

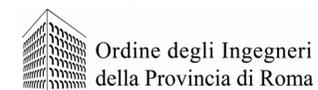
Chimica e Fisica dell'incendio

Dott. Ing. Alessandro Leonardi
Ordine degli Ingegneri della Provincia di Roma
alessandro.leonardi@stilweb.com

Docente nome

In collaborazione con

Organizzato da



Chimica e fisica dell'incendio - L'incendio

INCENDIO:

fenomeno naturale dovuto ad una reazione di combustione incontrollata con conseguente produzione di:

- **energia** sotto forma di calore convettivo e radiante
- **prodotti di reazione**



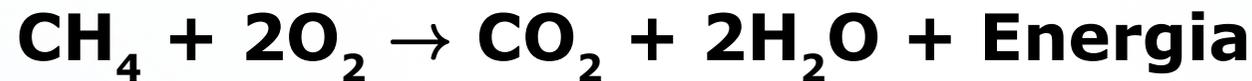
Chimica e fisica dell'incendio - La combustione

COMBUSTIONE:

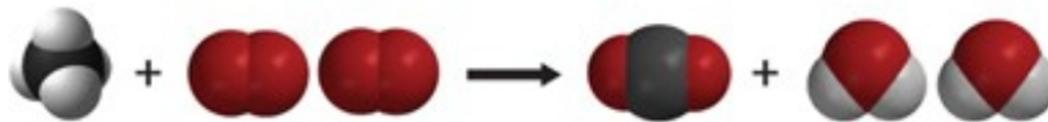
reazione chimica esotermica di ossido-riduzione, nella quale una sostanza detta comburente si combina con un'altra detta combustibile producendo:

- **energia** sotto forma di calore convettivo e radiante
- **prodotti di reazione**

Es.



(reazione di combustione del metano)



Chimica e fisica dell'incendio - La combustione

L'ENERGIA INTERNA, LE VARIABILI DI STATO E L'ENERGIA CINETICA

L'energia interna è una funzione di stato che esprime l'energia totale posseduta da un sistema materiale, intesa come somma dei contributi di energia traslazionale, rotazionale, e vibrazionale delle molecole che lo compongono, più il contributo dell'energia dovuto agli elettroni e dell'energia al punto zero (energia fondamentale posseduta a 0 K)

Il caso dei gas perfetti

L'energia interna U di un gas ideale monoatomico è data dalla somma di tutta l'energia cinetica di traslazione e si ottiene quindi moltiplicando l'energia cinetica media per il numero N di particelle.

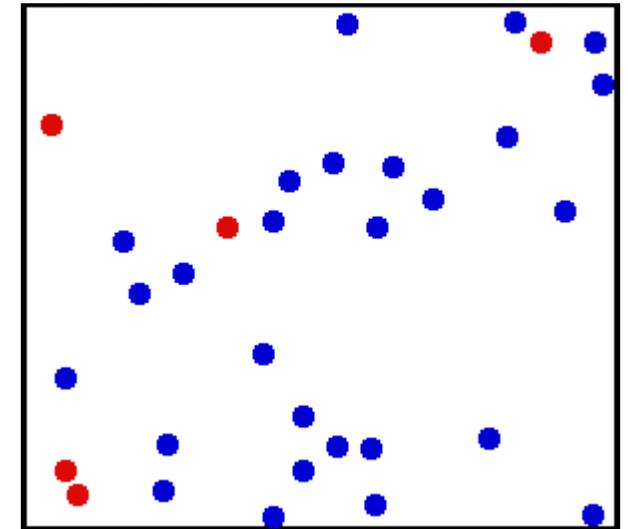
$$U = \frac{\sum_{i=1}^N \left(\frac{1}{2} \cdot m v_i^2 \right)}{N} = \frac{3 \cdot m \cdot R \cdot T}{M} = \frac{3}{2} \cdot n \cdot R \cdot T$$

