



Università degli studi di Napoli FEDERICO II  
Facoltà di Ingegneria

# MODELLI PER LE ESPLOSIONI CONFINATE E DETERMINAZIONE DELL'INDICE DI DEFLAGRAZIONE

Relatore:  
Professore  
Andreozi Roberto

Candidate:  
Cerlino Assunta  
matr.518/629  
Fusciello Federica Adele  
matr.518/617

## STRUTTURA E SCOPO DELLA TESI

Il presente elaborato di tesi ha come oggetto ***lo studio dei modelli più utilizzati per caratterizzare le esplosioni che avvengono in ambienti chiusi*** e che, pertanto, potrebbero dar vita a danni, a persone e a strutture.



***L'obiettivo sarà quindi quello di pervenire attraverso l'uso di suddetti modelli alla definizione dell'indice di deflagrazione,  $K_G$ , ovvero, del parametro fondamentale per la progettazione dei dispositivi di sicurezza, adottati in ambito industriale.***

## GENERALITA' SULLE ESPLOSIONI DI MISCELE GASSOSE

**ESPLOSIONE** → improvviso e violento rilascio di energia meccanica, chimica o nucleare, con la produzione di gas ad altissime temperature e pressioni.

### Esplosioni chimiche

(coinvolgono miscele di gas in aria o in ossigeno)

#### eterogenee o innescate:

È necessario fornire l'innescò per provocare l'esplosione

↓  
Fenomeno della propagazione della fiamma

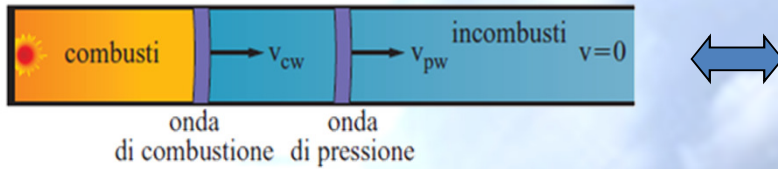
#### omogenee o non innescate:

L'intero volume della miscela, portato ad una certa temperatura, si infiamma uniformemente in ogni suo punto



In base alla velocità con cui si propaga la fiamma, si distinguono:

## DEFLAGRAZIONI

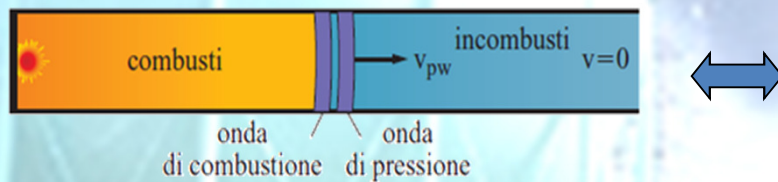


la velocità con cui si propaga la reazione di combustione nella miscela è minore della velocità del suono nella miscela stessa



Le onde (di pressione e di combustione) sono disgiunte.

## DETONAZIONI

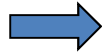


la velocità di propagazione di fiamma è maggiore della velocità del suono nella miscela



Le due onde (di pressione e di combustione) sono accoppiate.

Onda di pressione



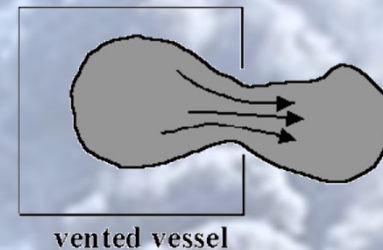
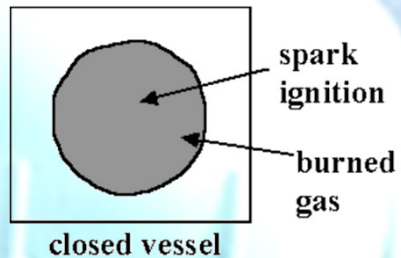
Danni da  
sovrapressioni



Adozione di  
**MISURE DI SICUREZZA**

Uno dei modi più efficaci consiste  
nell'allontanare i gas dall'ambiente in cui sta  
avvenendo l'esplosione:

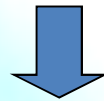
**VENTING**



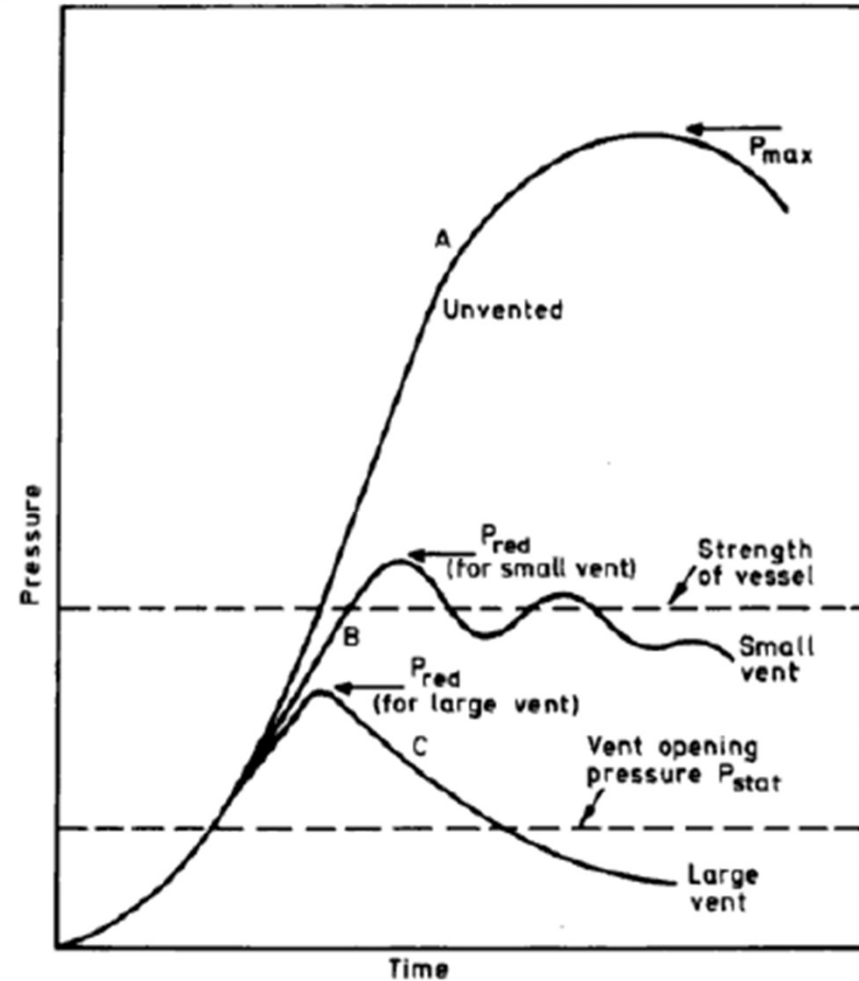
Nelle apparecchiature e strutture industriali vengono  
previste delle *superfici cedevoli* che in  
corrispondenza di una pressione definita,  $P_{stat}$ , si  
aprano e consentano l'efflusso dei gas.

Si mostra l'andamento della pressione nel tempo per:

- un recipiente chiuso (curva A)
- un recipiente "ventato" per due valori diversi della sezione di "vent" (curve B e C)



Se la sezione di "vent" è opportunamente progettata, inoltre, è possibile raggiungere valori di pressioni al di sotto della pressione massima tollerabile dall'apparecchiatura





