

# **Modulo 2**

## **FISICA E CHIMICA DELL'INCENDIO**



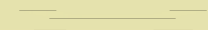
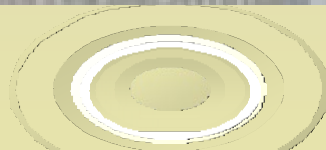
### **Lezione 2.1**

**Generalità sulla combustione e sostanze pericolose**

# **L' incendio e Generalità sulla Combustione**

## **Obiettivi del modulo**

- Spiegare l'origine e i pericoli del fuoco**
- Nominare e distinguere le diverse classi d'incendio**
- Scegliere il migliore mezzo d'estinzione**
- Spiegare il principio d'estinzione**



# LA COMBUSTIONE

**La combustione è una reazione chimica molto rapida che si manifesta con elevato sviluppo di calore, emissione di luce, fumo, vapori e gas di combustione.**

**Essa avviene tra una sostanza combustibile (che può essere solida, liquida o gassosa) ed una sostanza comburente, solo quando queste sostanze sono combinate tra loro in appropriate proporzioni ed opportunatamente innescate.**

**La combustione è una reazione di ossidazione in cui il combustibile rappresenta la sostanza ossidabile e il comburente (generalmente l'ossigeno dell'aria) la sostanza ossidante.**



INCENDIO

=

**OSSIDAZIONE RAPIDA**

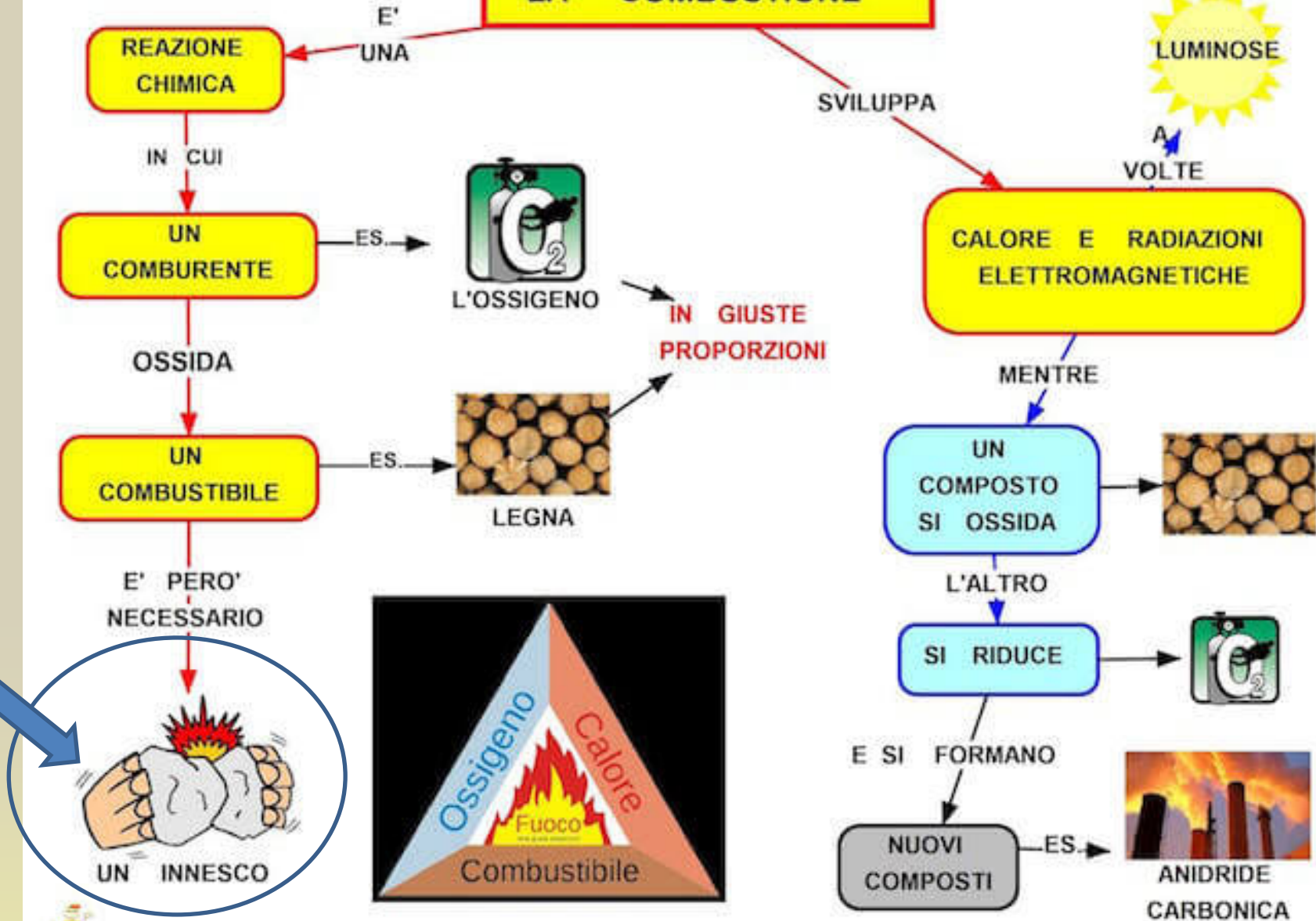
SVILUPPATA

dal PROCESSO CHIMICO tra

**COMBUSTIBILE** e **COMBURENTE**

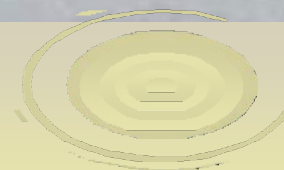
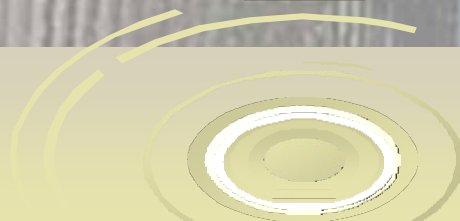
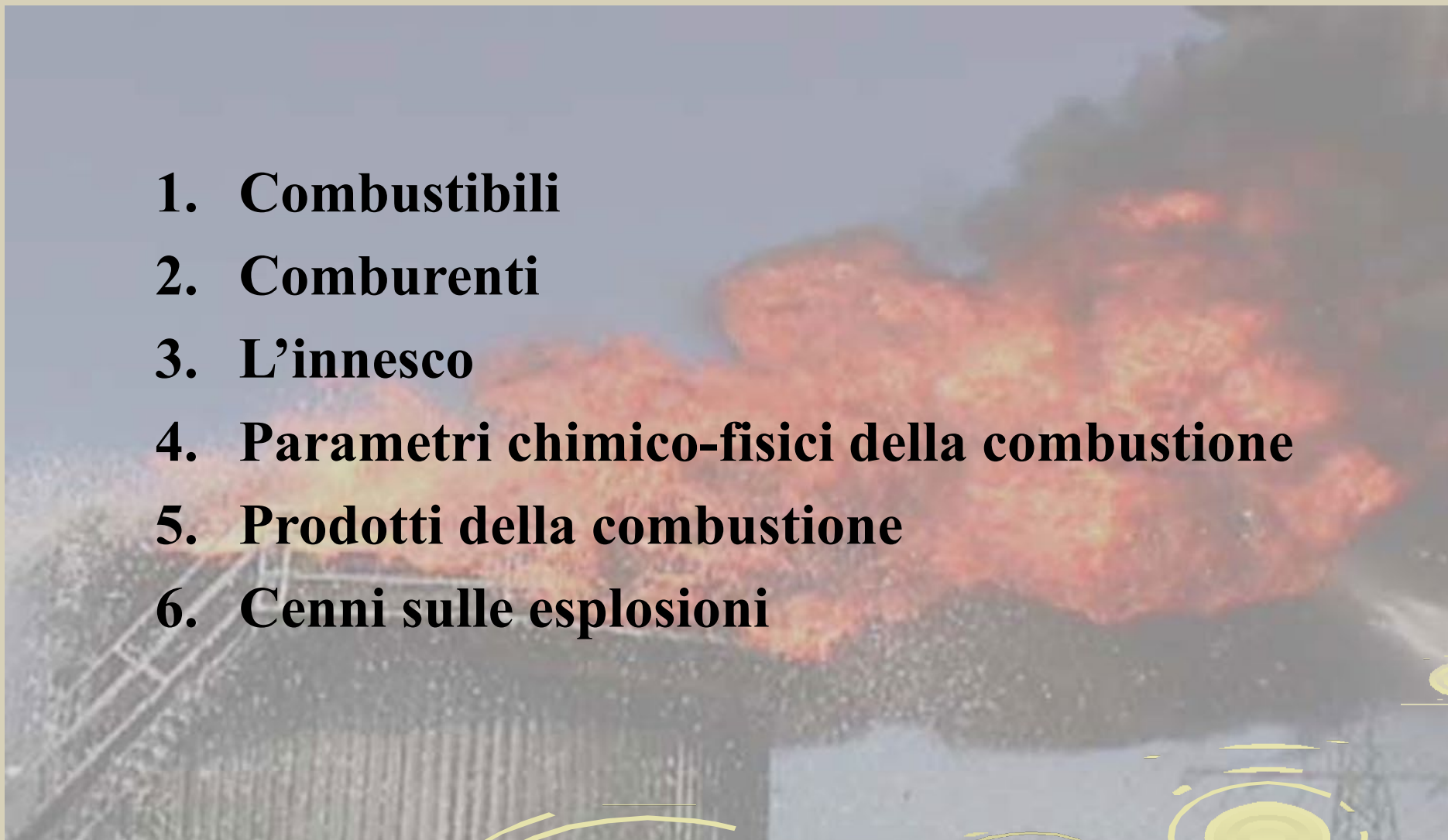


# LA COMBUSTIONE



# ARGOMENTI TRATTATI OGGI

1. **Combustibili**
2. **Comburenti**
3. **L'innesco**
4. **Parametri chimico-fisici della combustione**
5. **Prodotti della combustione**
6. **Cenni sulle esplosioni**



# IL COMBUSTIBILE





- ⌚ Il combustibile è qualsiasi materiale atto a bruciare come il legno, carbone, petrolio, ecc.

# IL COMBUSTIBILE

Il **combustibile** è una sostanza (**solida, liquida o gassosa**) che si trasforma durante l'incendio e nella cui composizione molecolare sono presenti elementi quali il carbonio, l'idrogeno, lo zolfo, etc.