$$v^2 = \frac{3 \cdot R \cdot T}{M}$$

$$p = \frac{M \cdot n \cdot v^2}{3 \cdot V}$$

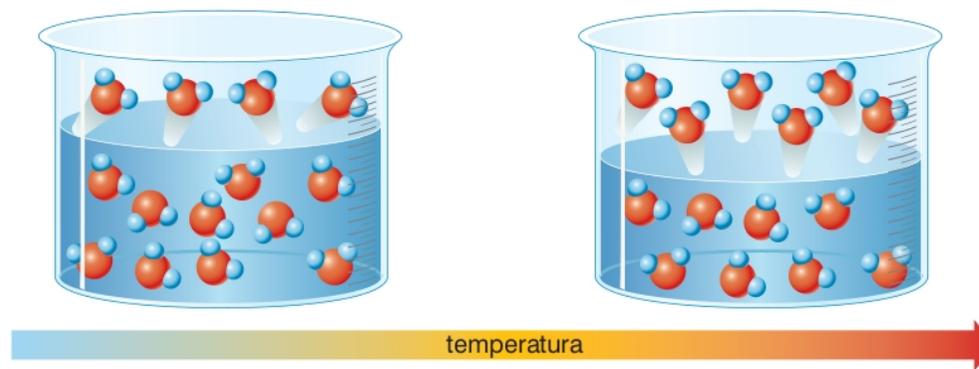
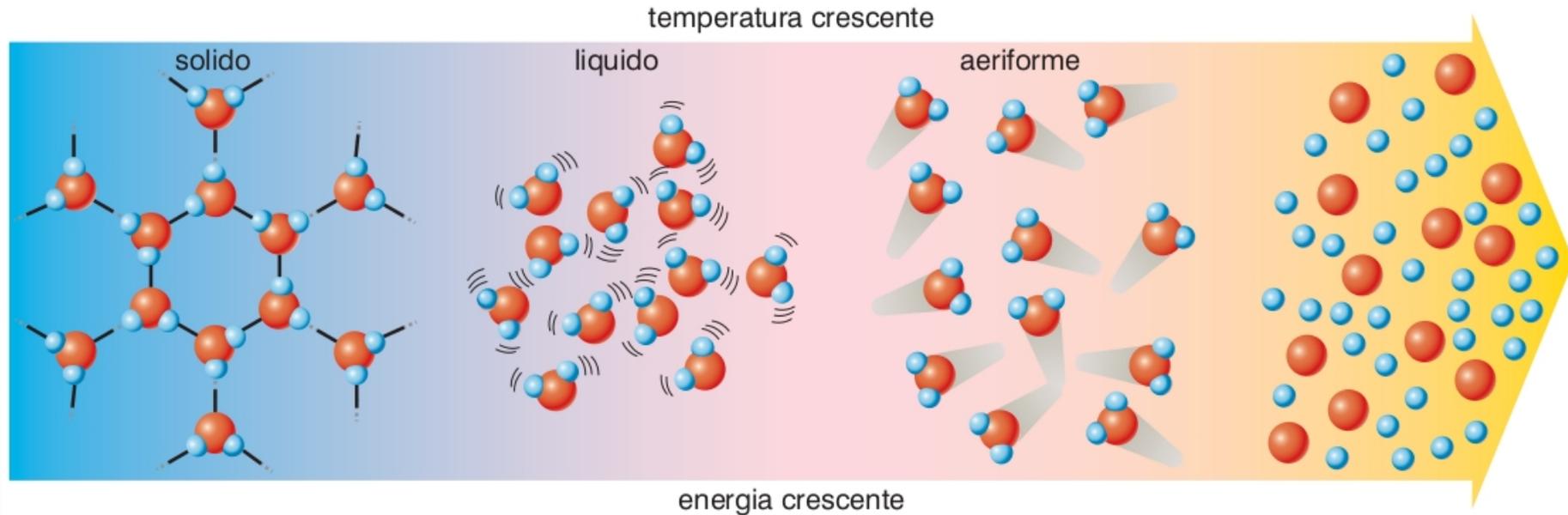
In generale

$$U = m \cdot C \cdot T + m \cdot p \cdot V + \frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2 + m \cdot g \cdot z + \dots$$



Chimica e fisica dell'incendio - La combustione

TEMPERATURA ENERGIA E PASSAGGIO DI STATO



Chimica e fisica dell'incendio - La combustione

LA PIROLISI L'EVAPORAZIONE E "LA MISCELA COMBUSTIBILE"

Aumentando la temperatura e quindi l'energia interna si ha:

LIQUIDI:

Evaporazione e diffusione nella fase gassosa

SOLIDI:

Sublimazione e pirolisi con diffusione nella fase gassosa

Chimica e fisica dell'incendio - La combustione

CENNI DI CINETICA

Indipendentemente dalla fase di aggregazione del materiale

**LA REAZIONE DI COMBUSTIONE AVVIENE SEMPRE IN FASE
GASSOSA!!**

La velocità di reazione è legata alla temperatura ed alla concentrazione dei reagenti