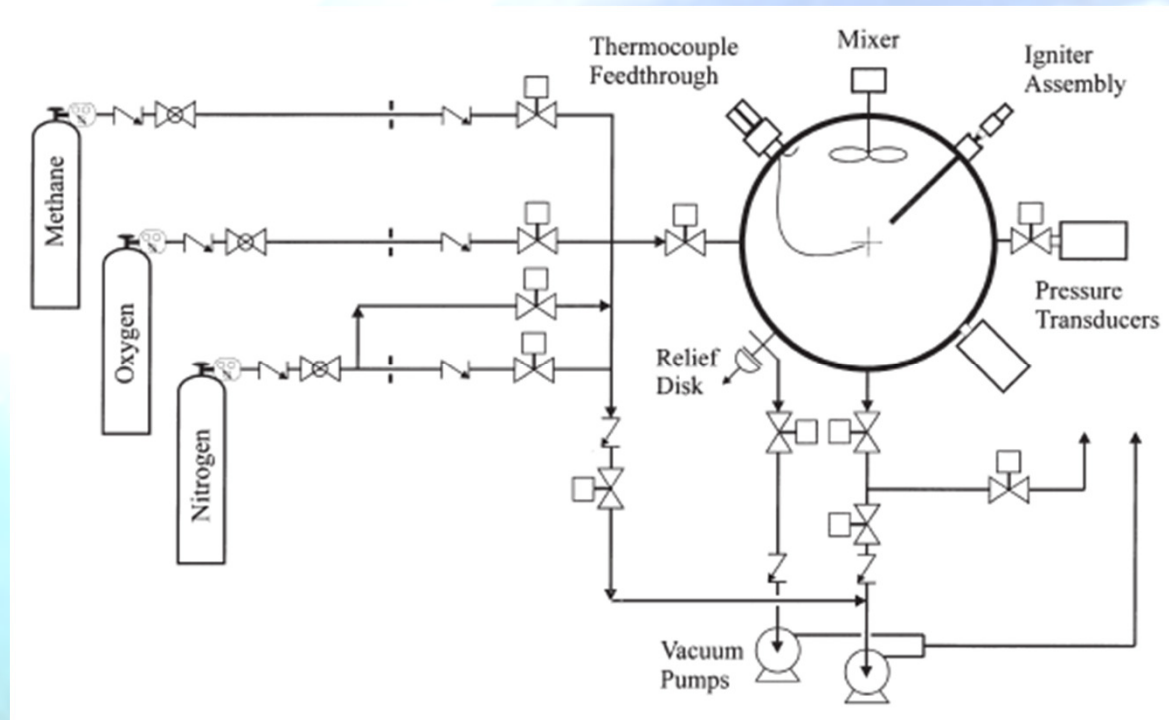
*Dimensionare tali sistemi consiste nel determinare l'area di sfogo, che oltre ad essere proporzionale al volume del recipiente dipende anche dalla pressione massima raggiunta a seguito dell'attivazione dei dispositivi,  $P_{RED}$ , dalla pressione alla quale i dispositivi si attivano,  $P_{STAT}$ , ed da un parametro  $K_G$  definito **indice di deflagrazione**.*

$$A = k_N V_v^{2/3}$$

$V$  : volume dell'apparecchiatura

$K_N$  : parametro che dipende da  $P_{RED}$ ,  $P_{STAT}$  e  $K_G$

## DETERMINAZIONE SPERIMENTALE DEL $K_G$



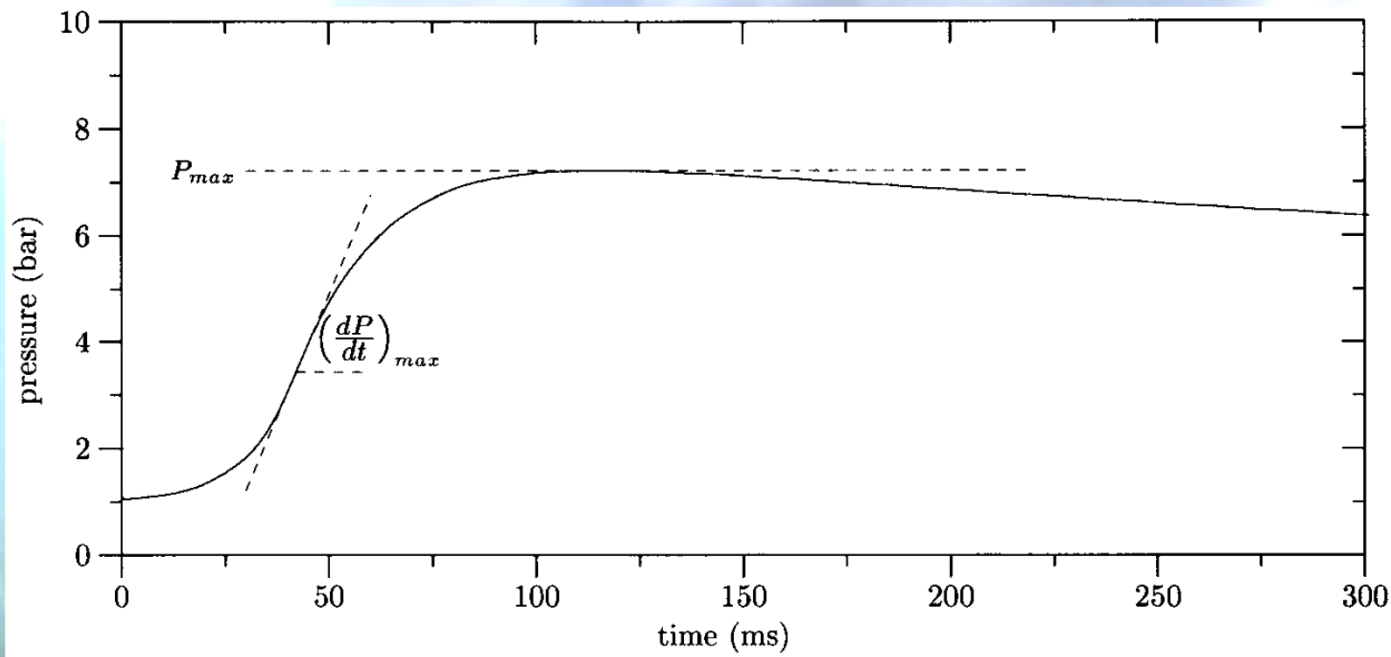
Le prove di laboratorio per la determinazione del parametro  $K_G$  si svolgono in genere in una “*bomba di Bartknecht*”, usata anche per valutare l’esplosività delle sospensioni di polveri in aria.



Si definisce l'indice di deflagrazione,  $K_G$ :

$$K_G = \left[ \frac{dP}{dt} \right]_{\max} V^{1/3}$$

Per conoscerlo, è necessario determinare la sovrappressione massima.



Sperimentalmente si osserva che la massima derivata della pressione non coincide con il punto di massimo della curva, cioè non si ha in corrispondenza del massimo valore di pressione raggiunto durante l'esplosione.

## MODELLO DELLA CRESCITA DI FIAMMA



E' un modello di carattere generale per valutare l'andamento della pressione nel tempo per un esplosione confinata *dall'innescio dell'esplosione fino alla massima crescita della pressione.*



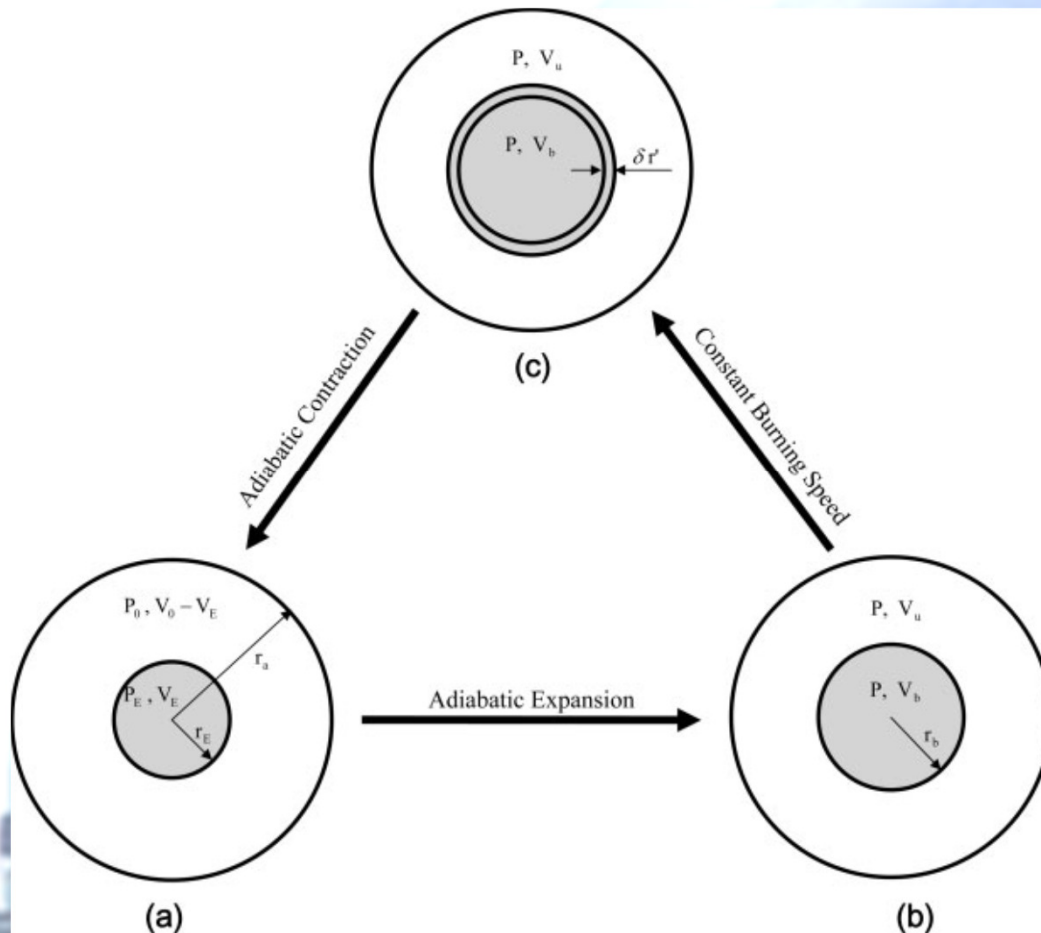
Il modello prende in considerazione caratteristiche quali **le capacità termiche, quella dei gas combusti e incombusti, e la velocità di combustione.**