**possono trovarsi:**

*stato solido* 

*stato liquido* 

*stato gassoso* 

**possono essere:**

*naturali* → se utilizzati così come si trovano in natura

*derivati* → se sottoposti a particolari trattamenti

COMBUSTIBILI SOLIDI			
<i>Naturali</i>	Carbon fossili (torba, lignite, litantrace, antracite) Legna	<i>Derivati</i>	Coke (di carbon fossile) Carbone di legna Agglomerati vari
COMBUSTIBILI LIQUIDI			
<i>Naturali</i>	Petrolio greggio	<i>Derivati</i>	Benzine di distillazione, gasolio, olio diesel, olio combustibile
COMBUSTIBILI GASSOSI			
<i>Naturali</i>	Gas naturale (metano, butano, ecc.)	<i>Derivati</i>	Gas di città e di cokeria, gas di generatori, gas di raffineria, acetilene, idrogeno



# COMBUSTIBILI SOLIDI

## fattori che influenzano la combustione dei combustibili solidi

### Natura del combustibile

Composizione elementare	Legno	Carbone
Carbonio	48-52%	60-92%
Ossigeno	41-45%	2-20%
Idrogeno	6-7%	3-9%

### Pezzatura e forma del materiale



### Modalità di stoccaggio



**La modalità di combustione differisce in funzione dello stato fisico di aggregazione del combustibile**

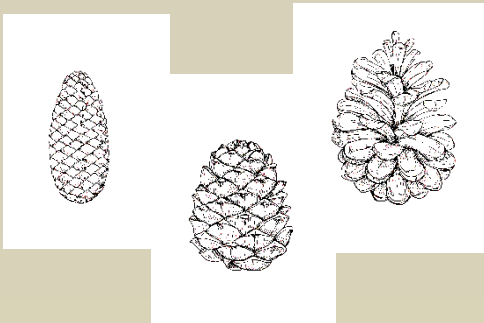




# COMBUSTIBILI SOLIDI

## fattori che influenzano la combustione dei combustibili solidi

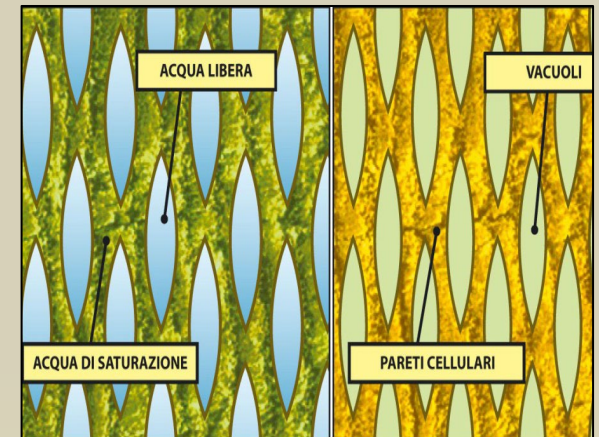
### Porosità



### Ventilazione



### Umidità



La modalità di combustione differisce in funzione dello stato fisico di aggregazione del combustibile



# COMBUSTIBILI SOLIDI

## Un caso particolare: le polveri

Le polveri finemente disperse in aria hanno un **elevato rapporto superficie di contatto / volume**.

Per via di tale caratteristica, **in concentrazione e granulometria adeguate, esibiscono un comportamento per certi versi simile ai gas.**

- La loro energia di innesco è molto bassa
- Per esse si definisce un campo di infiammabilità
- Possono dare luogo a reazioni esplosive



### Esempi di polveri combustibili

alluminio

ferro

silicio

resine epossidiche

PVC

farine di pesce

farine di cereali

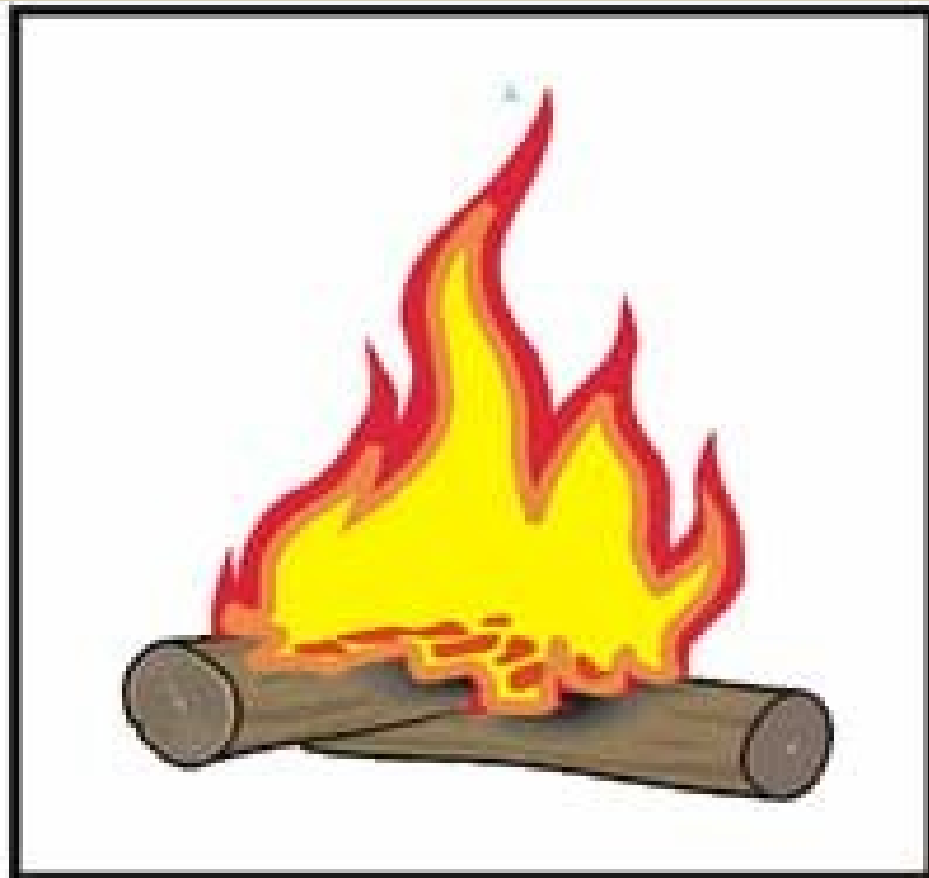
amido di mais

caffè

latte in polvere



# COMBUSTIBILI SOLIDI



Combustibili solidi:

🕒 da 500 a 800 C°



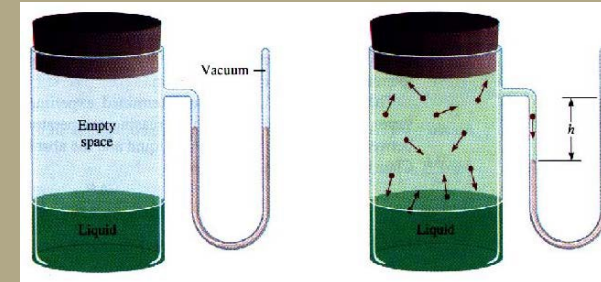


# COMBUSTIBILI LIQUIDI

**Un liquido infiammabile non brucia come tale ma bruciano i suoi vapori**

## Tensione di vapore

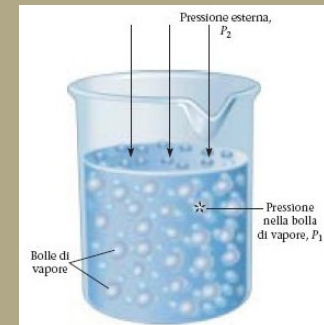
Si dice *tensione di vapore* (o pressione di vapore saturo) la pressione che si stabilisce nella condizione di equilibrio tra la fase liquida e la fase gassosa alla temperatura costante  $T$ .



La tensione di vapore fornisce una indicazione sulla volatilità della sostanza, infatti più la tensione di vapore è grande più la sostanza evapora con facilità.

## Temperatura di ebollizione

La *temperatura di ebollizione* (o punto di ebollizione) è quella temperatura alla quale la tensione di vapore del liquido eguaglia la pressione atmosferica (1 atm).



La temperatura di ebollizione costituisce un indice della volatilità della sostanza. Tanto più alto è il suo valore tanto minore è la tendenza di quest'ultima a passare allo stato aeriforme.



# COMBUSTIBILI LIQUIDI

**Classificazione dei liquidi infiammabili  
in funzione del punto di infiammabilità**

- Categoria A**      liquidi con punto di infiammabilità inferiore a 21 °C  
**Categoria B**      liquidi con punto d'infiammabilità tra 21°C e 65°C  
**Categoria C**      liquidi con punto d'infiammabilità tra 65°C e 125°C

COMBUSTIBILE	Temperatura di infiammabilità [°C]	Categoria
gasolio	65	C
acetone	-18	A
benzina	-20	A
alcool metilico	11	A
alcool etilico	13	A
toluolo	4	A
olio lubrificante	149	C



# COMBUSTIBILI LIQUIDI

Per valutare la «pericolosità» di un combustibile liquido occorre conoscere tutte le sue proprietà pertinenti: *tensione di vapore*, *volatilità*, *densità di vapore*, *intervallo di infiammabilità*, *punto di infiammabilità* e *punto di combustione*.

## Scheda tecnica di sicurezza di una benzina

### Punto 9 “Proprietà chimico – fisiche”

9. PROPRIETÀ CHIMICO - FISICHE		
Aspetto:	liquido limpido	
Colore doganale:	verde	
Odore:	pungente	
Densità a 15°C, kg/m <sup>3</sup> : max	725 - 780	ASTM D 1298
Tensione di vapore a 37,8°C, kPA	35-90	ASTM D 4953
Viscosità a 20°C, mm <sup>2</sup> /s:	0,5 - 1,5	ASTM D 445
Punto inizio distillazione, °C	25 max	ASTM D 86
Punto di infiammabilità	< - 40	ASTM D 56
Temperatura di autoaccensione, °C	> 200	DIN 51794
Limiti di esplosività, % Vol.	INF. 1,4 % SUP. 7,6 %	
Solubilità in acqua	non solubile	
pH	non applicabile	
Coefficiente di ripartizione n-ottano/acqua	2 - 7	



# COMBUSTIBILI LIQUIDI

---

## Combustibili Liquidi

- Combustione ad alta efficienza
- Facilità di stoccaggio e trasporto
- Impatto ambientale in dipendenza del tipo di combustibile

La classificazione e nomenclatura dei combustibili liquidi è fatta sulla base delle:

- Caratteristiche chimico-fisiche (proprietà fisiche e composizione chimica)

# COMBUSTIBILI LIQUIDI



Combustibili liquidi :

🕒 da 1300 a 1600 °C



# COMBUSTIBILI GASSOSI

---

## Gas infiammabili

Il comportamento dei gas è uguale a quello dei liquidi infiammabili.

per i gas infiammabili esistono la:

- **temperatura di accensione**
- **limiti di infiammabilità**

**(non esiste la temperatura di infiammabilità per i gas in quanto è una proprietà dei liquidi)**



# COMBUSTIBILI GASSOSI

## Classificazione dei gas in base alla densità relativa rispetto all'aria

### **Gas leggero** → densità relativa rispetto all'aria $< 0.8$

È un gas con densità inferiore a quella dell'aria (a parità di pressione e temperatura). Quando liberato dal proprio contenitore, *tende a stratificare verso l'alto* (es.: idrogeno, metano).



### **Gas pesante** → densità relativa rispetto all'aria $> 0.8$

È un gas con densità superiore a quella dell'aria (a parità di pressione e temperatura). Quando liberato dal proprio contenitore, *tende a stratificare verso il basso* ed a permanere nella parte bassa dell'ambiente ovvero a penetrare in cunicoli od aperture praticate a livello del piano di calpestio. (es.: propano, n-butano, isobutano, loro miscele (GPL)).





# COMBUSTIBILI GASSOSI

## Stoccaggio dei gas

I combustibili gassosi sono generalmente conservati all'interno di recipienti atti ad impedirne la dispersione incontrollata nell'ambiente.

### Rischi

In caso di **rottura del contenitore o dei suoi dispositivi di sicurezza**, a causa delle repentino e violento efflusso di gas, questi vengono proiettati con violenza. Se i frammenti proiettati colpiscono altri contenitori innescano un processo a catena.







# COMBUSTIBILI GASSOSI

## Stoccaggio dei gas

I combustibili gassosi sono generalmente conservati all'interno di recipienti atti ad impedirne la dispersione incontrollata nell'ambiente.

### Modalità di stoccaggio

- lontano da sorgenti di calore e comunque da ambienti con  $T > 50^{\circ}\text{C}$
- lontano da agenti chimici e corrosivi
- tenere in posizione verticale ed assicurati alle pareti per evitarne il ribaltamento





# COMBUSTIBILI GASSOSI

## Stoccaggio dei gas

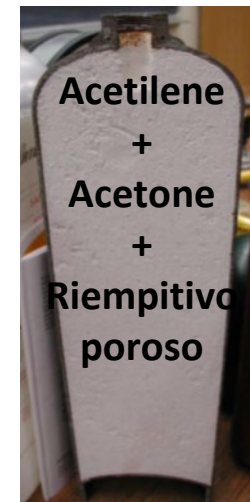
### Gas refrigerati

Gas conservati in fase liquida, in equilibrio con la fase vapore, mediante raffreddamento a temperature inferiori alla temperatura di equilibrio liquido-vapore a pressioni abbastanza modeste, vicine alla pressione atmosferica (es. azoto)



### Gas disciolti

Gas conservati in fase gassosa disciolti in un solvente liquido ad una determinata pressione (es.: acetilene, particolarmente reattivo, disciolto in acetone o in una massa porosa che occupa l'intero volume del contenitore)



# COMBUSTIBILI GASSOSI



Combustibili gassosi:

🕒 da 1600 a 3000 °C

# IL COMBURENTE

IL COMBURENTE È LA SOSTANZA CHE PERMETTE AL COMBUSTIBILE DI BRUCIARE. GENERALMENTE SI TRATTA DELL'OSSIGENO CONTENUTO NELL'ARIA ALLO STATO DI GAS.