$$r = k(T) \cdot c_{Oss} \cdot c_{Comb} \text{ (moli/s)}$$

Chimica e fisica dell'incendio - La combustione

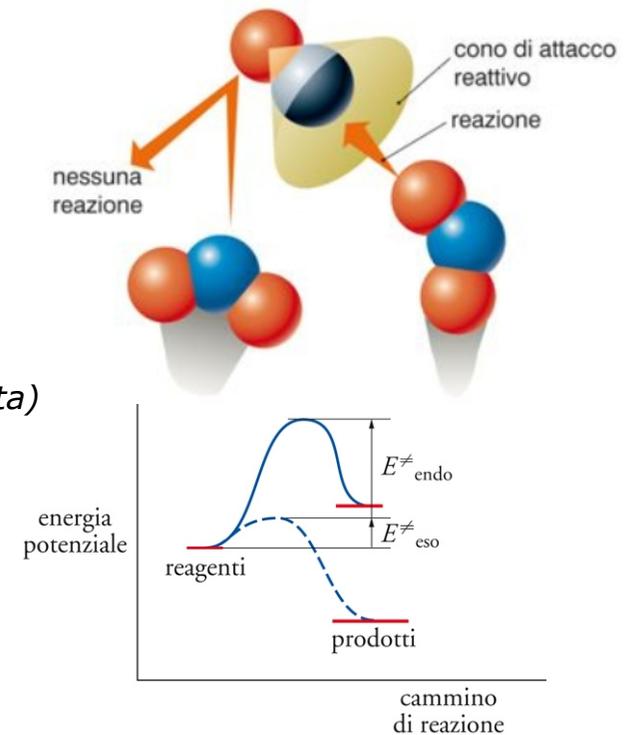
CENNI DI CINETICA

Max Trautz e William Lewis nel 1916 propongono la
TEORIA CINETICA COLLISIONALE O DEGLI URTI

$$r = Z \cdot \rho \cdot e^{\left(\frac{-\Delta E}{R \cdot T}\right)} \quad (\text{moli / s})$$

Con:

- ρ : *fattore sterico (probabilità di urto con orientazione relativa corretta)*
- $-\Delta E$: *energia di attivazione*
- R : *costante dei gas perfetti*
- T : *temperatura*
- Z : *frequenza delle collisioni*



CENNI DI CINETICA

Urti efficaci e frequenza delle collisioni

$$Z = N_A \cdot \sigma_{AB} \cdot \sqrt{\frac{8 \cdot k_b \cdot T}{\pi \cdot \mu_{AB}}}$$

Con:

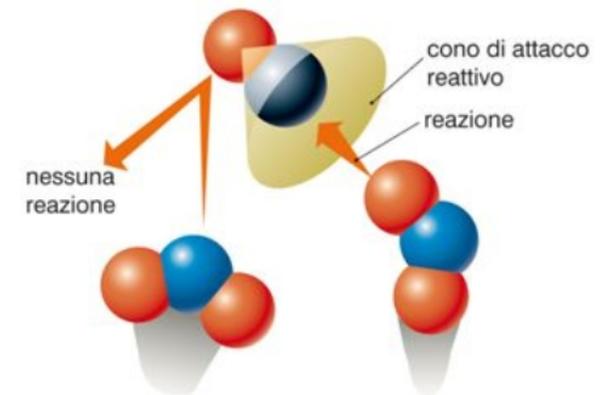
Z : frequenza delle collisioni

N_A : numero di Avogadro ($6,022 \times 10^{23}$)

σ_A : è la sezione d'urto

K_B : costante di Stefan Boltzman ($1,3806488 \times 10^{-23}$)

μ_{AB} : massa ridotta (massa avente energia cinetica uguale a quella complessiva delle molecole coinvolte)

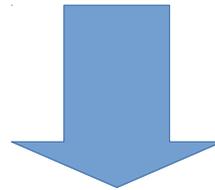


Chimica e fisica dell'incendio - La combustione

CENNI DI CINETICA

Affinché una reazione di combustione possa avvenire deve essere soddisfatta la seguente condizione:

Deve essere probabile l'urto efficace fra comburente e combustibile



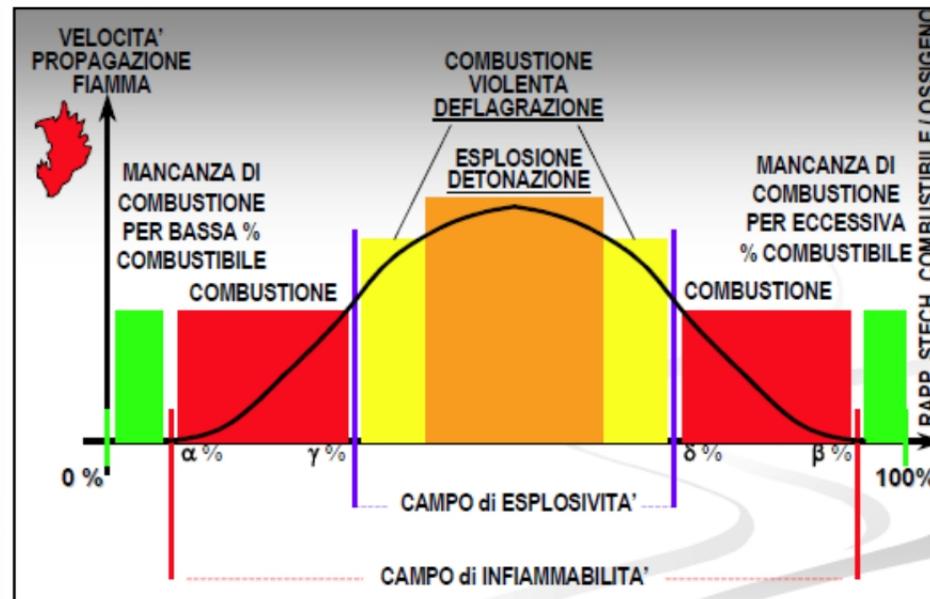
- 1) Devono essere presenti in ragionevoli quantità le due specie reagenti
- 2) La velocità di traslazione delle molecole deve essere tale da garantire l'efficacia dell'urto