Le ipotesi e i parametri richiesti per l'utilizzo del modello sono:

- a) *equilibrio chimico;*
- b) *pressione di esplosione a volume costante;*
- c) *capacità termica del gas in funzione della temperatura;*
- d) *esponente della velocità di combustione che è funzione della pressione e della temperatura;*

$$Su = Su^o \left( \frac{P}{P_o} \right)^n$$

Si analizza il **modello matematico** adottato per le esplosioni confinate:  
 la pressione può essere stimata con l'introduzione di **stati virtuali**



**-Stadio(a):** il gas infiammabile è bruciato a volume costante.  $P_E$  è valutata mediante un programma di equilibrio chimico.

**-Stadio(b):** la pressione è uniforme in tutto il reattore, ma gas bruciati e gas incombusti sono separati da una sottile zona di combustione

**-Stadio(c):** la pressione in un qualunque istante dopo l'innesco dell'esplosione è data dalla seguente equazione:

$$V_o = V_E \left( \frac{P_E}{P} \right)^{\frac{1}{\gamma_b}} + \left( \frac{P_o}{P} \right)^{\frac{1}{\gamma_u}} (V_o - V_E)$$



$$\frac{dP}{dt} = \left( \left( \overline{P}_E \right)^{\frac{1}{\gamma_b}} - 1 \right) \gamma_b \left( \overline{P} \right)^{(1+n)} 3r_b^{-2} P_o \frac{Su^\circ}{r_o}$$

quando  $P = P_E$  ovvero quando l'incremento  $dP/dt$  è massimo:

$$K_G = 3 \left( \frac{4}{3} \pi \right)^{\frac{1}{3}} \gamma_b Su^\circ P_o \left( \overline{P}_E \right)^{(1+n)} \left( \left( \overline{P}_E \right)^{\frac{1}{\gamma_b}} - 1 \right)$$

In cui:

- $\gamma$  rappresenta il rapporto tra i calori specifici del gas ( cp/cv). Il modello assume  $\gamma_u = \gamma_b$
- $Su^\circ$  rappresenta la velocità di combustione iniziale determinata in modo sperimentale
- $\overline{P}_E = \left( \frac{P_E}{P_o} \right)$
- $n$  rappresenta il parametro esponente della velocità di combustione

Dal modello di partenza analizzato, possono essere derivati dei modelli per lo studio di esplosioni confinate, più semplici, a seguito di appropriate assunzioni:

**1) Modello proposto da Dahoe et al.**

$$K_G = (36\pi)^{\frac{1}{3}} Su^o (P_E - P_o) \overline{P_E}^{\frac{1}{\gamma_u}}$$

**2) Modello proposto da Nagy et al.**

$$K_G = 3 \left( \frac{4\pi}{3} \right)^{\frac{1}{3}} Su^o P_o \overline{P_E} (\overline{P_E} - 1)$$

**3) Modello di Harris.**

$$\frac{\delta \overline{P}}{\delta t} = (\overline{P_E} - 1) \frac{\delta \xi}{\delta t} \approx 3 \overline{P} (\overline{P_E} - 1) (\overline{P_E} t)^2$$

**4) Modello di Zabetakis**

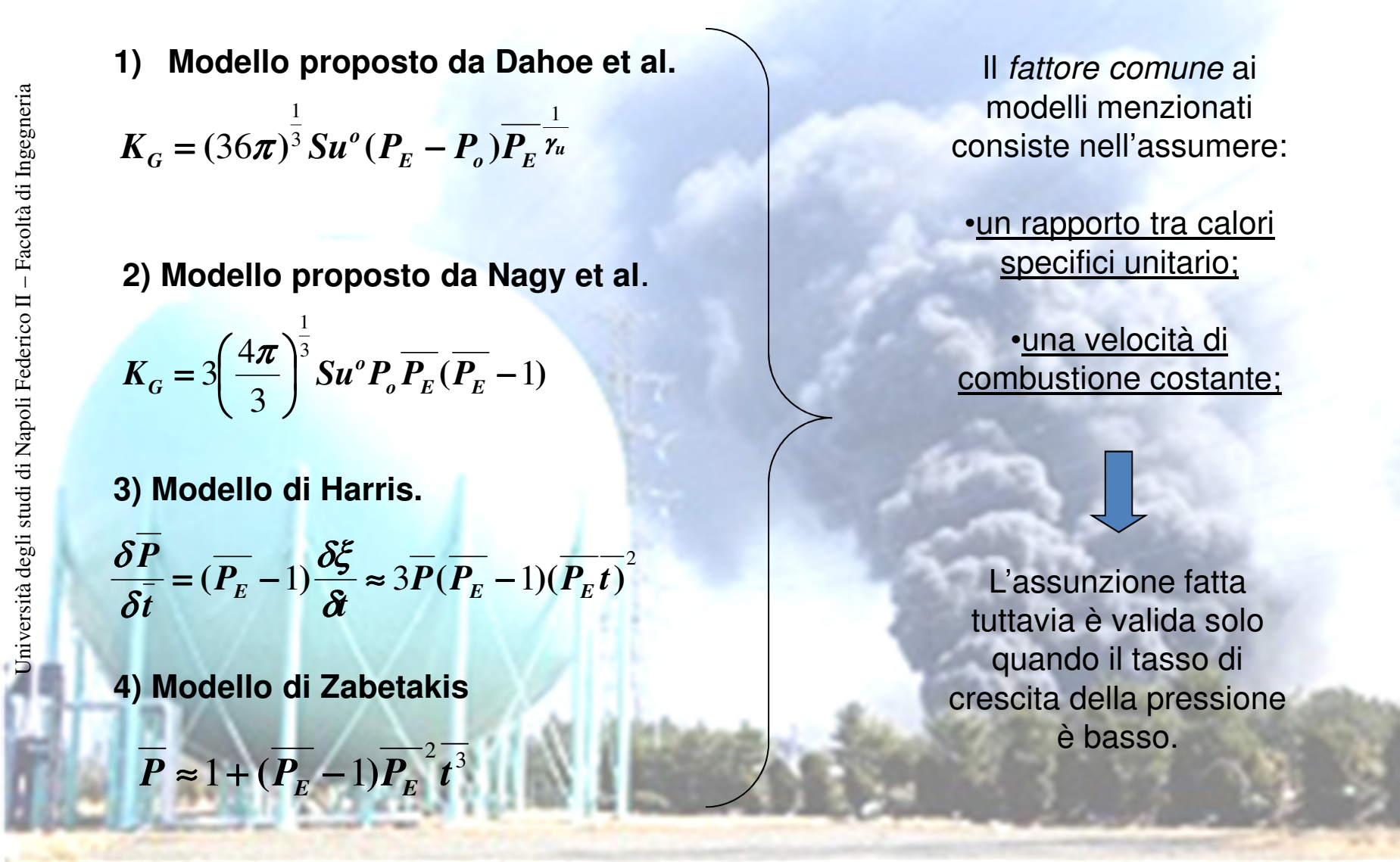
$$\overline{P} \approx 1 + (\overline{P_E} - 1) \overline{P_E}^2 t^3$$

Il *fattore comune* ai modelli menzionati consiste nell'assumere:

- un rapporto tra calori specifici unitario;
- una velocità di combustione costante;



L'assunzione fatta tuttavia è valida solo quando il tasso di crescita della pressione è basso.



Il modello interpreta i dati sperimentali molto bene.