TALE GAS È IL RISULTATO DELLA SINTESI BIOLOGICA DEL CARBONIO E DELL'IDROGENO SOTTRATTI APPUNTO DALLA CONDIZIONE DI “**OSSIDI**”

# IL COMBURENTE

---

## Comburenti più comuni

- a) **Ossigeno, da solo o in miscele (es. aria)**
- b) Perossido di idrogeno
- c) Alogeni (Cloro, fluoro...)
- a) Acido nitrico e acido solforico concentrati
- b) Ossidi di metalli pesanti
- a) Nitrati, clorati, perclorati e perossidi

# IL COMBURENTE

---



🕒 L'aria che respiriamo è composta dal 78% di azoto, 21% di ossigeno, 1% di altri gas.

🕒 Quindi il comburente è costituito dall'ossigeno presente nell'aria.

L'unione dell'ossigeno e dei combustibili determina la condizione di base, che consente il processo della combustione.

# L'INNESCO

**L'INNESCO E' L'ELEMENTO CHE A CONTATTO CON LA MISCELA INFIAMMABILE,AVVIA LA COMBUSTIONE**

**ESSO PUO' ESSERE COSTITUITO DA QUALSIASI SORGENTE DI CALORE (FIAMME,SCINTILLE,MATERIALI CALDI) CHE ABBIA I SEGUENTI REQUISITI:**

**TEMPERATURA UGUALE O SUPERIORE A QUELLA DI ACCENSIONE DELLA MISCELA**

- 1) APPORTO DI ENERGIA CALORIFICA**
- 2) DURATA NEL TEMPO DEL CONTATTO**

**IL VOLUME DEL CORPO COMBUSTIBILE DETERMINA LA FACILITÀ DI ACCENSIONE. IL CAMINETTO INIZIA LA SUA ACCENSIONE CON PICCOLI ELEMENTI DI COMBUSTIBILE (CARTA E FUSCELLI) PER PASSARE SOLO SUCCESSIVAMENTE A CIOCCHI DI LEGNO DURO.**

# L'INNESCO

l'accensione di una MISCELA COMBUSTIBILE, si verifica solo se un volume di questa, viene riscaldato sufficientemente per iniziare la reazione di combustione che provoca la propagazione della fiamma.

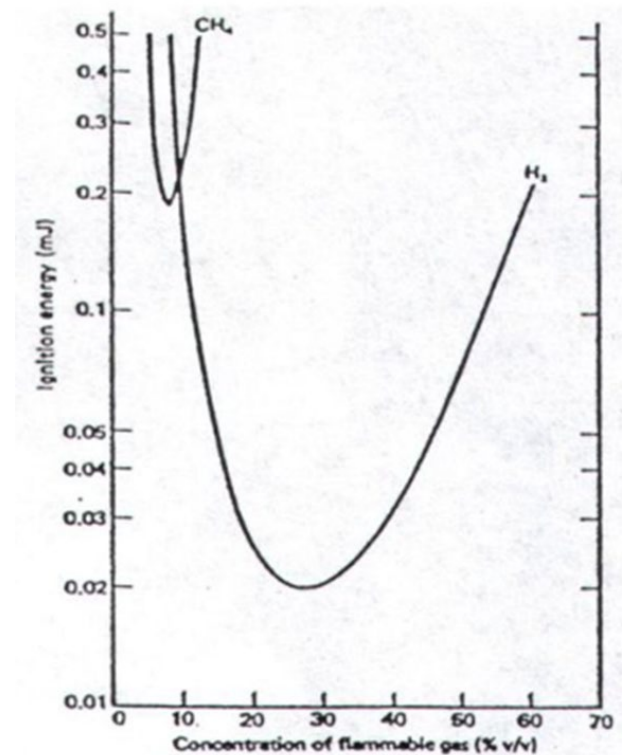
## Energia di ignizione [mJ]

Energia richiesta per innescare una assegnata miscela combustibile-comburente di assegnata composizione.

Essa dipende almeno da:

- Specifica miscela combustibile-comburente;
- Composizione della miscela combustibile-comburente.

L'energia di accensione deve consentire che almeno una parte di miscela si porti alla temperatura di auto-ignizione.





# L'INNESCO

Sorgenti di innesco (anche dette fonti di innesco, fonti di ignizione ecc.)



**Accensione diretta**



**Accensione indiretta**



**Attrito**



**Auto-combustione**

# L'INNESCO

## Accensione diretta



Quando una fonte di energia (fiamma, scintilla etc.) entra in contatto diretto con un combustibile in presenza di comburente.

**Esempi:** operazioni di taglio e saldatura, fiammiferi e mozziconi di sigaretta, lampade e resistenze elettriche, stufe elettriche, scariche elettrostatiche

## Accensione indiretta



Quando l'energia richiesta per l'innescò viene trasportata per conduzione, convezione, irraggiamento.

**Esempi:** elementi metallici strutturali dell'edificio (conduzione); termosifoni (convezione); stufe a infrarossi e alogene (irraggiamento)

# L'INNESCO

## Attrito



L'energia meccanica viene dissipata in calore, con conseguente possibilità di riscaldamenti locali che costituiscano sorgente di innesco.

L'energia richiesta per l'innesco è costituita dall'energia dissipata nello sfregamento tra due superfici in assenza di idonea lubrificazione.

**Esempi:** malfunzionamento di parti meccaniche rotanti quali cuscinetti, motori; urti; rottura violenta di materiali metallici.

# L'INNESCO

## Auto - Combustione



Quando l'energia richiesta per l'innesco viene prodotta dallo stesso combustibile.

**Nota:** deve essere già in corso un processo esotermico (lenti processi di ossidazione, decomposizioni esotermiche in assenza d'aria, reazioni microbiologiche, reazioni chimiche esotermiche in genere).

**Esempi:** cumuli di carbone, stracci o segatura imbevuti di olio di lino, polveri di ferro o nichel, fermentazioni vegetali



# CAUSE DEGLI INCENDI

## CAUSE PIU' FREQUENTI DI INNESCO

**INNESCO** : fonte di calore che abbia sufficientemente energia ad una temperatura superiore a quella di accensione.

### **1) FIAMME:**

Fiamme libere

Fornelli

Saldatrici elettriche o a gas

Sigarette, accendini o fiammiferi

### **2) SCINTILLE:**

Elettricità statica

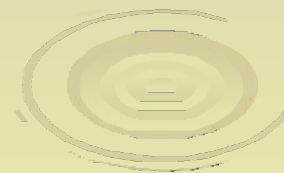
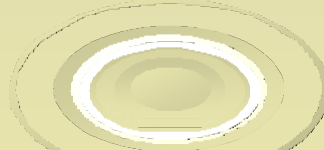
Archi e scintille elettriche di varia natura

Scariche atmosferiche e fenomeni indotti

Scintille da sfregamento o urto

Scintille di motori a scoppio

Scintille o proiezioni di materiale incandescente da operazioni di taglio o saldatura



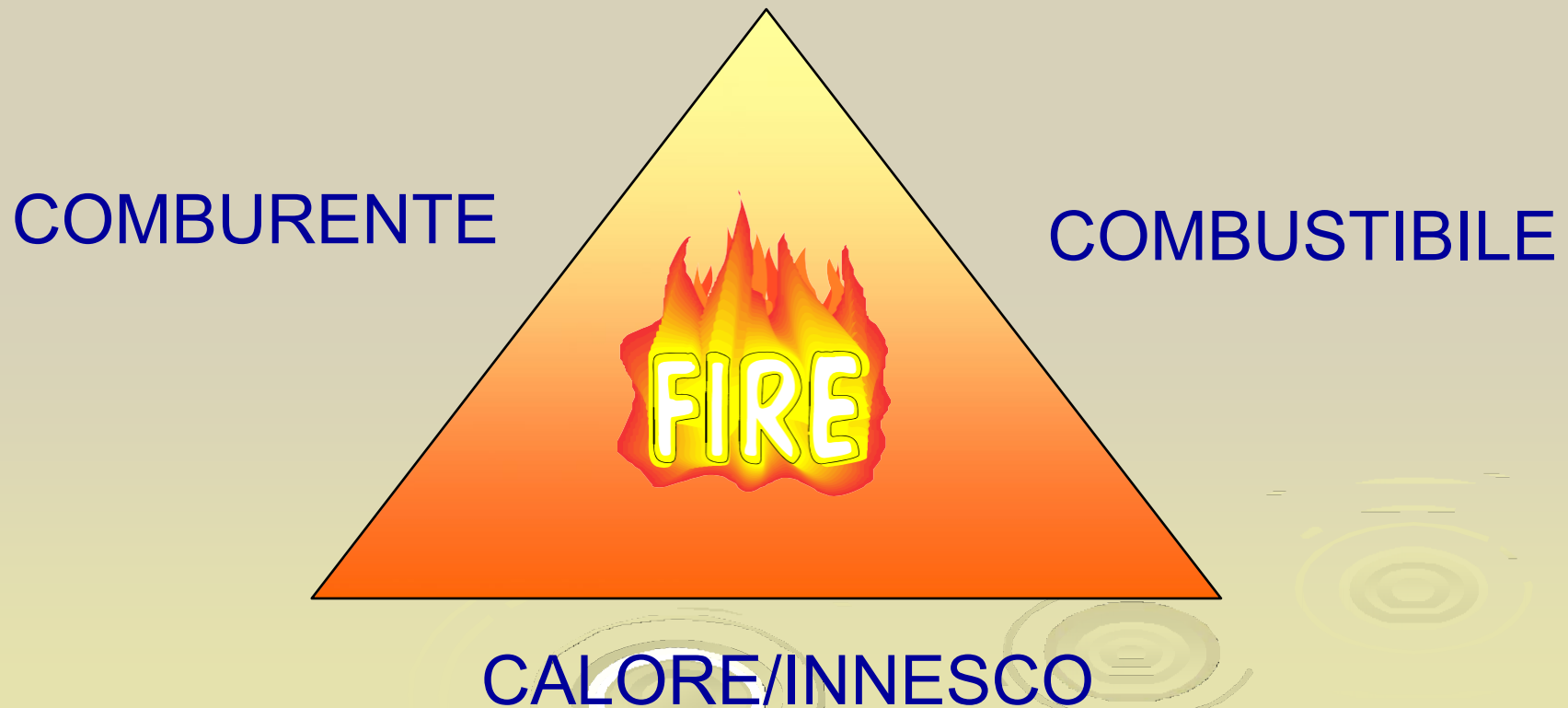
# PAUSA



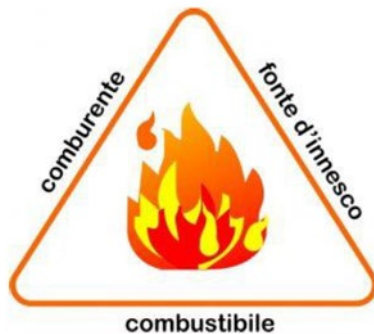
Adobe Stock | #76180362



Il fenomeno della combustione viene generalmente rappresentato con l'immagine del **TRIANGOLO DEL FUOCO**, un triangolo i cui lati sono rispettivamente il combustibile, il comburente e il calore.