Chimica e fisica dell'incendio - La combustione

CENNI DI CINETICA

Influenza delle concentrazioni dei reagenti

Esistono concentrazioni di combustibile e comburente da consentire un numero di urti tali da rendere possibile la reazione. In aria si individua per ogni sostanza combustibile un dominio di esistenza delle concentrazioni all'interno del quale la reazione è possibile. I limiti del dominio si definiscono come **limiti inferiore** (L_{inf}) e **limite superiore** (L_{sup}) di infiammabilità



Chimica e fisica dell'incendio - La combustione

CENNI DI CINETICA

Influenza delle concentrazioni dei reagenti

SOSTANZE	Campo di infiammabilità (% in volume)	
	limite inferiore	limite superiore
Acetilene	2.5	80.00
Ammoniaca	15.0	27.00
Benzina	1.0	6.5
Butano	1.9	8.40
Etano	3.0	12.40
Etilene	3.1	30.00
Gasolio	0.6	6.5
Idrogeno	4.0	74.50
Idrogeno Solforato	4.3	45.50
Isobutano	1.8	8.40
Metano	5.0	15.00
Monossido di carbonio	12.5	74.00
Ossido di etilene	3.0	99.00
Propano	2.3	9.75
Propilene	2.1	10.50

Chimica e fisica dell'incendio - La combustione

CENNI DI CINETICA

Influenza dell'energia cinetica molecolare (T,P)

Il livello energetico individuato dall'energia interna U deve essere tale da garantire che l'urto fra le molecole di combustibile e comburente provochi la ricombinazione delle molecole con produzione di nuove specie chimiche ed energia.

Ciò implica che la combustione possa avvenire solo in presenza di valori della pressione e/o temperatura superiori ad un determinato limite.

In particolare in aria ed alle condizioni normali di pressione (1 atm e livello del marre) si definiscono le seguenti due temperature significative:

Temperatura d'infiammabilità

Temperatura di accensione (autocombustione)

Chimica e fisica dell'incendio - La combustione

CENNI DI CINETICA

Influenza dell'energia cinetica molecolare (T,P)

Temperatura d'infiammabilità: la **più bassa temperatura** alla quale un **combustibile liquido** emette vapori sufficienti a formare con l'aria una miscela che, **se innescata**, brucia spontaneamente

SOSTANZA	TEMPERATURA DI INFIAMMABILITÀ	NOTE
Metano CH ₄	-188 °C	Sostanza esplosiva
GPL C ₃ H ₈	-104 -60 °C	Sostanza esplosiva
Benzina	-20 °C	Sostanza esplosiva
Acetone	-18 °C	Sostanza esplosiva
Alcool etilico	13 °C	Sostanza esplosiva
Gasolio	65 °C	Sostanza combustibile
Olio lubrificante	149 °C	Sostanza Combustibile

Chimica e fisica dell'incendio - La combustione

CENNI DI CINETICA

Influenza dell'energia cinetica molecolare (T,P)

Temperatura di accensione (autocombustione): temperatura minima alla quale un combustibile, in presenza d'aria brucia **senza necessità di innesco**.

SOSTANZA	TEMPERATURA DI ACCENSIONE	NOTE
Metano CH ₄	537 °C	Sostanza esplosiva
GPL C ₃ H ₈	470 °C	Sostanza esplosiva
Benzina	250 °C	Sostanza esplosiva
Acetone	540 °C	Sostanza esplosiva
Alcool etilico	425 °C	Sostanza esplosiva
Gasolio	220 °C	Sostanza combustibile
Carta	230 °C	Sostanza Combustibile
Gomma sintetica	300 °C	Sostanza Combustibile

Chimica e fisica dell'incendio - La combustione

COMBUSTIONE DEI GAS

Quando avviene:

dispersione di gas combustibile nell'ambiente con formazione di miscela di concentrazioni tali da rientrare nell'intervallo d'infiammabilità ed aumento anche locale dell'energia (innesco)