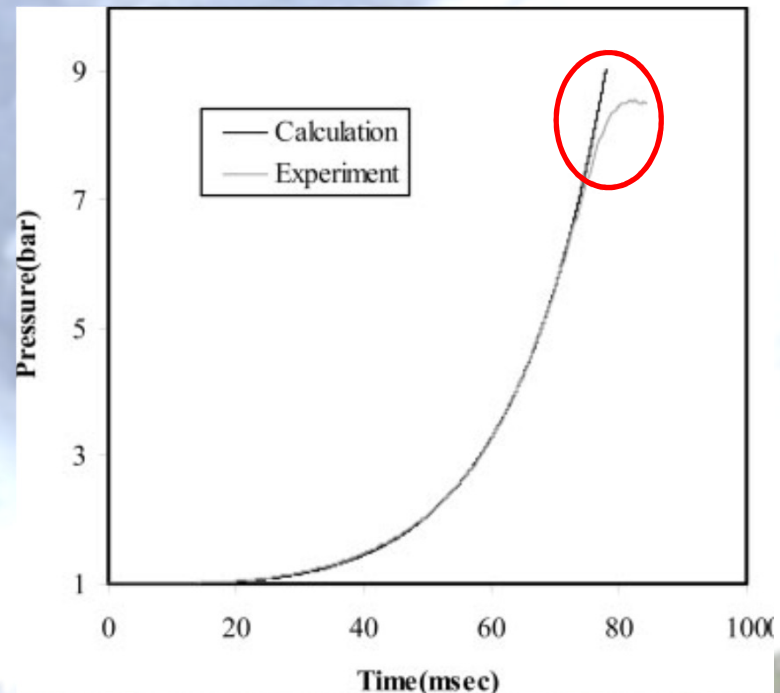
Il grafico mette a confronto il modello proposto con i dati sperimentali per delle miscele di metano:

Vi è un po' di differenza tra i dati sperimentali verso la fine dell'esplosione, appena prima della pressione massima:

- 1) in corrispondenza della pressione  $P_{\max}$  il fronte di fiamma comincia a venire a contatto con la superficie interna fredda del reattore da cui risulta lo spegnimento della combustione.
- 2) il galleggiamento dei gas bruciati può qui verificarsi, pertanto ne risulta una distorsione della fiamma dalla forma sferica.



In definitiva *la pressione massima sperimentale di esplosione è più bassa della pressione di esplosione di equilibrio.*





## MODELLO DELLA FIAMMA SOTTILE (A DUE ZONE)

*Le assunzioni poste alla base di questo modello sono:*

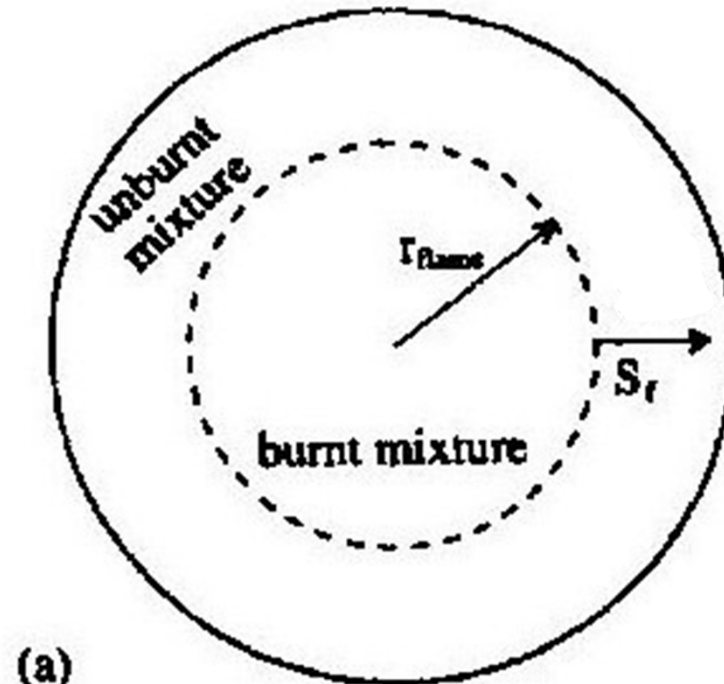
- la miscela bruciata e quella incombusta sono costituite da gas ideali;
- il calore specifico di entrambe le miscele (bruciata e incombusta) è lo stesso e rimane costante durante l'esplosione;
- la transizione dai gas incombusti a quelli bruciati avviene attraverso un solo "step", una reazione chimica irreversibile che può essere descritta da espressione di reazione globale;
- la temperatura della miscela non bruciata,  $T_u$ , continua a crescere a causa della compressione adiabatica;
- la velocità di combustione,  $S_u$ , rimane costante durante l'esplosione;
- l'ignizione della miscela avviene al centro della sfera.

*Dati di partenza del modello:*

- Pressione iniziale della miscela:  $P_0$
- Pressione finale della miscela:  $P_E$

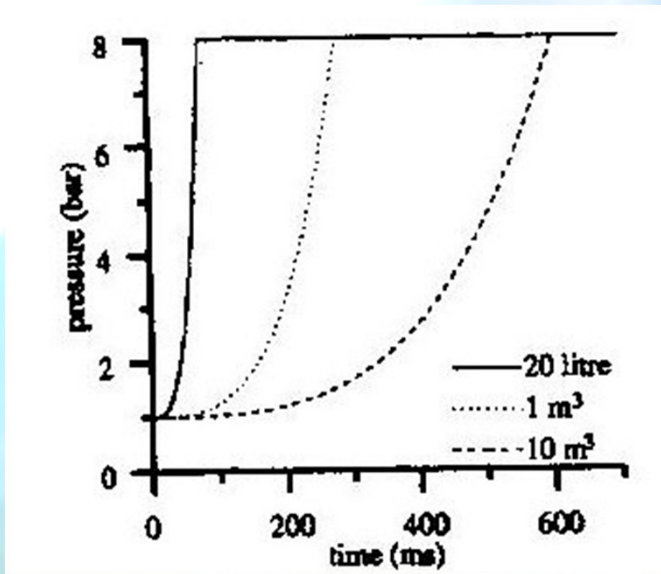
Le regioni sono separate da uno spessore infinitamente sottile;

*Il fronte di fiamma è allora una superficie nella quale ha luogo una transizione discontinua dalla miscela non bruciata a quella bruciata e che propaga radialmente dal punto di ignizione verso le pareti del reattore.*



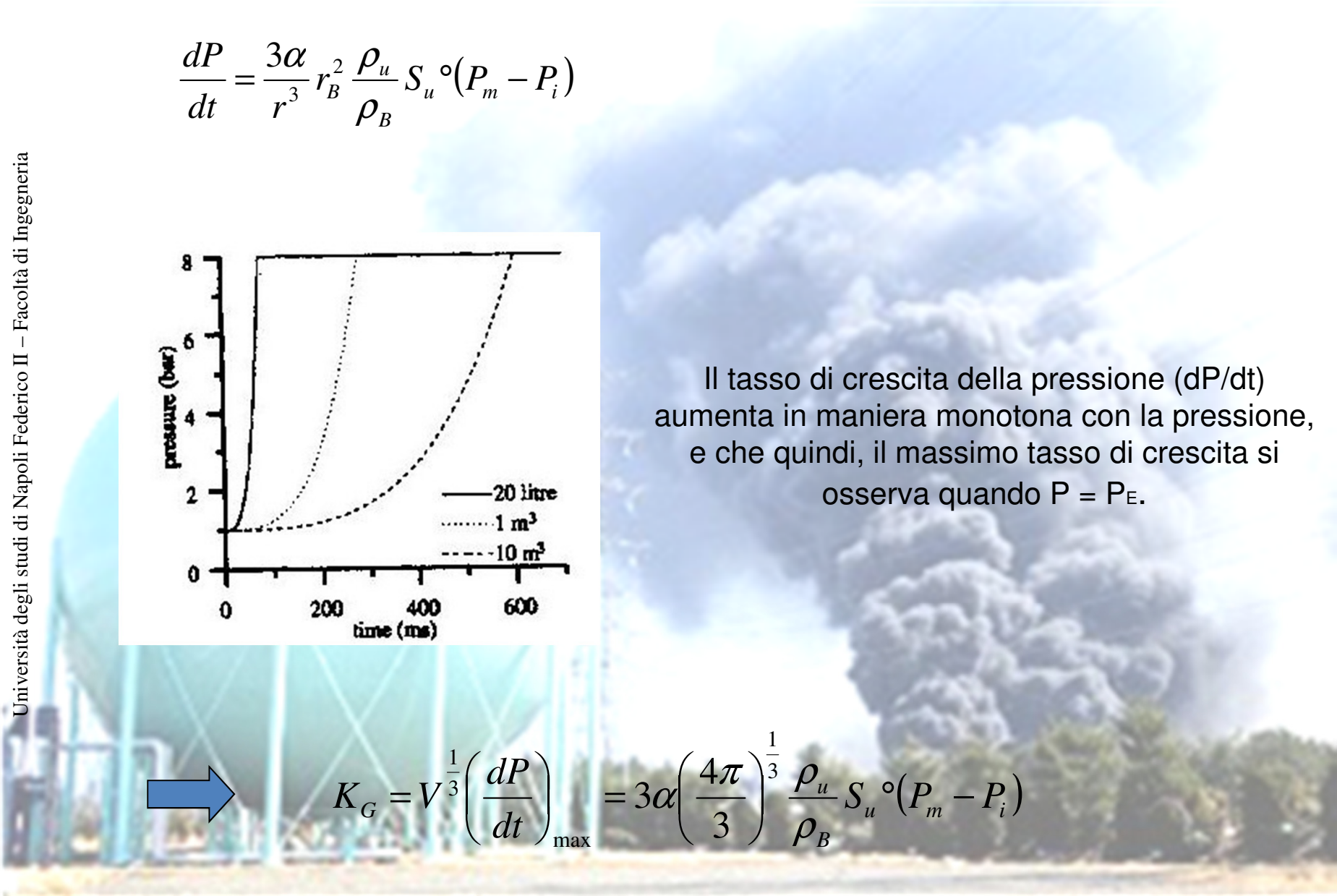
Dopo l'ignizione, il fronte di fiamma si muove nella miscela con una **velocità di fiamma,  $S_f$** .

