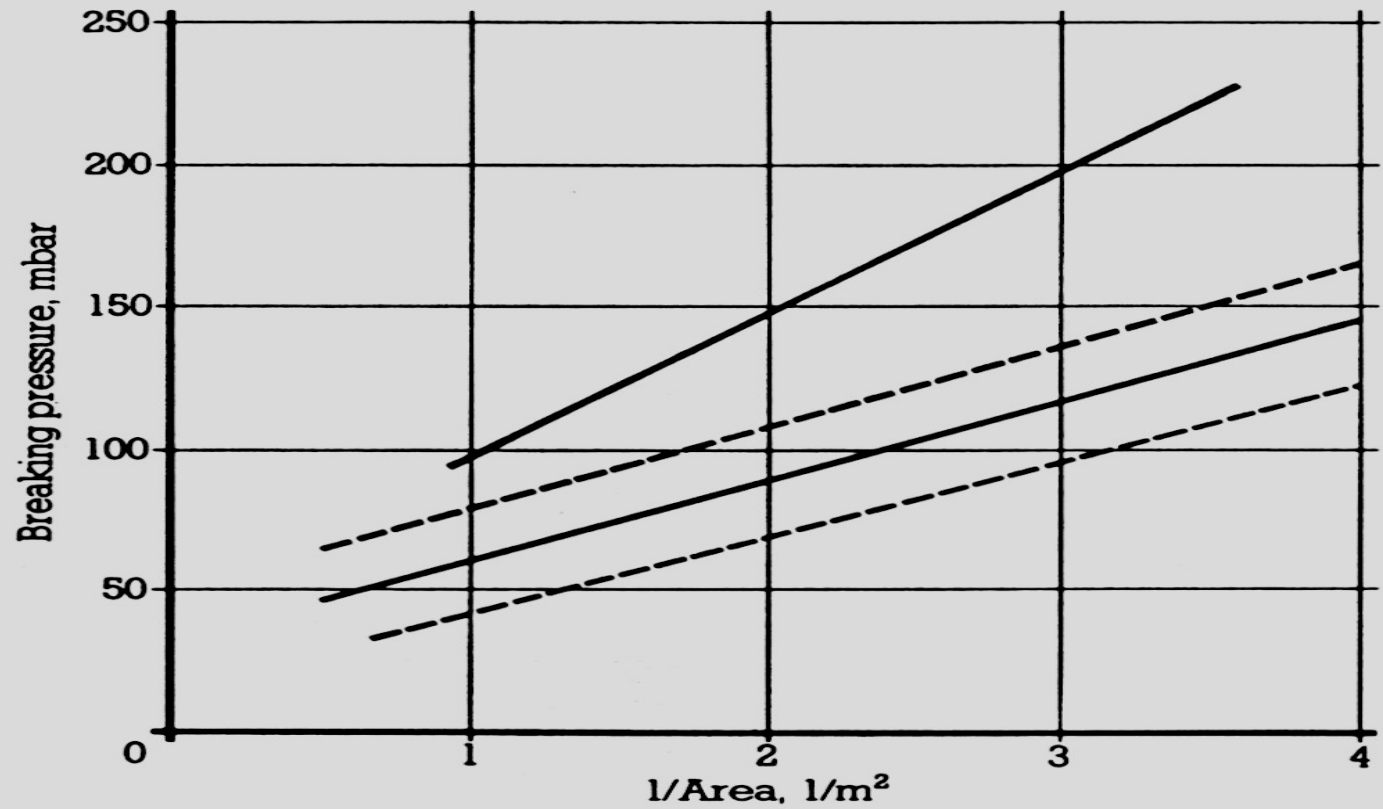
TYPICAL FAILURE PRESSURES OF SOME STRUCTURAL BUILDING ELEMENTS UNDER GAS EXPLOSION CONDITIONS

Structural element	Typical failure pressure (mbar)
Glass windows	20–70
Room doors	20–30
Light partition walls (eg. plasterboard on wooden studding)	20–50
50mm thick breeze block walls	40–50
Unrestrained brick walls	70–150