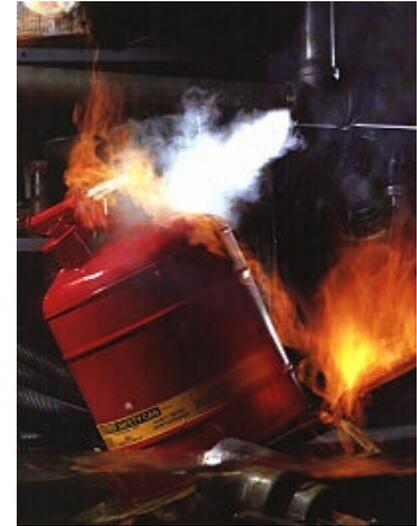
Cinetica:

le molecole di gas combustibile urtano quelle dell'ossigeno dando luogo alla reazione di ossidazione con sviluppo di nuove specie chimiche e calore

Classificazione del tipo di fuoco:

Fuoco di classe C

(estinguenti: polvere, CO_2 , alogenuri)



Chimica e fisica dell'incendio - La combustione

COMBUSTIONE DEI LIQUIDI

Quando avviene:

evaporazione del liquido combustibile nell'ambiente con formazione di miscela di concentrazioni tali da rientrare nell'intervallo d'infiammabilità ed aumento anche locale dell'energia (innesco)

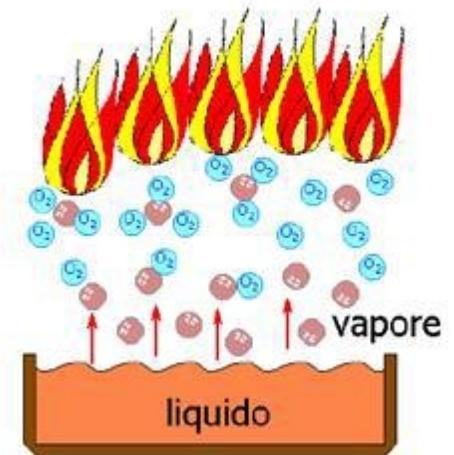
Cinetica:

le molecole di vapore combustibile urtano quelle dell'ossigeno dando luogo alla reazione di ossidazione con sviluppo di nuove specie chimiche e calore

Classificazione del tipo di fuoco:

Fuoco di classe B

(estinguenti: schiuma, polvere, CO₂)



Chimica e fisica dell'incendio - La combustione

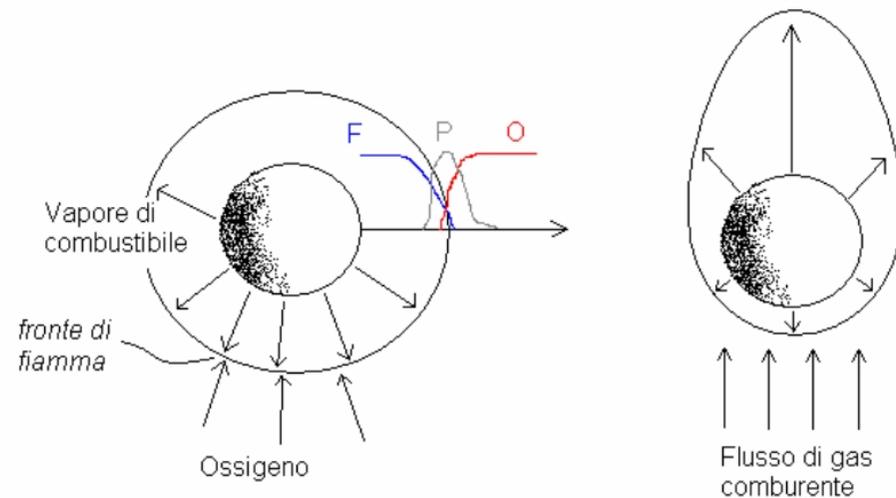
COMBUSTIONE DEI LIQUIDI

Note importanti:

L'evaporazione del liquido combustibile avviene attraverso l'interfaccia fra il liquido e l'aria.