$$\frac{dP}{dt} = \frac{3\alpha}{r^3} r_B^2 \frac{\rho_u}{\rho_B} S_u \circ (P_m - P_i)$$



Il tasso di crescita della pressione ( $dP/dt$ ) aumenta in maniera monotona con la pressione, e che quindi, il massimo tasso di crescita si osserva quando  $P = P_E$ .

$$\rightarrow K_G = V^{\frac{1}{3}} \left( \frac{dP}{dt} \right)_{\max} = 3\alpha \left( \frac{4\pi}{3} \right)^{\frac{1}{3}} \frac{\rho_u}{\rho_B} S_u \circ (P_m - P_i)$$





## KG: DATI E ANALISI

I valori di  $K_G$  sono stati stimati, oltre che da Bartknecht, anche dai ricercatori Senecal e Beaulieu, [ $K_G$ : New data and analysis". Fenwal Safety Systems, Marlborough, MA 01752] in un reattore non sferico, al fine di valutare valori di indice di deflagrazione per più specie combustibili, sopperendo così alla scarsità dei valori forniti dalla Guida NFPA 68.



*Gli obiettivi del lavoro citato erano di:*

- esaminare la sensibilità di  $K_G$  al variare della composizione delle miscele;
- correlare  $K_G$  con la velocità di combustione,  $S_u$ , dove i valori fossero disponibili;
- valutare la possibilità di usare i dati di  $dP/dt$  per stimare  $S_u$ .

## ANALISI DEI DATI:

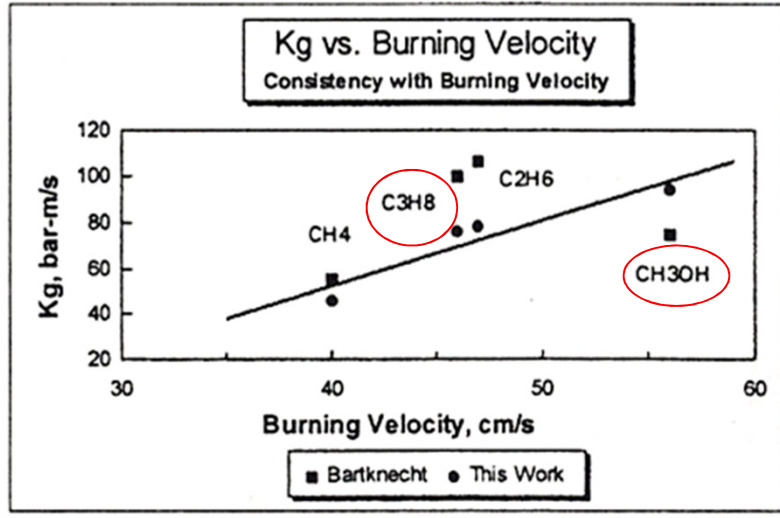
I test sono stati effettuati su 11 gas o vapori. I primi risultati di  $P_{max}$  e  $K_G$  ottenuti in questi lavori sono stati riportati nella tabella insieme ai dati di altre specie preventivamente disponibili in letteratura



I risultati ricavati vengono dopo confrontati con i valori pubblicati dal NFPA 68 di velocità di combustione, caratteristica chiave della miscela

Chemical	NFPA 68			BARTKNECHT		S&B	
	$S$ (cm/s)	$P_{MAX}$ (bar g)	$K_G$ (bar · m/s)	$P_{MAX}$ (bar g)	$K_G$ (bar · m/s)	$P_{MAX}$ (bar g)	$K_G$ (bar · m/s)
<b>Acetone</b>						7.3	65
Acetophenone		6.9	109	7.6	109		
Acetylene	166			10.6	1415		
Ammonia				5.4	10		
B-Naphthol				4.4	36		
Butane	45	8.0	92	8.0	92		
<b>iso-Butane</b>	41					7.4	67
Carbon Disulfide	58			6.4	105		
<b>1,1-Difluoroethane, R-152a</b>						7.7	58
Diethyl ether	47			8.1	115		
<b>Dimethyl ether</b>						7.9	108
Dimethyl Formamide				8.4	78		
2,2-dimethylpropane	39			7.8	60		
Dimethyl Sulfoxide				7.3	112		
<b>Ethane</b>	47	7.8	106	7.8	106	7.4	78
<b>Ethyl Alcohol</b>						7.0	78
Ethyl benzene		6.6	94	7.4	96		
<b>Ethylene</b>	80					8.0	171
<b>Hydrogen</b>	312	6.9	659	6.8	550	6.5	638
Hydrogen Disulfide				7.4	45		
Isopropanol	41			7.8	83		
<b>Methane</b>	40, 37.3	7.05	64	7.1	55	6.7	46
<b>Methyl Alcohol</b>	56			7.5	75	7.2	94
Methyl Nitrite				11.4	111		
Methylene Chloride				5.0	5		
Mobiltherm Light Oil				8.0	100		
Octanol				6.7	95		
Octyl Chloride				8.0	116		
Pentane	46	7.65	104	7.8	104		
<b>Propane</b>	46, 41	7.9	96	7.9	100	7.2	76
S. African Crude Oil				7.2	49		
Toluene	41			7.8	94		

## RISULTATI E CONFRONTI:



1) I valori di  $K_G$  hanno un andamento pressoché lineare con la velocità di combustione

$$\longrightarrow K_G \propto Su$$

contrariamente a quelli riportati da Bartknecht.

Sembra che vi sia un certo grado di *incoerenza* in questi ultimi rispetto alla velocità di combustione.

Confrontando i risultati di propano (C<sub>3</sub>H<sub>8</sub>) e alcool metilico (CH<sub>3</sub>OH):

	$S_u$ (cm/s)	$K_G$ (bar*m/s)	
(C <sub>3</sub> H <sub>8</sub> )	46	76	100
(CH <sub>3</sub> OH)	56	94	75