VETRI

BREAKING PRESSURE OF GLASS WINDOWS AS A FUNCTION OF AREA
Reproduced from reference 1

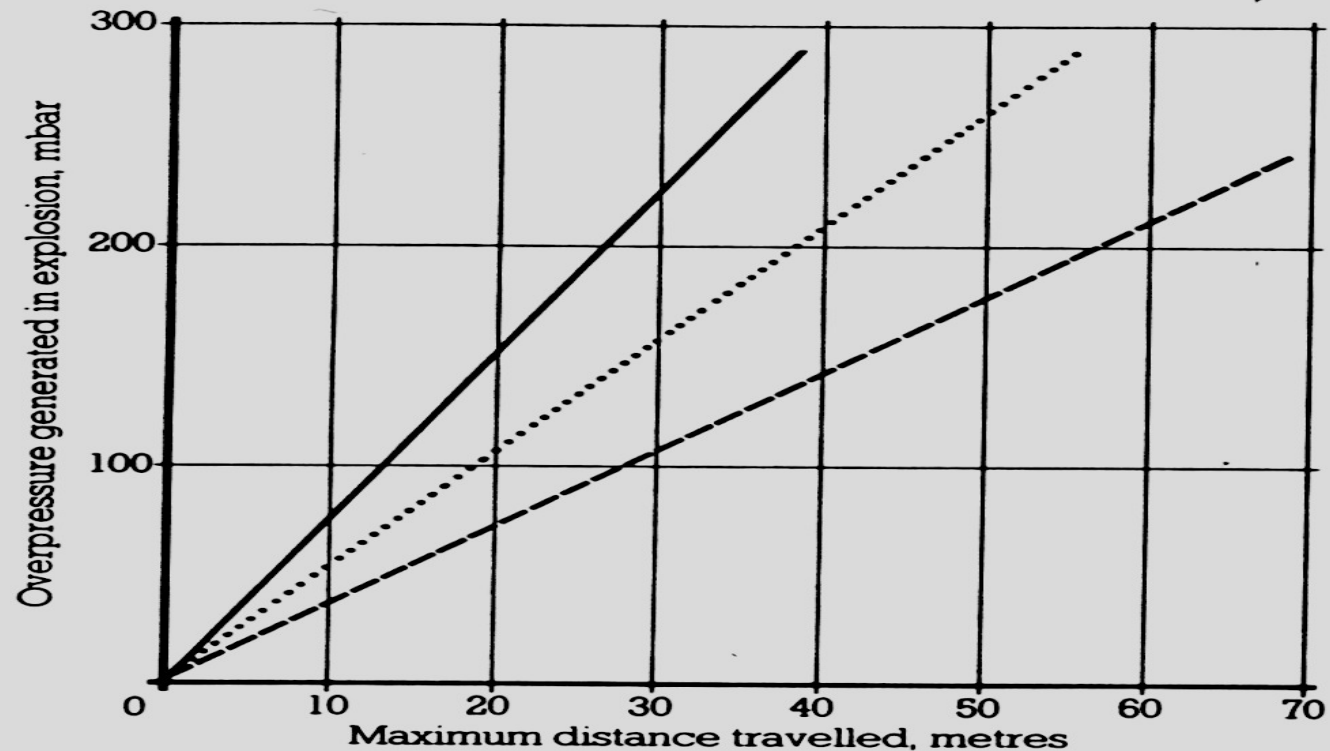
—— 6.5mm Georgian wired
—— 5mm Glass
—— 4mm Glass
—— 3mm Glass



VETRI

**DISTANCE OF TRAVEL OF GLASS WINDOWS/WINDOW FRAGMENTS AS
A FUNCTION OF EXPLOSION PRESSURE GENERATED**
Reproduced from reference 72

———— Glass panes treated with shatter resistant film
..... Untreated Georgian wired glass panes
- - - - - Untreated plain/patterned glass panes