Un aumento a parità di massa della superficie di scambio

ACCELERA ENORMEMENTE LA VELOCITÀ DI COMBUSTIONE



Chimica e fisica dell'incendio - La combustione

COMBUSTIONE DEI SOLIDI

Quando avviene:

sublimazione e/o pirolisi del solido combustibile
nell'ambiente con formazione di miscela di concentrazioni
tali da rientrare nell'intervallo d'infiammabilità ed aumento
anche locale dell'energia (innesco)

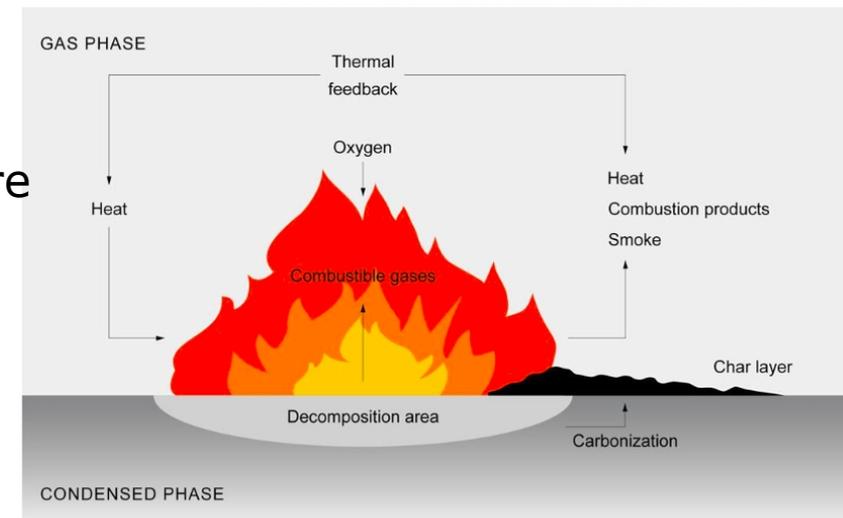
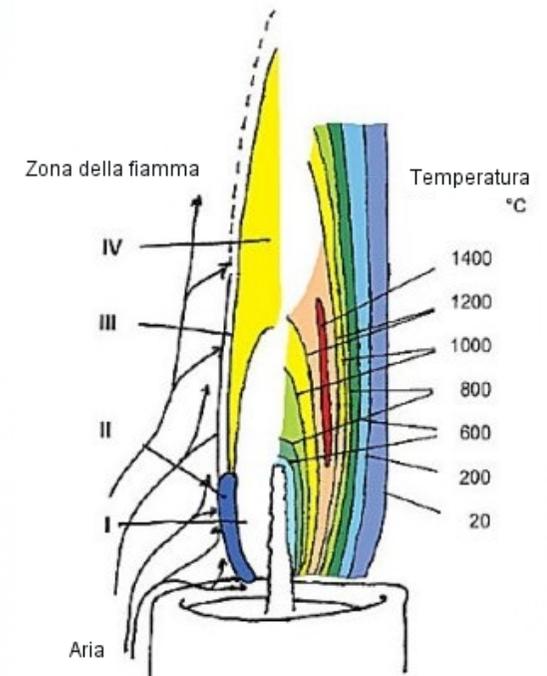
Cinetica:

le molecole di vapore/pirolizzato combustibile urtano
quelle dell'ossigeno dando luogo alla reazione di
ossidazione con sviluppo di nuove specie chimiche e calore

Classificazione del tipo di fuoco:

Fuoco di classe A

(estinguenti: acqua, schiuma, polvere)



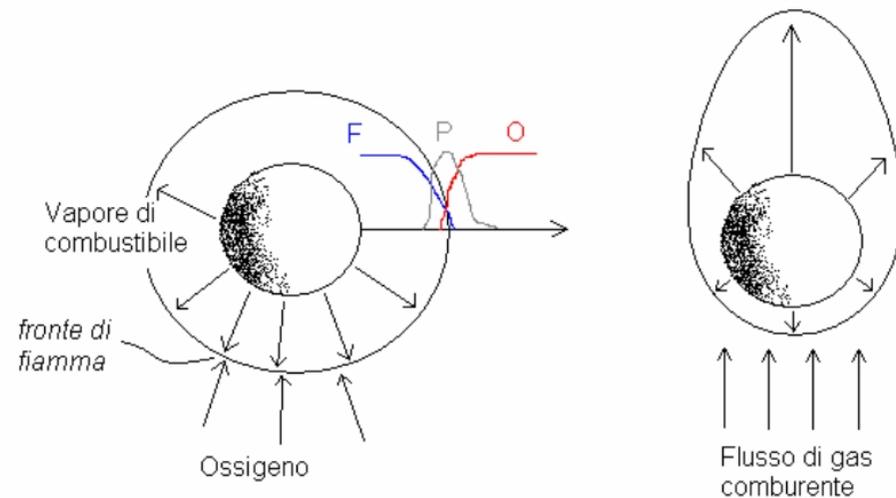
Chimica e fisica dell'incendio - La combustione

COMBUSTIONE DEI SOLIDI

Note importanti:

La sublimazione o la pirolisi di un solido combustibile avviene attraverso l'interfaccia fra il volume e l'aria. Un aumento a parità di massa della superficie di scambio

ACCELERA ENORMEMENTE LA VELOCITÀ DI COMBUSTIONE



Chimica e fisica dell'incendio - La combustione

LA FIAMMA

La fiamma rappresenta la regione dello spazio all'interno della quale avvengono il 90% delle reazioni di combustione e coincide con la superficie che emette l'energia prodotta sotto forma di radiazioni infrarosse.