↓ Lavoro di ricerca  
↓ Bartknecht

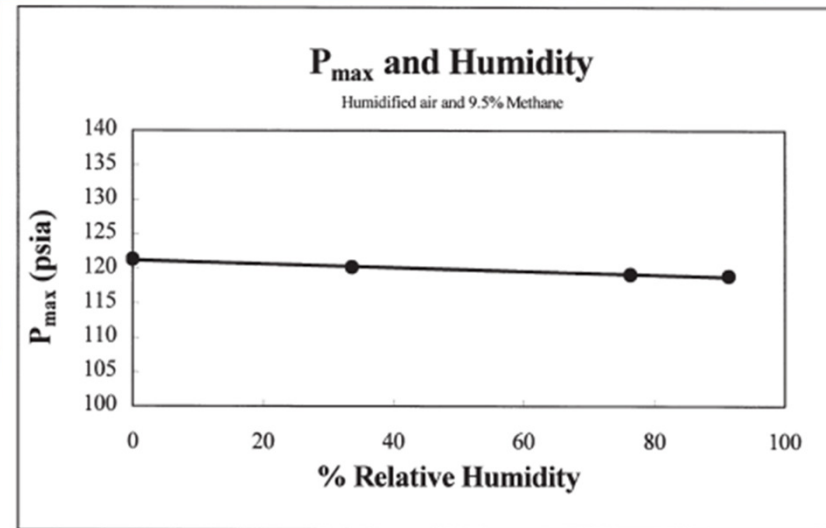
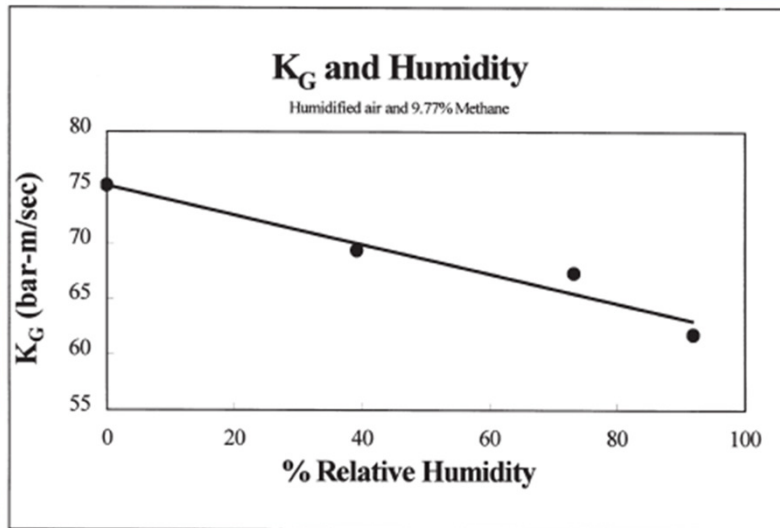
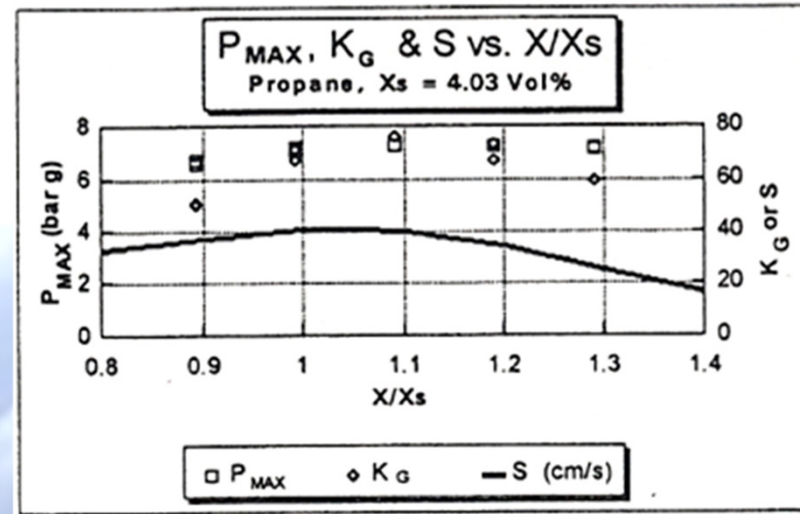
Si vede che:

- i valori di  $K_G$  presentati in questo lavoro tendono ad essere inferiori rispetto a quelli riportati da Bartknecht;

- i valori di  $K_G$  proposti da Bartknecht sono invertiti rispetto a quelli del lavoro di ricerca che rispettano l'andamento di  $S_u$  per queste specie.



2) Con riferimento a una delle specie più utilizzate, il propano, si osserva che la massima velocità di combustione  $S_u$ , si verifica per miscele di propano-aria per un rapporto equivalente di 1,1. In questo lavoro si osserva che il massimo valore di  $K_G$  si verifica per molte specie proprio per la miscela stechiometrica.



3) L'indice di deflagrazione e la pressione massima risultano sensibili alle condizioni di umidità della miscela in aria.

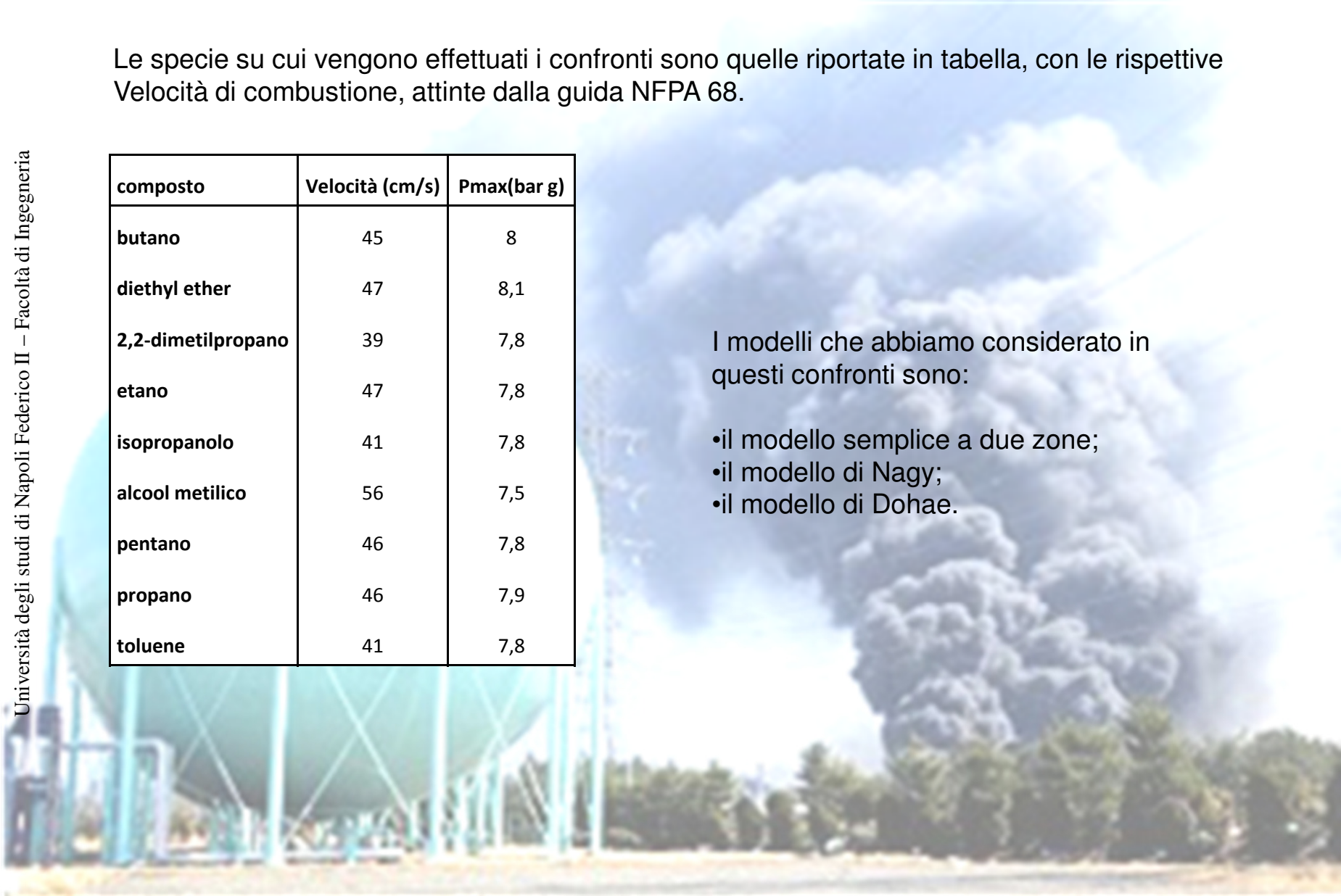
# CONFRONTO TRA I DATI SPERIMENTALI E I RISULTATI DEI MODELLI

Le specie su cui vengono effettuati i confronti sono quelle riportate in tabella, con le rispettive Velocità di combustione, attinte dalla guida NFPA 68.

composto	Velocità (cm/s)	Pmax(bar g)
butano	45	8
diethyl ether	47	8,1
2,2-dimetilpropano	39	7,8
etano	47	7,8
isopropanolo	41	7,8
alcool metilico	56	7,5
pentano	46	7,8
propano	46	7,9
toluene	41	7,8

I modelli che abbiamo considerato in questi confronti sono:

- il modello semplice a due zone;
- il modello di Nagy;
- il modello di Dohae.