# IL TRIANGOLO DEL FUOCO



Affinché una combustione possa avere inizio è necessario che siano presenti **tre elementi: combustibile, comburente e energia di attivazione.**

Occorre che si verifichi il fenomeno dell'**autocatalisi** che consente la propagazione della reazione di combustione senza apporto di energia dall'esterno, sfruttando il calore prodotto dalla combustione stessa.



## AUTOCATALISI:

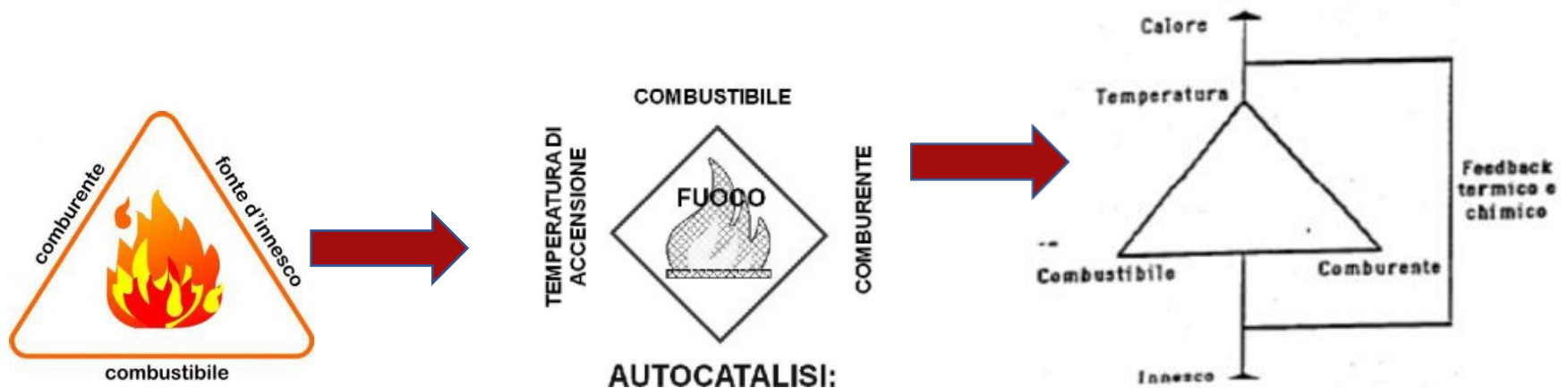
autoalimentazione della combustione, nonostante venga a cessare l'innescò esterno il combustibile continua a reagire con il comburente.



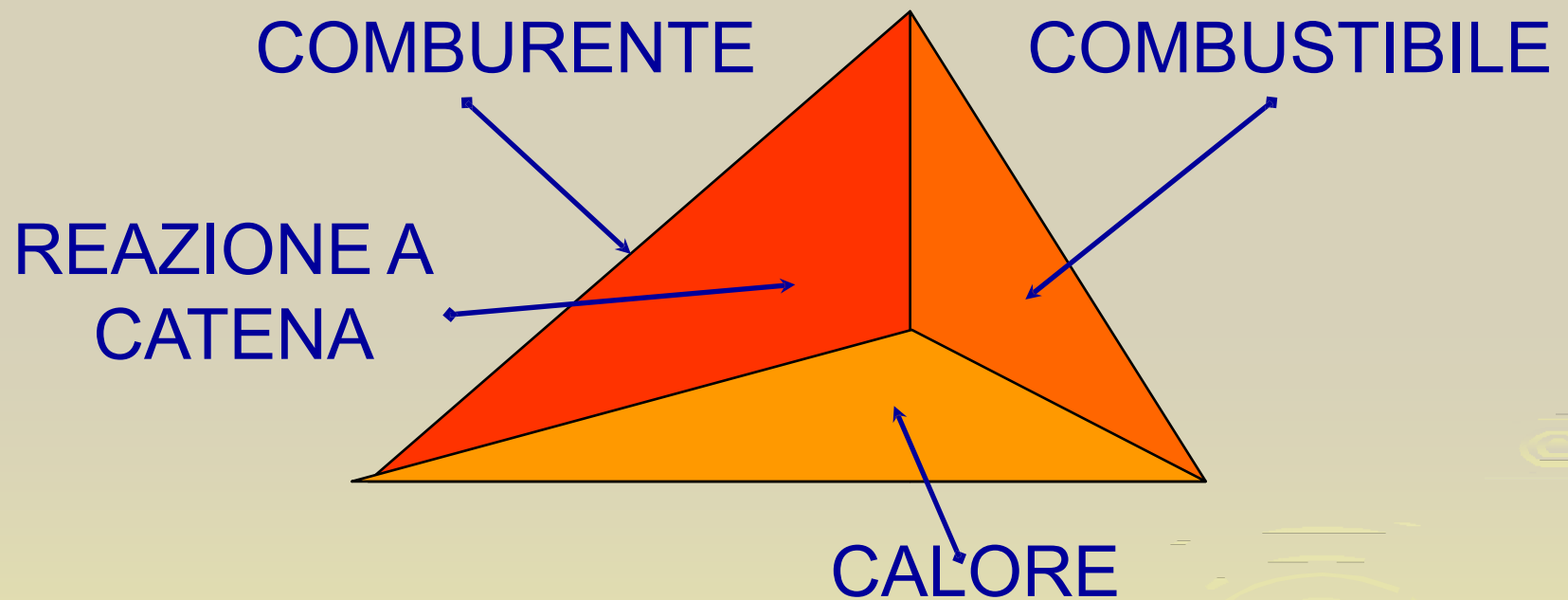
# IL TRIANGOLO DEL FUOCO

Il **triangolo del fuoco** rappresenta solo la **condizione necessaria** affinché possa avere luogo una combustione, perché la sua **evoluzione futura** dipende da un ulteriore fattore che è il **bilancio termico**.

Se il calore sottratto all'incendio è maggiore di quello con cui viene prodotto dalla reazione di combustione, il sistema si raffredda e si spegnerà viceversa il sistema divamperà.



Quindi in realtà, sarebbe più opportuno parlare di TETRAEDRO del fuoco, in quanto, oltre ai tre già noti (combustibile, comburente e calore) è necessario un quarto elemento perché si verifichi e si mantenga una combustione: l'autocatalisi, ovvero una reazione a catena provocata dalla formazione o liberazione di gruppi atomici chimicamente attivi, chiamati radicali.

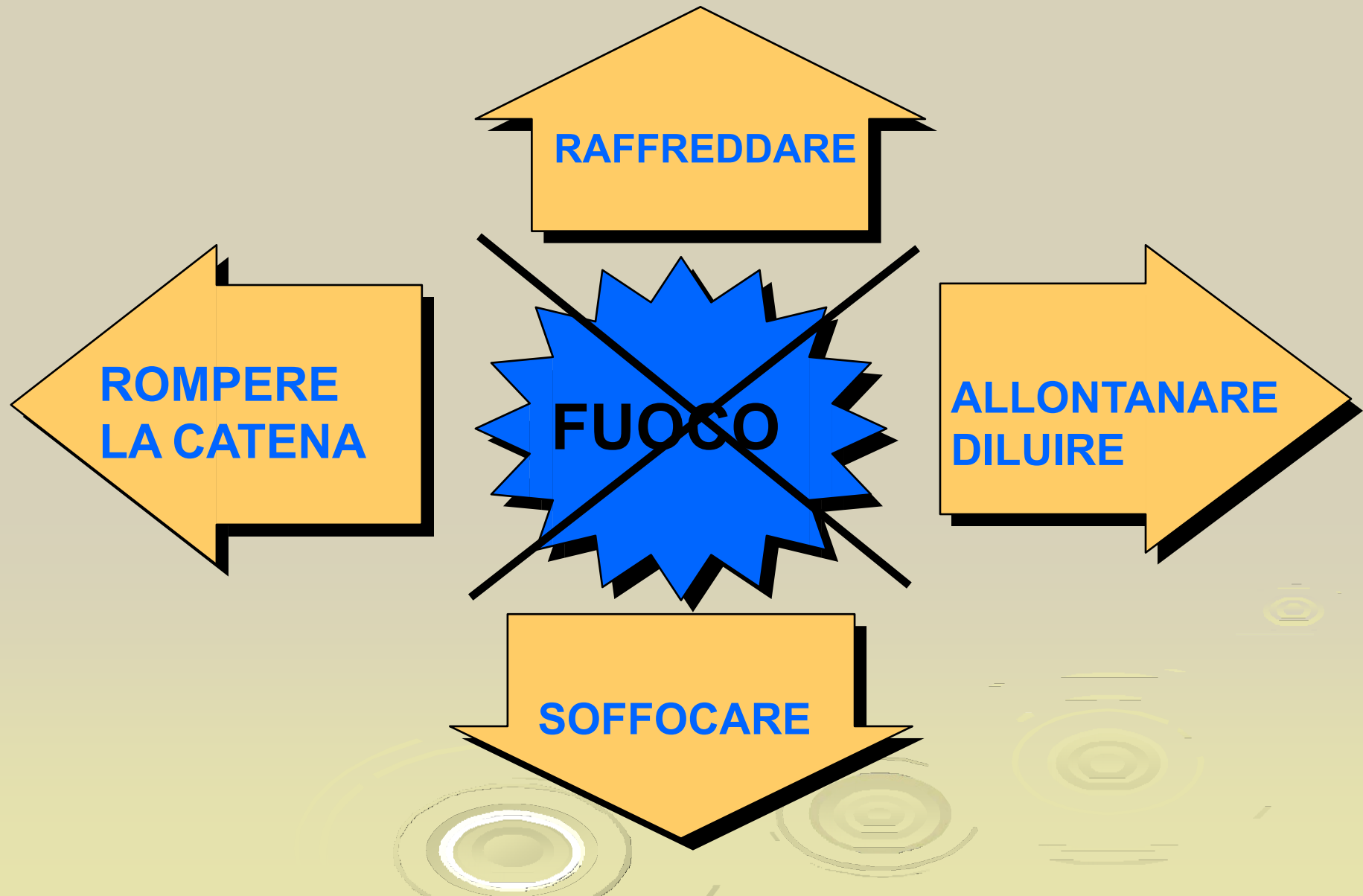


**La COMBUSTIONE dà come risultato il FUOCO.**

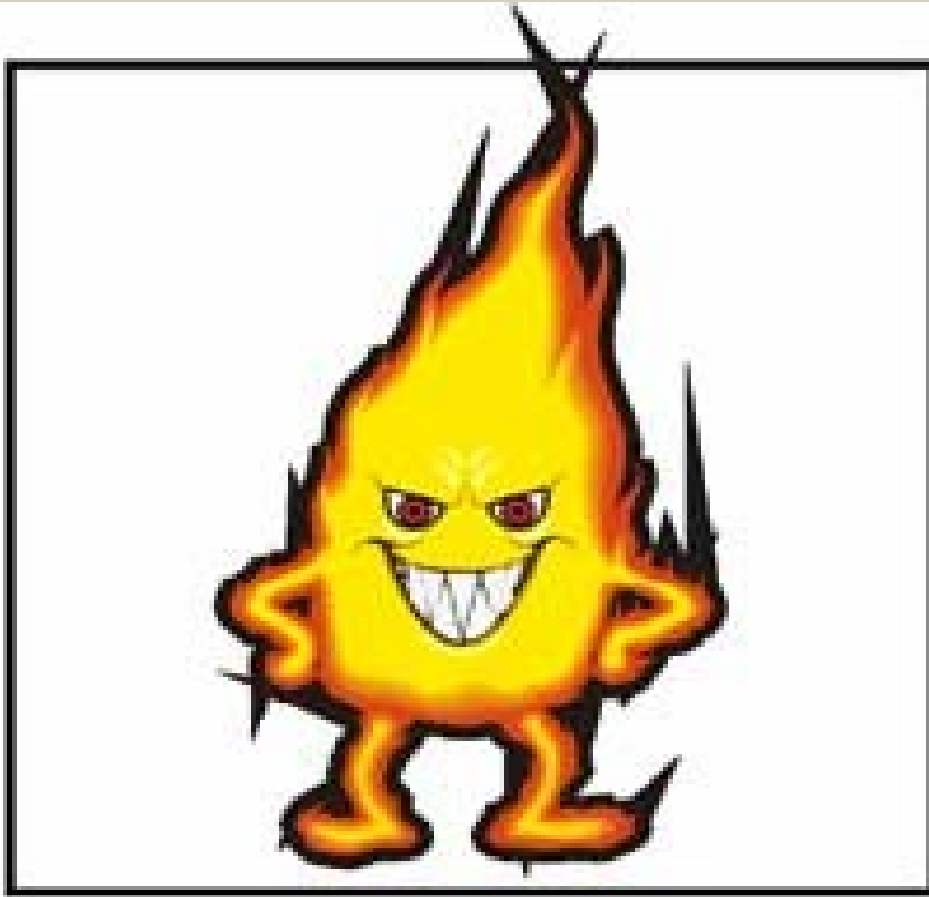
# LA COMBUSTIONE



# LA COMBUSTIONE



# ELEMENTI FISICI DELLA COMBUSTIONE



- ⌚ La fiamma è la violenta manifestazione di una reazione chimica fra un combustibile e l'ossigeno dell'aria (comburente), con sviluppo simultaneo di **calore e luce**.