Fiamme Luminose :emettono fino al 40% dell'energia prodotta e sono ricche di particolato (particelle carboniose incombuste)

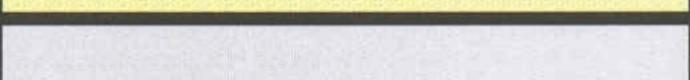
Fiamme non luminose: emettono meno del 5% dell'energia prodotta dalla combustione (combustione pulita - assenza di particelle incombuste)



Chimica e fisica dell'incendio - La combustione

LA FIAMMA

Negli incendi le fiamme sono sempre luminose ed il colore esprime indirettamente la temperatura raggiunta.

<i>SCALA CROMATICA DELLE TEMPERATURE</i>		
<i>COLORE DELLA FIAMMA</i>		<i>TEMPERATURA [°C]</i>
ROSSO NASCENTE		525
ROSSO SCURO		700
ROSSO CILIEGIA		900
GIALLO SCURO		1100
GIALLO CHIARO		1200
BIANCO		1300
BIANCO ABBAGLIANTE		1500

Chimica e fisica dell'incendio - La combustione

CLASSIFICAZIONE DELLE SOSTANZE

Infiammabili : sostanze che hanno una temperatura di infiammabilità < 65 °C

Combustibili : sostanze che hanno una temperatura di infiammabilità > 65 °C

CLASSIFICAZIONE DEI LIQUIDI

Liquidi di categoria A (H3-A):

liquidi che hanno una temperatura di infiammabilità < 21 °C (facilmente infiammabili)

Liquidi di categoria B (H3-b):

liquidi che hanno una temperatura di infiammabilità > 21 °C e < 65 °C (infiammabili)

Liquidi di categoria C:

liquidi che hanno una temperatura di infiammabilità > 65 °C (combustibili)

Chimica e fisica dell'incendio - La combustione

PRODOTTI DELLA COMBUSTIONE

Energia

Specie chimiche

Chimica e fisica dell'incendio - La combustione

PRODOTTI DELLA COMBUSTIONE

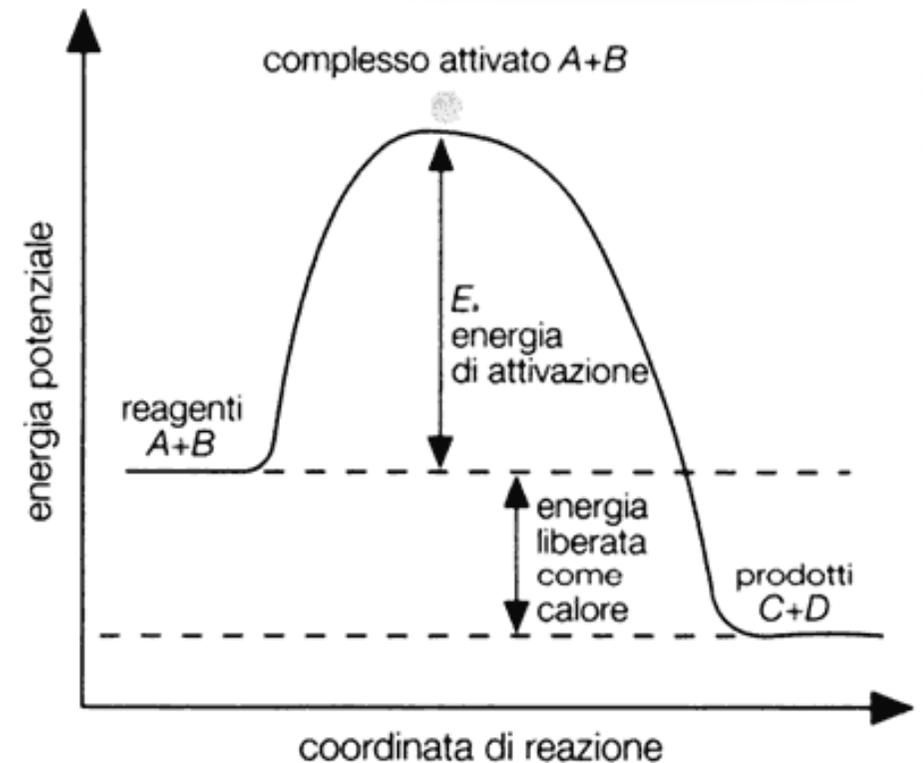
Energia

L'energia liberata da una reazione chimica esotermica è uguale alla differenza fra l'entalpia dei reagenti e dei prodotti di reazione. Nel caso di reazioni di combustione prende il nome di **potere calorifico inferiore** ed è espresso in MJ/kg o kJ/kg.