MODELLO A DUE ZONE → 
$$K_G = 3\alpha \left( \frac{4\pi}{3} \right)^{1/3} \frac{\rho_u}{\rho_b} S_u^0 (P_{\max} - P_0)$$

Per questo modello vengono fatte le seguenti assunzioni:

$\alpha = 1$  , al fine di massimizzare l'indice di deflagrazione, per considerare la condizione più gravosa;

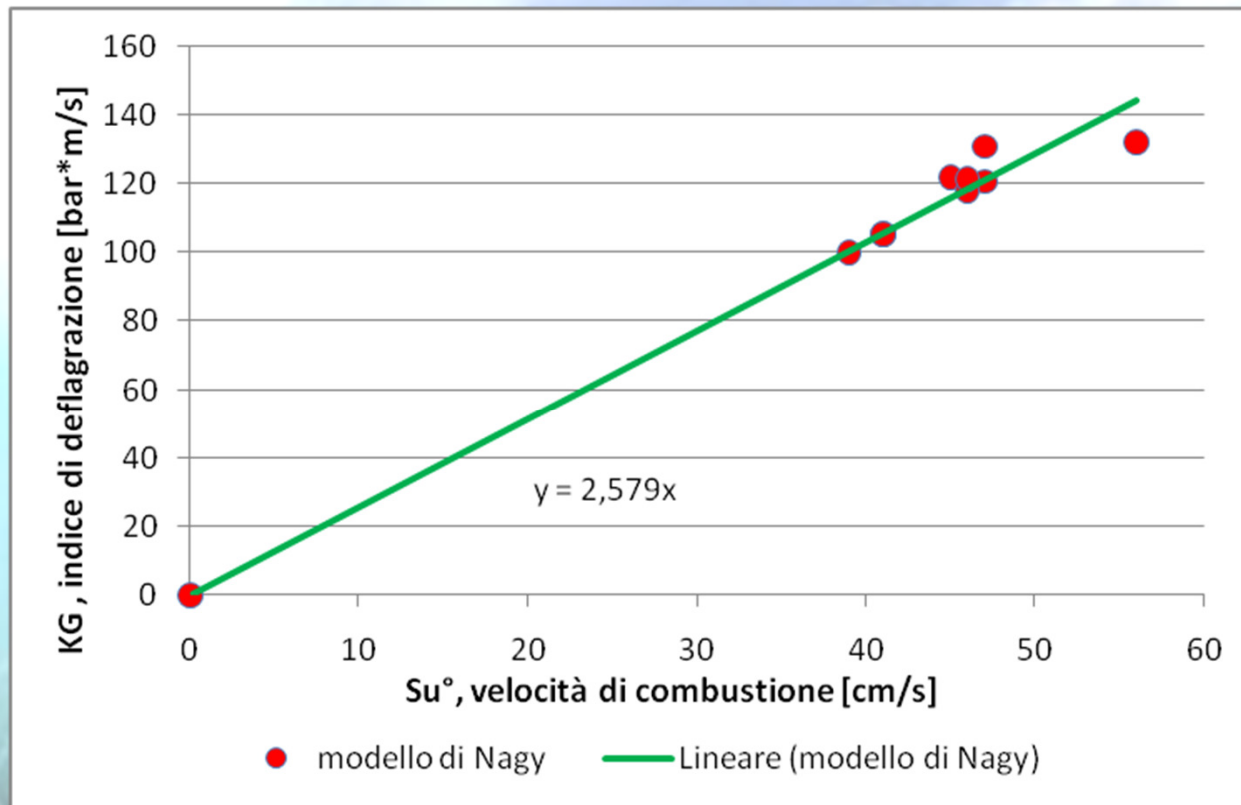
$$P_0 = 1 \text{ atm};$$

$$\frac{\rho_u}{\rho_b} = \left( \frac{T_f}{T_0} \right) = \left( \frac{P_E}{P_0} \right)$$

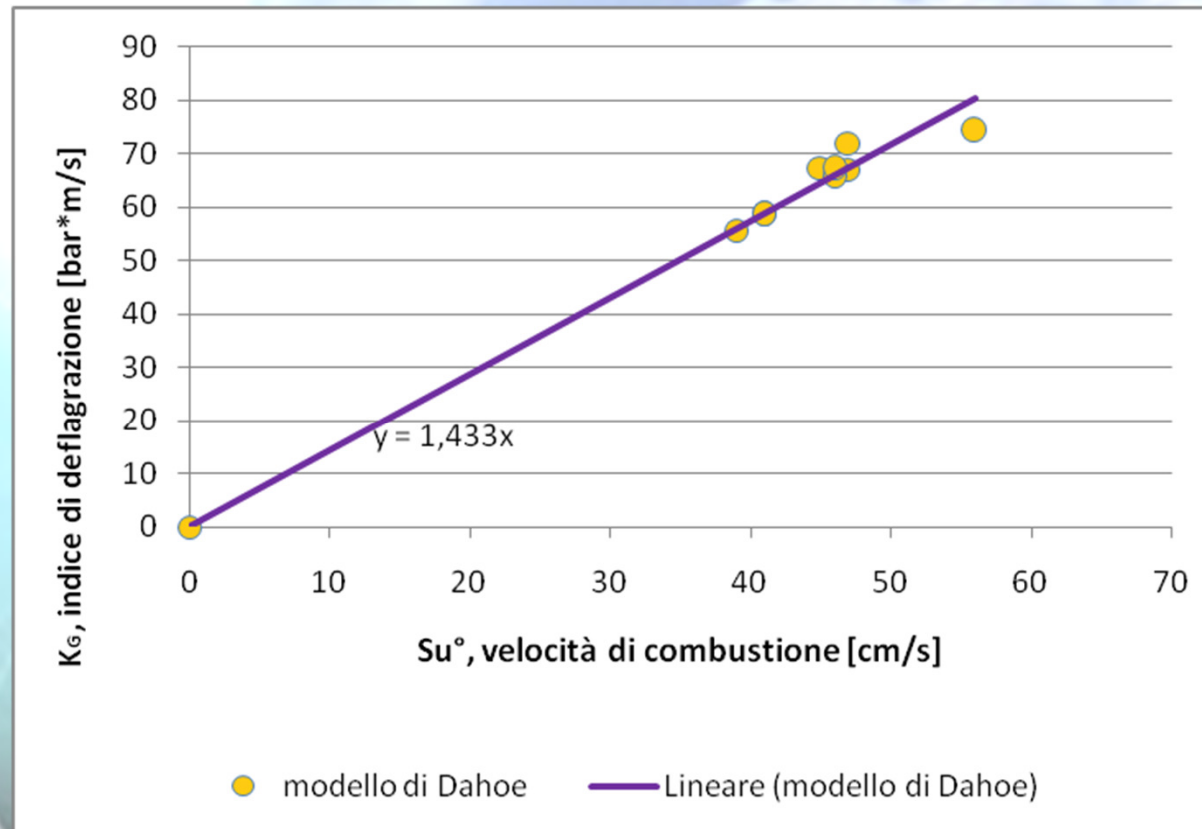
Considerando le semplificazioni suddette si è riscontrato che i valori di indice di deflagrazione determinati con tale formula coincidono con quelli valutati tramite il modello di Nagy.