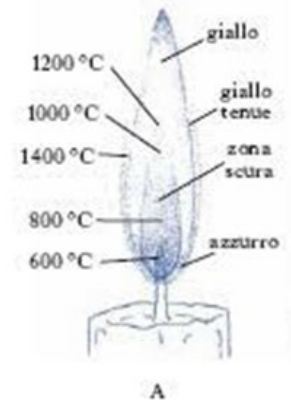
# ELEMENTI FISICI DELLA COMBUSTIONE

## Fiamme a diffusione

Il **combustibile** e il **comburente** sono **separati** e la fiamma si può formare solo all'interfaccia dei due composti, dove sono presenti sia il combustibile sia il comburente e verso cui entrambi i composti diffondono.



fiamma di candela 1400°C



zone di combustione nella candela

## Fiamme premiscelate

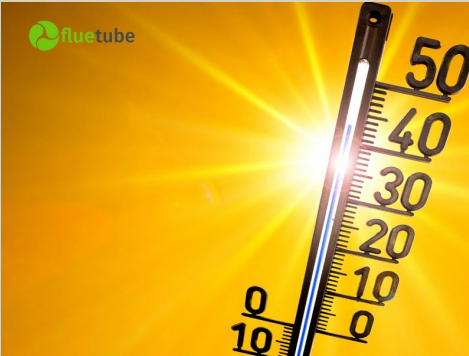
Il **combustibile** e il **comburente** sono **completamente miscelati** e la fiamma si propaga all'interno della miscela



becco bunsen



# PARAMETRI CHIMICO - FISICI COMBUSTIONE



- Temperatura di infiammabilità

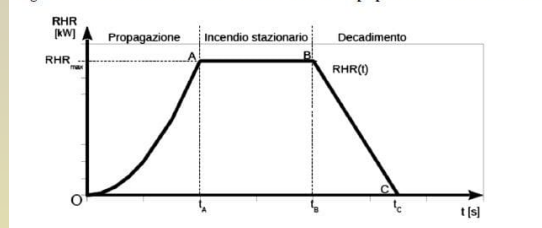


- Temperatura di auto-ignizione

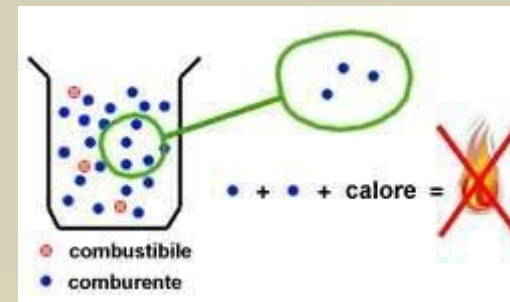


- Potere calorifico

Figura 5.7 - Tasso di rilascio termico in funzione del tempo per le varie fasi dell'incendio



- RHR vs t



- Limiti di infiammabilità



# PARAMETRI CHIMICO - FISICI COMBUSTIONE

---

## Parametri indicativi della “propensione” alla combustione

- Temperatura di infiammabilità
- Temperatura di auto-ignizione
- Aria teorica di combustione
- Limiti di infiammabilità

## Parametri descrittivi di effetti della combustione

- Potere calorifico
- RHR vs.  $t$
- Temperatura teorica di combustione

# **TEMPERATURA DI INFIAMMABILITÀ**

LA TEMPERATURA DI INFIAMMABILITÀ È, NEL CAMPO COMPRESO TRA I VALORI NORMALI DI AMBIENTE E QUELLO DI ACCENSIONE, LA MINIMA TEMPERATURA ALLA QUALE IL COMBUSTIBILE LIBERA IN ARIA VAPORI AD UNA CONCENTRAZIONE TALE DA FORMARE UNA MISCELA INCENDIABILE.

OLTRE TALE VALORE LA POSSIBILITÀ DI INNESCO NON SI LIMITA ALLE SOLE IMMEDIATE VICINANZE DEL COMBUSTIBILE POTENDOSI ESTENDERE ALL'INTERO SPAZIO INTERESSATO DALLA PRESENZA DEL COMBUSTIBILE STESSO E DEI SUOI VAPORI.

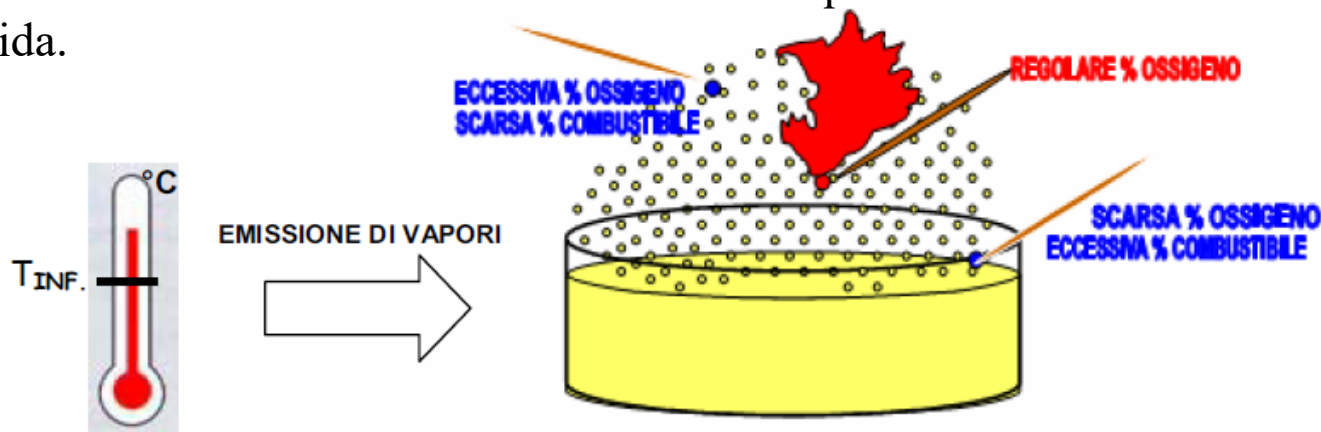
# PARAMETRI CHIMICO - FISICI COMBUSTIONE

## Temperatura di infiammabilità (*flash point*)

La **temperatura di infiammabilità (*flash point*)** è la **più bassa temperatura** alla quale **un combustibile liquido emette vapori** sufficienti a formare con l'aria una miscela che, **se innescata**, brucia spontaneamente.

Ne consegue che il *flash point* :

- sia la massima temperatura alla quale un combustibile liquido può essere trattato senza rischi di incendio;
- è un indice della volatilità del combustibile liquido / della miscela combustibile liquida.



Temperatura di infiammabilità è un parametro tipico dei liquidi combustibili

# PARAMETRI CHIMICO - FISICI COMBUSTIONE

In funzione della temperatura di infiammabilità i liquidi combustibili vengono raggruppati in tre categorie:

(comburente: aria;  $P = 1 \text{ atm}$ )

Categoria A	$T_{\text{INF.}} < 21^{\circ}\text{C}$
Categoria B	$21^{\circ}\text{C} \leq T_{\text{INF.}} \leq 65^{\circ}\text{C}$
Categoria C	$65^{\circ}\text{C} < T_{\text{INF.}} \leq 125^{\circ}\text{C}$

SOSTANZE	Temperatura di Infiammabilità ( $^{\circ}\text{C}$ ) <i>Valori indicativi</i>
gasolio	65
acetone	-18
benzina	-20
alcool metilico	11
alcool etilico	13
toluolo	4
olio lubrificante	149

Particolarmente pericolosi sono quei **liquidi** che hanno una **temperatura di infiammabilità inferiore alla temperatura ambiente**, in quanto anche **senza subire alcun riscaldamento**, emettono quantità di vapori tali da dar luogo ad un incendio.

# TEMPERATURA DI ACCENSIONE

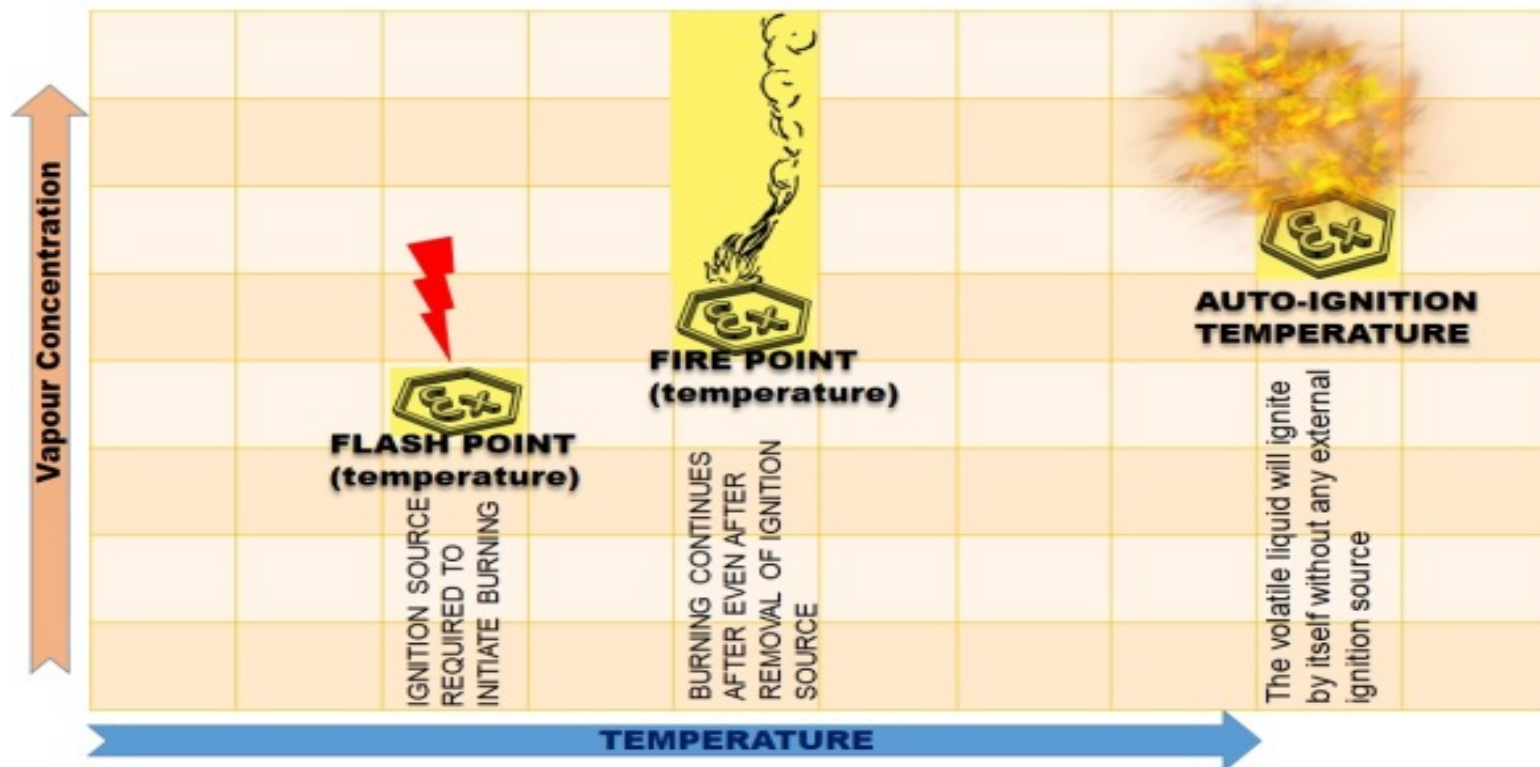
LA **TEMPERATURA DI ACCENSIONE** RAPPRESENTA LA TEMPERATURA MINIMA ALLA QUALE UN COMBUSTIBILE, IN PRESENZA D'ARIA BRUCIA **SENZA NECESSITÀ DI INNESCO**.