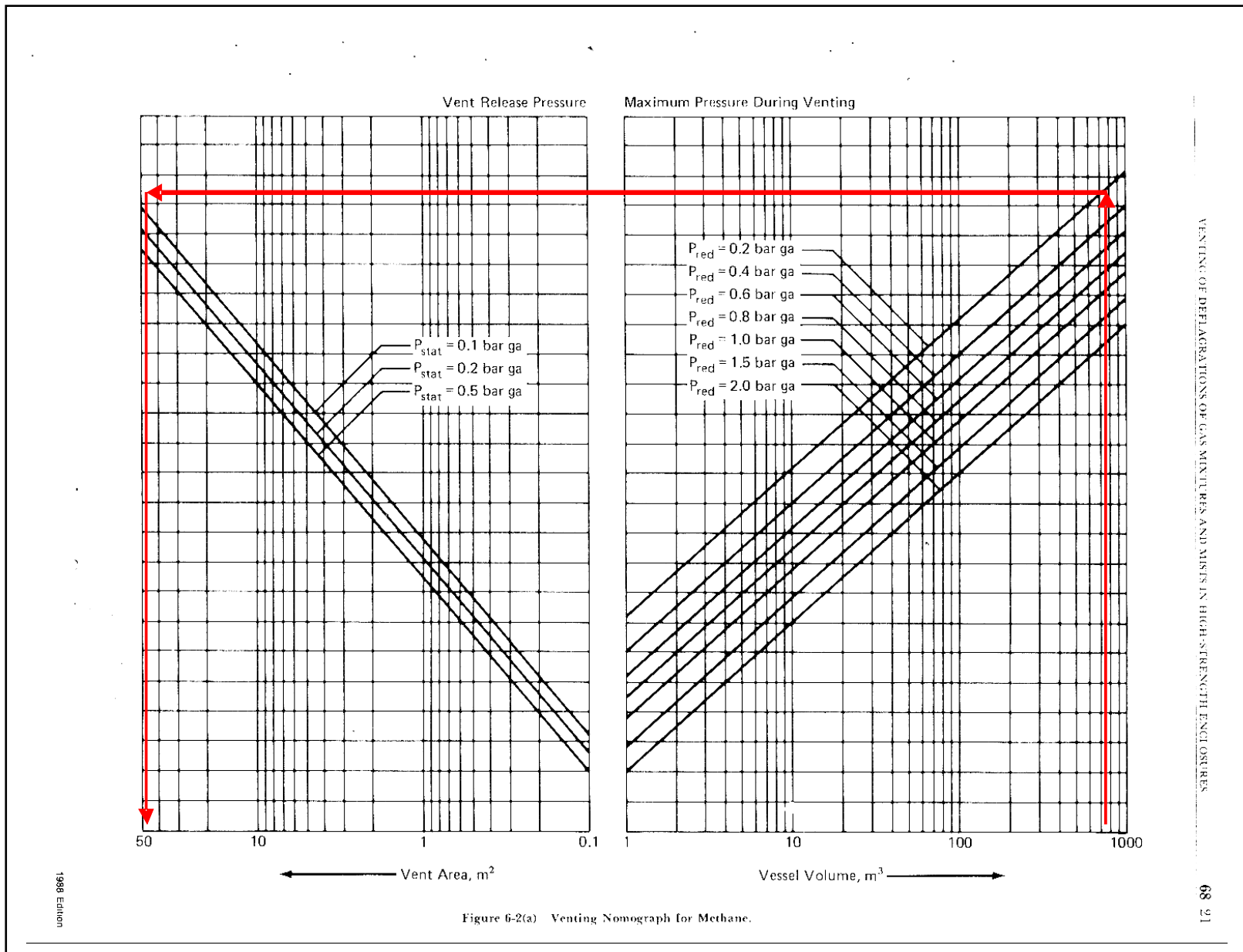


Figura 5 – Normogramma NFPA per Metano