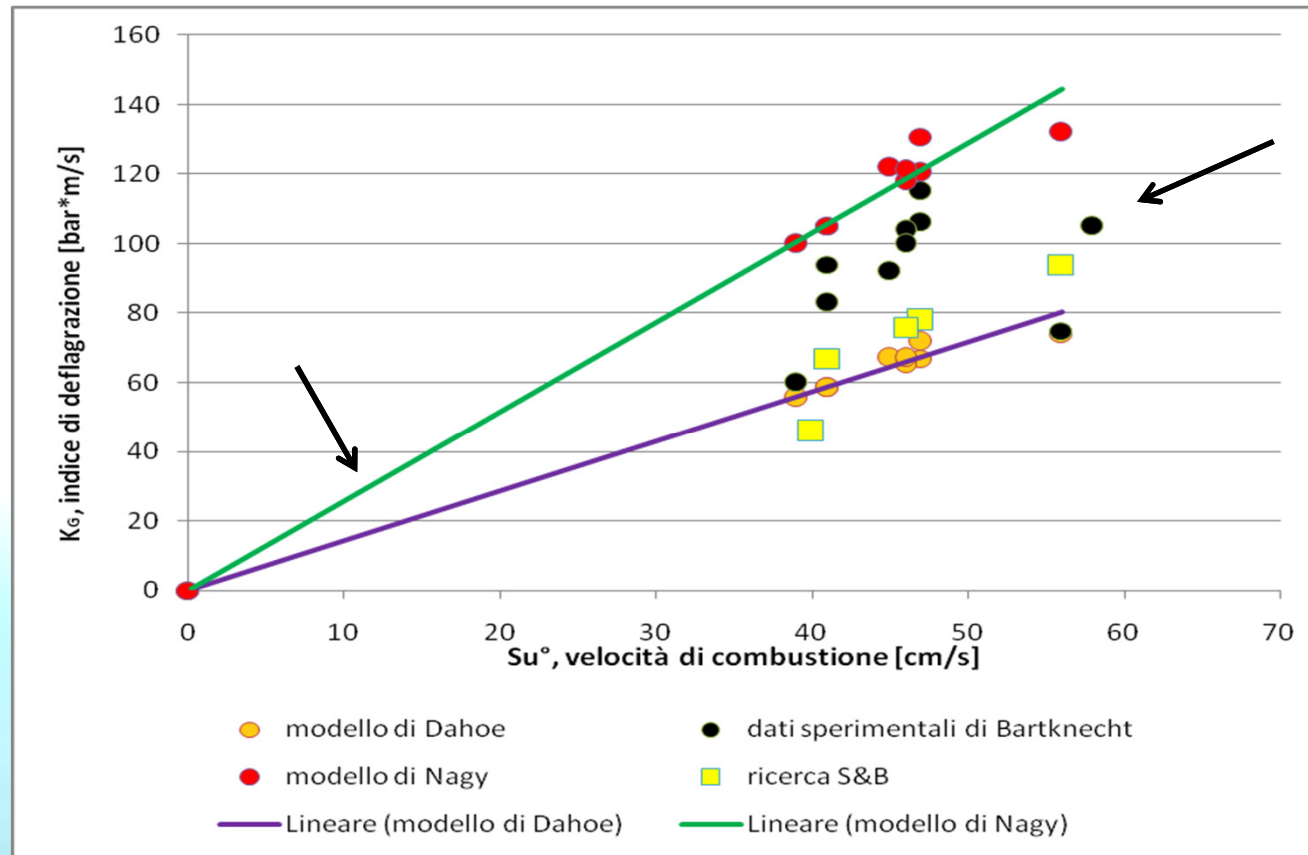


MODELLO DI NAGY  $\longrightarrow$  
$$K_G = 3 \left( \frac{4\pi}{3} \right)^{1/3} S_u^0 P_0 \bar{P}_E (\bar{P}_E - 1)$$



MODELLO DI DAHOE  $\longrightarrow K_G = (36\pi)^{1/3} S_u^0 (P_E - P_0) \bar{P}_E^{1/\gamma_u}$





Si è riscontrato che:

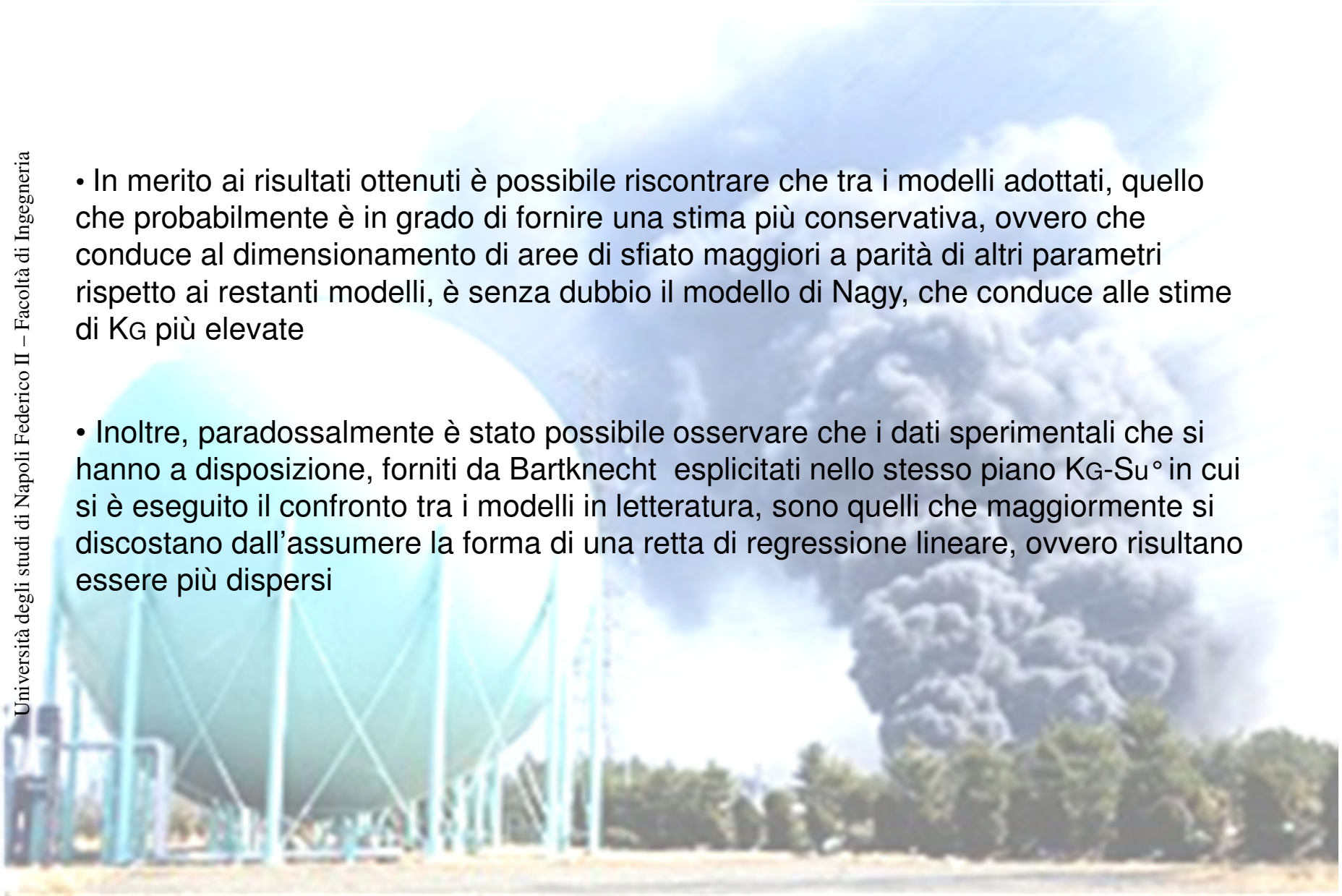
- nessuno dei modelli trovati fornisce valori di  $K_G$ , a partire da valori sperimentali della velocità di combustione, in accordo con i dati ottenuti da Bartknecht;
- il modello di Nagy fornisce una retta con coefficiente angolare più elevato, quindi potrebbe essere usato per una stima cautelativa per le aree di sfiato;
- anche i dati sperimentali di Senecal e Beaulieu hanno un andamento lineare con la velocità, ma sono stati ricavati in un reattore non sferico.



## CONCLUSIONI

- Analisi dei modelli riportati in letteratura con un approfondimento del modello “*della crescita della fiamma*”, dal quale, tramite delle assunzioni, si può risalire a modelli più semplici.
- I dati sperimentali, cioè i valori di velocità di combustione  $S_u$ , di pressione massima di esplosione  $P_{MAX}$ , e di indice di deflagrazione  $K_G$  sono stati attinti dalla guida NFPA 68, e dalle sperimentazioni condotte da Bartknecht con riferimento alle specie gassose di uso più frequente in ambito industriale, come il metano e il propano, ma anche specie più innovative come l'idrogeno.
- I risultati dei modelli relativi all'indice di deflagrazione, ottenuti a partire dai dati sperimentali della velocità di combustione, hanno permesso di valutare un legame approssimativamente “lineare” tra questi due parametri. Ciò equivale a dire che in futuro probabilmente sarà possibile ricavare i valori  $K_G$  a partire dalla velocità di combustione  $S_u$ , che è possibile ricavare da semplici esperimenti in tubi di prova, senza dover ricorrere alle curve pressione-tempo.

- In merito ai risultati ottenuti è possibile riscontrare che tra i modelli adottati, quello che probabilmente è in grado di fornire una stima più conservativa, ovvero che conduce al dimensionamento di aree di sfiato maggiori a parità di altri parametri rispetto ai restanti modelli, è senza dubbio il modello di Nagy, che conduce alle stime di Kg più elevate
- Inoltre, paradossalmente è stato possibile osservare che i dati sperimentali che si hanno a disposizione, forniti da Bartknecht e riportati nello stesso piano Kg-Su° in cui si è eseguito il confronto tra i modelli in letteratura, sono quelli che maggiormente si discostano dall'assumere la forma di una retta di regressione lineare, ovvero risultano essere più dispersi



Grazie per l'attenzione.