LA TEMPERATURA DI ACCENSIONE È MOLTO IMPORTANTE NEI **MOTORI DIESEL**. INFATTI, NON ESSENDO IN ESSI PRESENTE LA CANDELA (CHE NEI MOTORI A BENZINA DETERMINA L'INNESCO), VIENE PRIMA PREPARATA UNA QUANTITÀ SUFFICIENTE D'ARIA ALLA TEMPERATURA DI ACCENSIONE DEL COMBUSTIBILE, CHE VIENE QUINDI INIETTATO ALL'INTERNO DELLA CAMERA DI COMBUSTIONE DANDO LUOGO AD UNA ACCENSIONE PER AUTOINNESCO.

# PARAMETRI CHIMICO - FISICI COMBUSTIONE

## Temperatura di accensione (auto-accensione/auto-ignizione)

è la **minima temperatura** alla quale una miscela combustibile-comburente, di composizione compresa entro i *limiti di infiammabilità*, inizia spontaneamente a bruciare **SENZA SORGENTI ESTERNE** di innesco.



L'energia INTERNA del sistema è già sufficientemente alta (temperatura sufficientemente alta) per dare inizio alla combustione.

# PARAMETRI CHIMICO - FISICI COMBUSTIONE

## Temperatura di accensione (auto-accensione/auto-ignizione)

è la **minima temperatura** alla quale una miscela combustibile-comburente, di composizione compresa entro i *limiti di infiammabilità*, inizia spontaneamente a bruciare **SENZA SORGENTI ESTERNE** di innesco.

SOSTANZE	Temperatura di accensione (°C) <i>valori indicativi</i>
acetone	540
benzina	250
gasolio	220
idrogeno	560
alcool metilico	455
carta	230
legno	220-250
gomma sintetica	300
metano	537

	Flash Point [°C]	T Auto-igniz. [°C]
Metano	-188	537
Etano	-135	472
Propano	-104	470
Butano	-60	365
n-ottano	10	206
isottano	-12	418
n-cetano	135	205
Metanolo	11	385
Etanolo	12	365
Acetilene	Gas	305
Idrogeno	Gas	400



# PARAMETRI CHIMICO - FISICI COMBUSTIONE

## TEMPERATURA TEORICA DI COMBUSTIONE

LA TEMPERATURA TEORICA DI COMBUSTIONE È DETERMINATA DAL PIÙ ELEVATO VALORE DI TEMPERATURA CHE LA FIAMMA GENERATA DALLA COMBUSTIONE DI UNA DETERMINATA SOSTANZA PUÒ RAGGIUNGERE.

IL VALORE EFFETTIVO DELLA TEMPERATURA DI COMBUSTIONE DIPENDE DALLE MODALITÀ E DALL'AMBIENTE IN CUI TALE FENOMENO SI SVILUPPA (ALL'INTERNO DI UNA CALDAIA, IN UN LOCALE CHIUSO, IN UN LOCALE APERTO, A CIELO LIBERO, ETC.)

# PARAMETRI CHIMICO - FISICI COMBUSTIONE

## Aria teorica (o stechiometrica) di combustione

è la quantità di aria necessaria per raggiungere la **combustione completa** dell'unità di massa o di volume di un determinata quantità di combustibile solido, liquido o gassoso.

SOSTANZE	Aria teorica di combustione (Nm <sup>3</sup> /kg)
Legno	5
Carbone	8
Benzina	12
Alcool	7,5

**N.B.:** *Normal metro cubo (Nm<sup>3</sup>)* esprime il volume in metri cubi di aeriformi quando questi siano considerati in condizioni normali di pressione (1 atm) e di temperatura (0 °C)



Adobe Stock | #76180362

# **CAMPO E LIMITE DI INFIAMMABILITÀ**

**LA MISCELA COMBUSTIBILE-COMBURENTE (ALLO STATO GASSOSO) RISULTA INFIAMMABILE QUANDO VENGONO RISPETTATE DETERMINATE PROPORZIONI.**

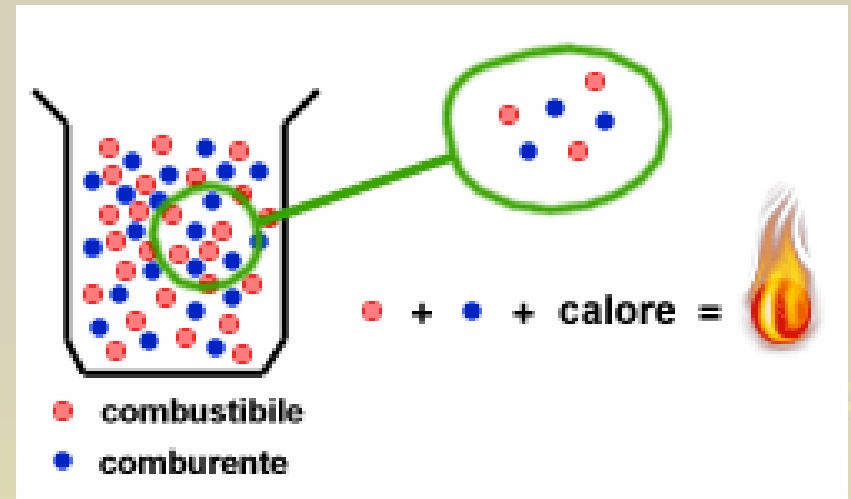
**PER OGNI SOSTANZA COMBUSTIBILE ESISTE UN CAMPO DI VALORI PERCENTUALI DI MISCELA CON L'ARIA (CHE SI CONSIDERA A PRESSIONE DI 1.000 mBAR E CONTENENTE OSSIGENO IN PERCENTUALE DEL 18%) PER I QUALI LA MISCELA RISULTA INFIAMMABILE. I VALORI LIMITE DEL CAMPO SONO DEFINITI **LIMITI DI INFIAMMABILITÀ SUPERIORE ED INFERIORE.****

**AL DI SOTTO OD AL DI SOPRA DI QUESTI LIMITI LA MISCELA RISULTA TROPPO POVERA RISPETTIVAMENTE DI GAS COMBUSTIBILE O DI COMBURENTE, PER CUI LA COMBUSTIONE NON PUÒ AVVENIRE. ALL'INTERNO DEL CAMPO DI INFIAMMABILITÀ LA VELOCITÀ DI COMBUSTIONE VARIA PARTENDO DA ZERO (LIMITE INFERIORE) E TORNANDO A ZERO (LIMITE SUPERIORE). LA VELOCITÀ DI COMBUSTIONE, NELLE CONDIZIONI DI PERCENTUALE OTTIMALE PUÒ ESSERE TANTO VELOCE DA GENERARE FENOMENI DI ESPLOSIONE.**

# CAMPO E LIMITE DI INFIAMMABILITÀ

- 🕒 *Immaginiamo una miscela gassosa formata da molecole di comburente (pallini scuri) e molecole di combustibile (pallini chiari): la reazione si sviluppa soltanto quando sono presenti contemporaneamente tre elementi cioè un pallino chiaro (combustibile), uno scuro (comburente) ed il calore.*

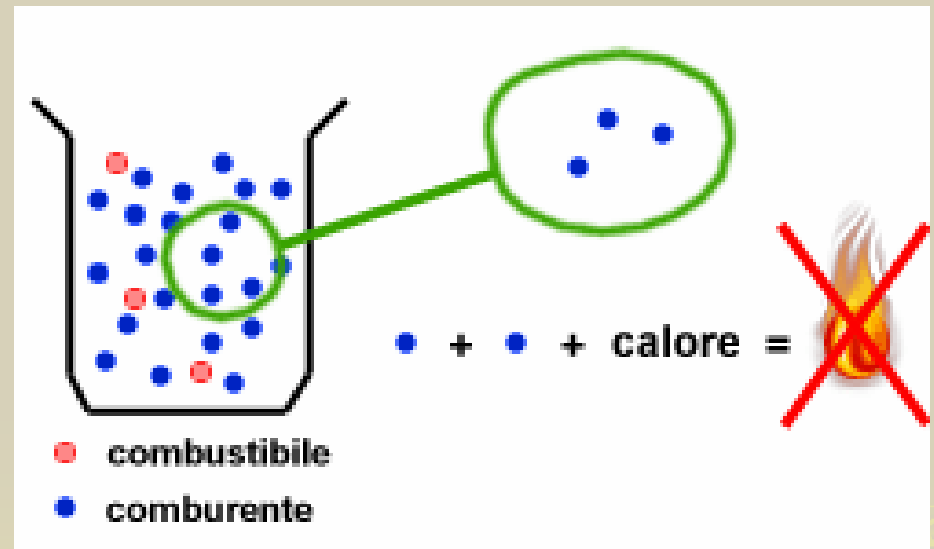
Appena un pallino chiaro ed uno scuro reagiscono tra di loro viene sviluppata una certa quantità di calore che viene trasferita immediatamente alle molecole vicine. Se nelle vicinanze ci sono altri due pallini, uno chiaro ed uno scuro, abbiamo tutto l'occorrente (combustibile, comburente e temperatura) affinché la reazione avvenga di nuovo e così via fino a coinvolgere tutte le molecole presenti.



# CAMPO E LIMITE DI INFIAMMABILITÀ

- 🕒 *Immaginiamo a questo punto che nel nostro recipiente ci siano più palline scure rispetto a quelle chiare, vale a dire, una quantità di combustibile minore di quella di aria.*

In tale eventualità può accadere che, quando il calore sprigionato dalle prime due palline - quella chiara e quella scura - viene trasferito alle palline adiacenti ha maggiore possibilità di trovare due palline scure piuttosto che una chiara ed una scura, cosicché uno dei requisiti necessari alla propagazione della combustione (la pallina chiara, cioè il combustibile) manca e la fiamma non si propaga.

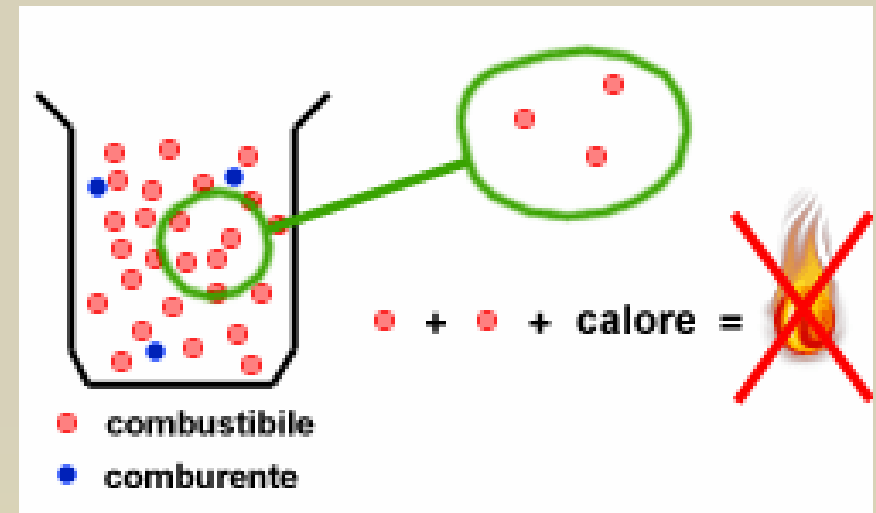


La concentrazione minima di palline chiare - cioè di carburante necessario affinché la combustione si propaghi (affinché, in altri termini, ogni trasferimento di calore trovi un sufficiente numero di molecole di combustibile vicino a quelle di comburente) - si definisce **limite inferiore di infiammabilità**.