$$\Delta U = \Delta Q - \Delta(P \cdot V)$$

$$\Delta Q = \Delta U - \Delta(P \cdot V) = \Delta(U - P \cdot V) = \Delta H$$

$$\Delta Q = \Delta H = H_{pro} - H_{reag}$$



Chimica e fisica dell'incendio - La combustione

PRODOTTI DELLA COMBUSTIONE

Energia

Materiale	Pci (MJ/kg)	Materiale	Pci (MJ/kg)
Abiti	21	Fieno	17
Acetilene	49,6	GPL	46,49
Alluminio (polvere)	30,88	Gasolio	43,16
Benzina	43,57	Gomma vulcanizzata	25,12
Carta	17	Idrogeno	143
Celluloide	19	Kerosene	41,7
Cera	47	Lana	26,6
Coke	34	Legno	17
Cotone (tessuto)	17	Magnesio	27,84
Alcol etilico	26,84	Metano	56
Farina	16,75	Policarbonato	43,4

PRODOTTI DELLA COMBUSTIONE

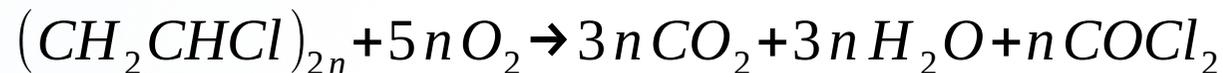
Specie chimiche

I prodotti della combustione dipendono dai seguenti fattori:

- 1) Composizione del materiale combustibile
- 2) Concentrazione dell'ossigeno
- 3) Ventilazione



oppure



Ecc.

Chimica e fisica dell'incendio - La combustione

PRODOTTI DELLA COMBUSTIONE

Specie chimiche

Materiale	Particolato (kg _{fumo} /kg _{comb})	CO2 (kg _{fumo} /kg _{comb})	CO (kg _{fumo} /kg _{comb})
PMMA	0,010	2,3	0,005
ABS	0,135	2,4	0,057
PE	0,048	2,6	0,028
Isoottano	0,025	3,0	0,017
Benzene	0,18	2,51	0,056
EPS	0,25	2,192	0,174

PRODOTTI DELLA COMBUSTIONE

Specie chimiche

Tossicità :

$$FED = \int_{t_1}^{t_2} \sum_{i=1}^n \frac{C_i}{(Ct)_i} \Delta t$$

$$FLD_{irr} = FLD_{HCl} + FLD_{HBr} + FLD_{HF} + FLD_{SO_2} + FLD_{NO_2} + FLD_{CH_2CHO} + FLD_{HCHO} + \Sigma FLD_x$$

$$F_{IN} = (F_{ICO} + F_{ICN} + F_{INOx} + FLD_{irr}) \times V_{CO_2} + FED_{Io}$$

SEMPLICI MODELLI INCENDIO

Evoluzione dell'incendio - fase di crescita

$$P_{incendio} = \frac{1000}{t_{\alpha}^2} \cdot t^2 (kW)$$

δ_{α}	Velocità caratteristica prevalente di crescita dell'incendio t_{α} [s]	Esempi
1	600 Lenta	Materiali poco combustibili distribuiti in modo discontinuo o inseriti in contenitori non combustibili
2	300 Media	Scatole di cartone impilate, pallets di legno, libri ordinati su scaffale, mobili in legno, materiali classificati per reazione al fuoco (capitolo 5)
3	150 Rapida	Materiali plastici impilati, prodotti tessili sintetici, apparecchiature elettroniche, automobili, materiali combustibili non classificati per reazione al fuoco
4	75 Ultra-rapida	Liquidi infiammabili, materiali plastici cellulari o espansi, schiume combustibili

Tabella 3-2: Velocità caratteristica prevalente di crescita dell'incendio

SEMPLICI MODELLI INCENDIO

Dalla potenza alla generazione dei fumi

$$P_{incendio} = \frac{1000}{t_{\alpha}^2} \cdot t^2 = \dot{W} \cdot C_p \cdot (T_{fumi} - T_{amb})$$

$$\dot{W} = \frac{\frac{1000}{t_{\alpha}^2} \cdot t^2}{C_p \cdot (T_{fumi} - T_{amb})}$$

Grazie

Ing. Alessandro Leonardi
Rappresentante presso il CTR deroghe e Dlgs 105/15 del Lazio
Ordine degli ingegneri della Provincia di Roma
E-mail: alessandro.leonardi@stilweb.com
Tel. +39065916750

In collaborazione con

Organizzato da



13/05/2016