# CAMPO E LIMITE DI INFIAMMABILITÀ

- Se invece nel nostro recipiente ci sono più palline chiare rispetto a quelle scure, cioè se la quantità di combustibile è superiore a quella di comburente, può accadere che il calore sprigionato dalle palline chiare e scure troverà con maggiore probabilità due palline, in questo caso chiare.

Anche in questa situazione la triade necessaria affinché la reazione avvenga non è soddisfatta: manca infatti la pallina scura e la combustione non avviene.

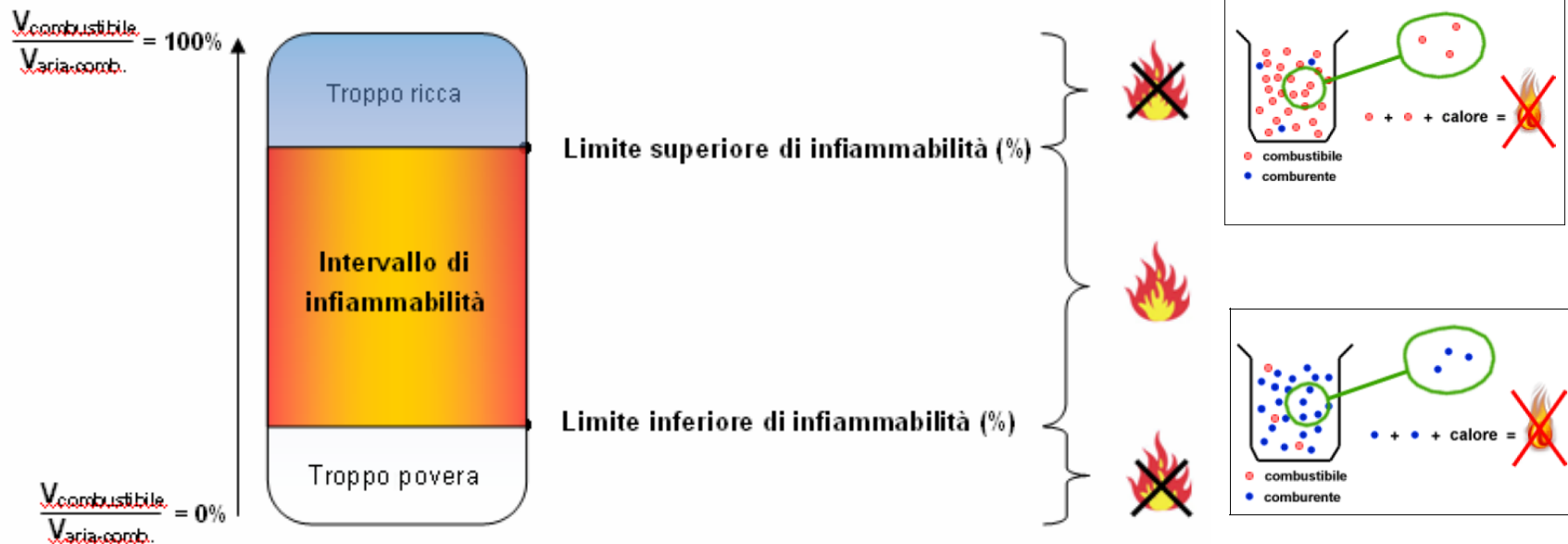


- La concentrazione massima di combustibile oltre la quale la fiamma non si propaga si definisce **limite superiore di infiammabilità**.

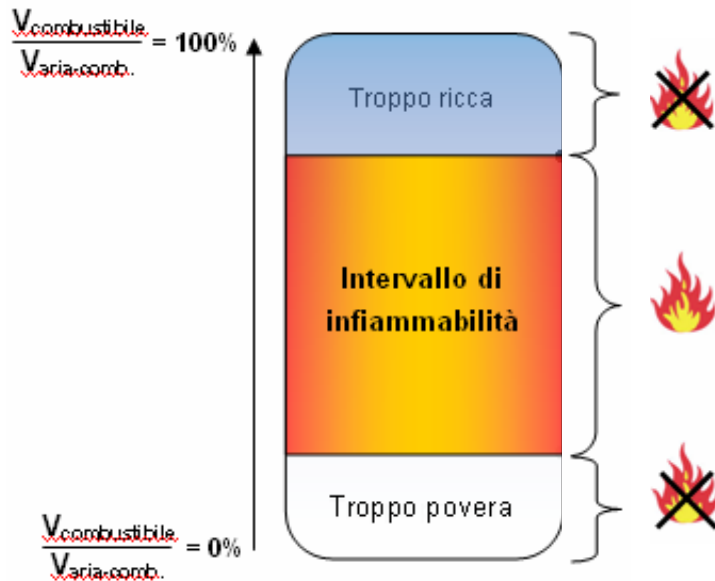


# CAMPO E LIMITE DI INFIAMMABILITÀ

Affinché la combustione abbia inizio e si propaghi a tutta la miscela, risulta necessario che il rapporto tra combustibile e comburente sia compreso entro certi limiti, noti appunto come **limiti di infiammabilità**.



# CAMPO E LIMITE DI INFIAMMABILITÀ



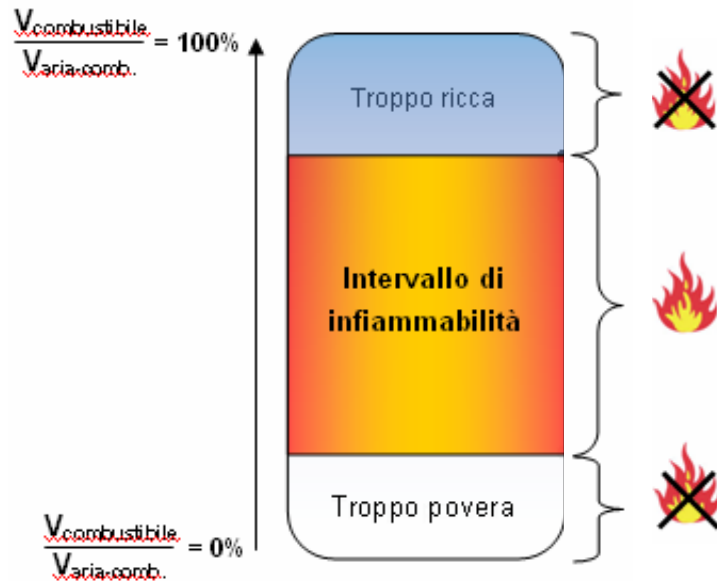
## ***Limite superiore di infiammabilità (UFL)***

Massima concentrazione di combustibile, in fase gas, nella miscela combustibile-comburente per la quale si ha una combustione in grado di propagarsi a tutta la miscela.

## ***Limite inferiore di infiammabilità (LFL)***

Minima concentrazione di combustibile, in fase gas, nella miscela combustibile-comburente per la quale si ha una combustione in grado di propagarsi a tutta la miscela.

# CAMPO E LIMITE DI INFIAMMABILITÀ



*In entrambi i casi la combustione può avvenire:*

- a seguito di innesco di opportuna energia, se la temperatura della miscela è inferiore alla temperatura di auto-ignizione del combustibile;
- anche in assenza di innesco, se la temperatura della miscela è superiore alla temperatura di auto-ignizione del combustibile.

# CAMPO E LIMITE DI INFIAMMABILITÀ

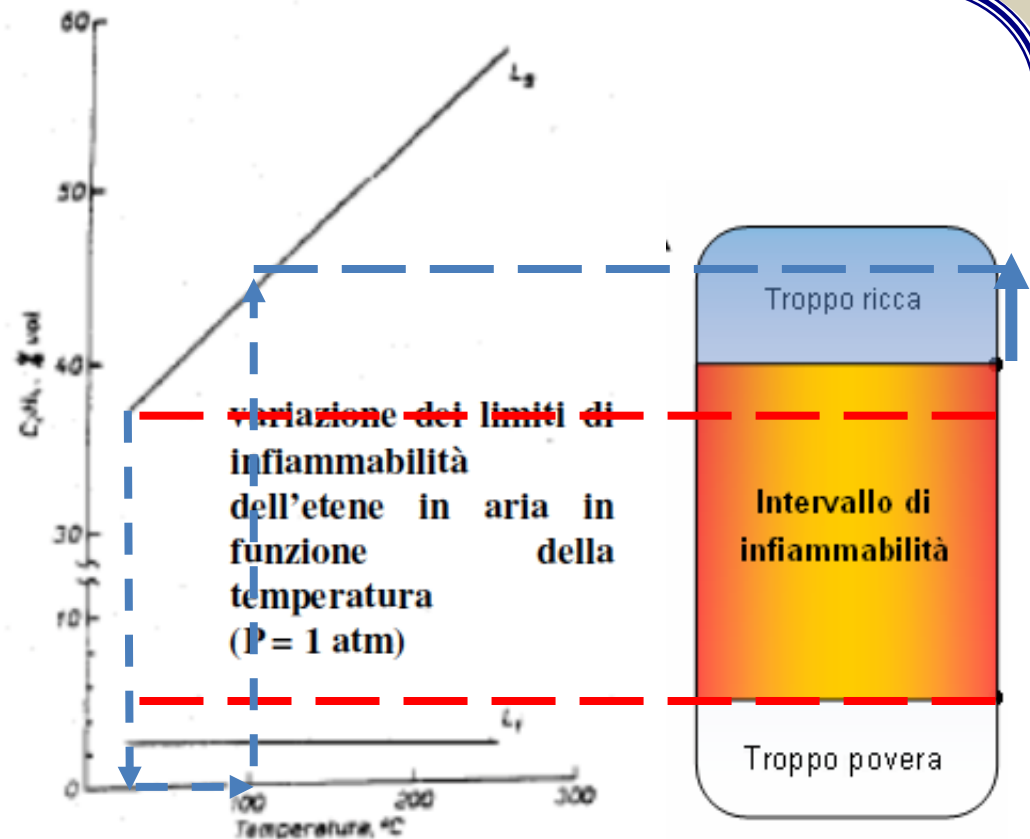
## Limiti di infiammabilità: il ruolo della temperatura

All'aumentare della temperatura:

- il limite superiore di infiammabilità aumenta;
- il limite inferiore di infiammabilità diminuisce, ma in modo meno marcato.

In definitiva all'aumentare della temperatura si “allarga” il campo di infiammabilità:

la miscela combustibile –  
comburente diventa più  
“pericolosa”



# CAMPO E LIMITE DI INFIAMMABILITÀ

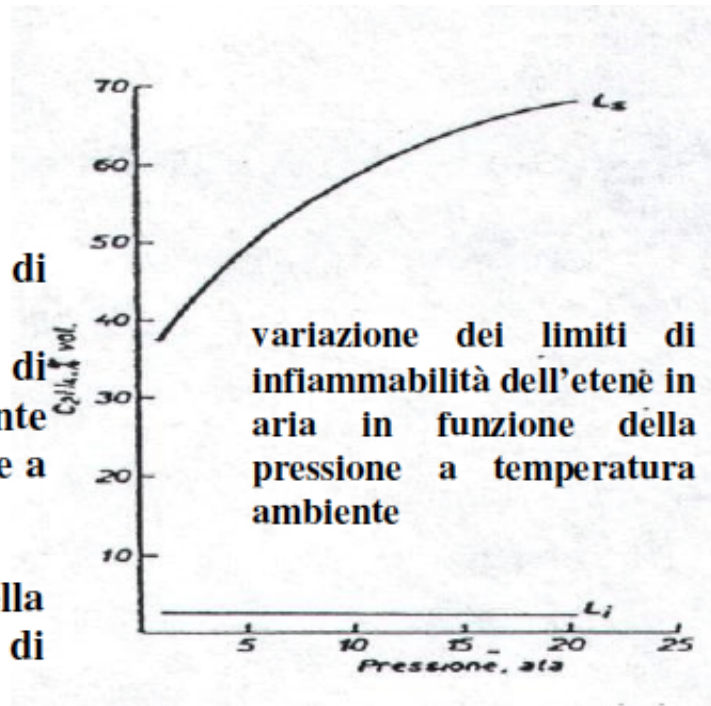
## Limiti di infiammabilità: il ruolo della pressione

All'aumentare della pressione:

- il limite superiore di infiammabilità aumenta;
- il limite inferiore di infiammabilità è scarsamente influenzato, ma tende comunque a diminuire.

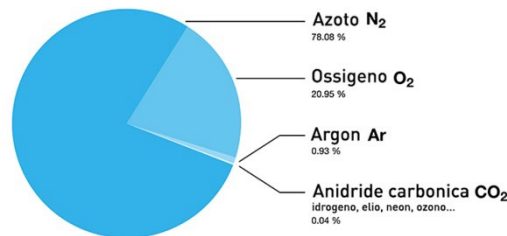
In definitiva all'aumentare della pressione si “allarga” il campo di infiammabilità:

la miscela combustibile –  
comburente diventa più  
“pericolosa”



# CAMPO E LIMITE DI INFIAMMABILITÀ

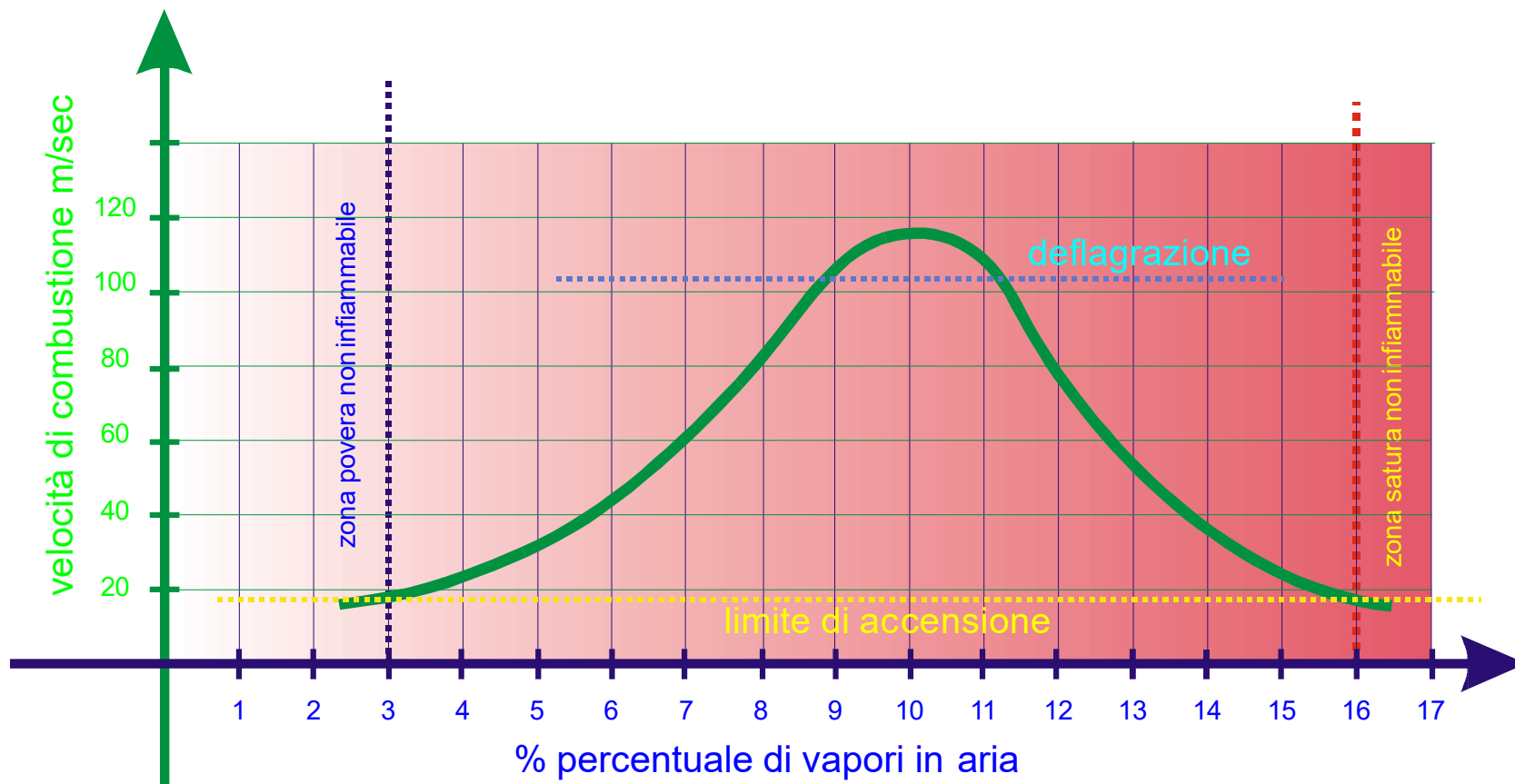
L'**azoto** presente nell'aria, che non partecipa alla reazione di combustione (**INERTE**), *agisce a mo' di diluente sulla miscela riducendone il campo di infiammabilità.*



Più in generale, la presenza di **gas inerti** (azoto, anidride carbonica etc.) **può far diminuire**, anche notevolmente, **il limite superiore di infiammabilità** della miscela combustibile-comburente priva di inerti, **spesso senza grosse variazioni del relativo limite inferiore di infiammabilità.**

# PREVENZIONE INCENDI

## GRAFICO DEL CAMPO DI INFIAMMABILITÀ





# **CAMPO E LIMITE DI INFIAMMABILITÀ**

I valori\* dei limiti di infiammabilità sono diversi a seconda del combustibile:

<b>Combustibile</b>	<b>Limite Inferiore</b>	<b>Limite Superiore</b>
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 comburente / combustibile

# CARATTERISTICHE SOSTANZE INFIAMMABILI

## CARATTERISTICADI INFIAMMABILITÀDELLEPIÙ COMUNISOSTANZECOMBUSTIBILI

Sostanza combustibile		Limiti di infiammabilità %di combustibile		TEMPERATURA °C		
Stato Fisico	Denominazione	inferiore	Superiore	Infiammabilità	Accensione	Teorica di combustione
Solido	Carbo ne				400 ÷ 500	2.200
	Legno				300 ÷ 400	1.820
Liquido	Alcool etilico	3,5	15,0	12	425	~ 2.000
	Benzina	1,2 ÷ 0,9	7,5 ÷ 4,0	< 10	350	2.000 ÷ 2,200
	Benzolo	1,2	8,0	-11	555	2.000 ÷ 2,200
	Kerosene	1,2	6,0	38 ÷ 74	260	2.000 ÷ 2,200
	Gasolio	0,6	6,5	> 55	220	2.000 ÷ 2,200
Gas	Acetilene	1,5	82		305	2.325
	Gas illuminante	5 ÷ 7	21 ÷ 31		470	2.180
	Idrogeno	4	75,6		560	2.045
	Metano	5	15		595	1.875
	Ossido di carbonio	12,5	74		605	2.100

# Unità di Misura

- ⌚ La grande caloria (Kcal) è la quantità di calore necessario ad innalzare la temperatura di un chilogrammo di acqua da 14 a 15 gradi centigradi. ***(1 Kcal = 0,0042 MJ/kg)***

# Potere calorifico

Potere calorifico [MJ/kg]

quantità massima di calore che si può ricavare dalla combustione completa di 1 kg di sostanza combustibile (o da 1 m<sup>3</sup> di gas) a 0 °C e 1 atm.

*Tenendo conto che nella combustione dell'idrogeno si formano molecole d'acqua,*  
il potere calorifico si distingue tra:

- **potere calorifico superiore (Hs):** quantità di energia che l'unità di massa di un combustibile produce bruciando completamente, incluso il calore di condensazione dell'acqua
- **Potere calorifico inferiore (Hi):** quantità di energia che l'unità di massa di un combustibile produce bruciando completamente, escluso il calore di condensazione dell'acqua

# Potere calorifico

- ⌚ **Ogni combustibile sviluppa bruciando, una sua particolare energia calorifica.**
- ⌚ Il potere calorifico è la quantità di calore che può sviluppare un kg di combustibile, bruciando completamente.
- ⌚ I combustibili solidi possono sviluppare da 3000 a 9600 cal/kg (*da 12 a 40 MJ/kg circa*);
- ⌚ I combustibili liquidi possono sviluppare da 6000 a 10.500 cal/kg (*da 25 a 44 MJ/kg circa*);
- ⌚ I combustibili gassosi possono sviluppare da 5000 a 28.000 cal/kg (*da 21 a 118 MJ/kg circa*)

# Potere calorifico

Conoscendo il potere calorifico di un dato materiale combustibile e la quantità stoccata è possibile determinare il “**carico di incendio**”, e quindi stabilire la durata espressa in minuti di resistenza al fuoco della struttura.

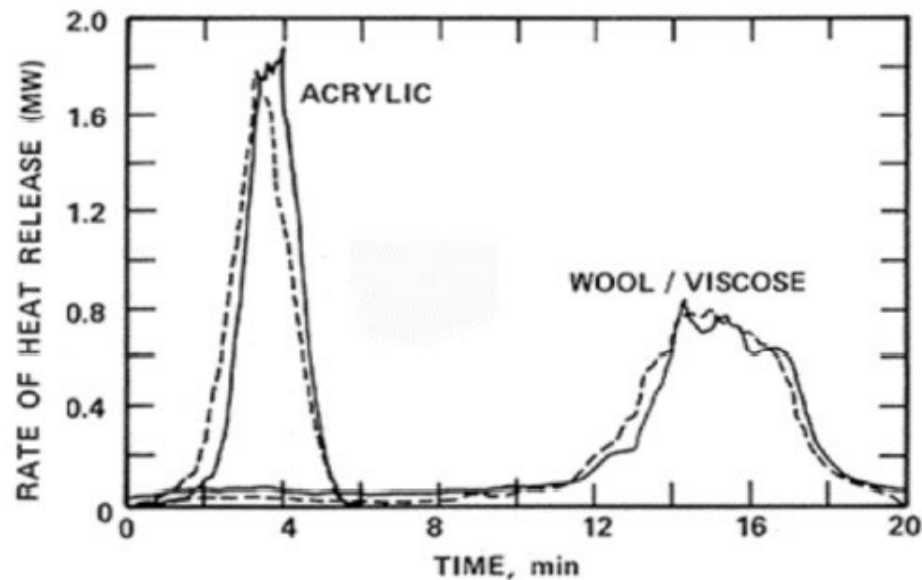
Sostanze	Potere Calorifico Inferiore	Potere Calorifico Superiore
	MJ/kg	MJ/kg
Benzina	42	46
Coke	29	30
Metano	31,65	35,16
Gasolio	41	44
G.P.L.	46	50
Legna secca	16,7	18,4
Olio combustibile	41	43,8

*Potere calorifico superiore e inferiore di alcune sostanze comuni*

# Rate of Heat Released – RHR vs t

Rappresenta il «tasso di rilascio termico» ovvero l'energia termica emessa per unità di tempo, ovvero la potenza termica, pertanto è un parametro strettamente legato allo sviluppo dell'incendio reale.

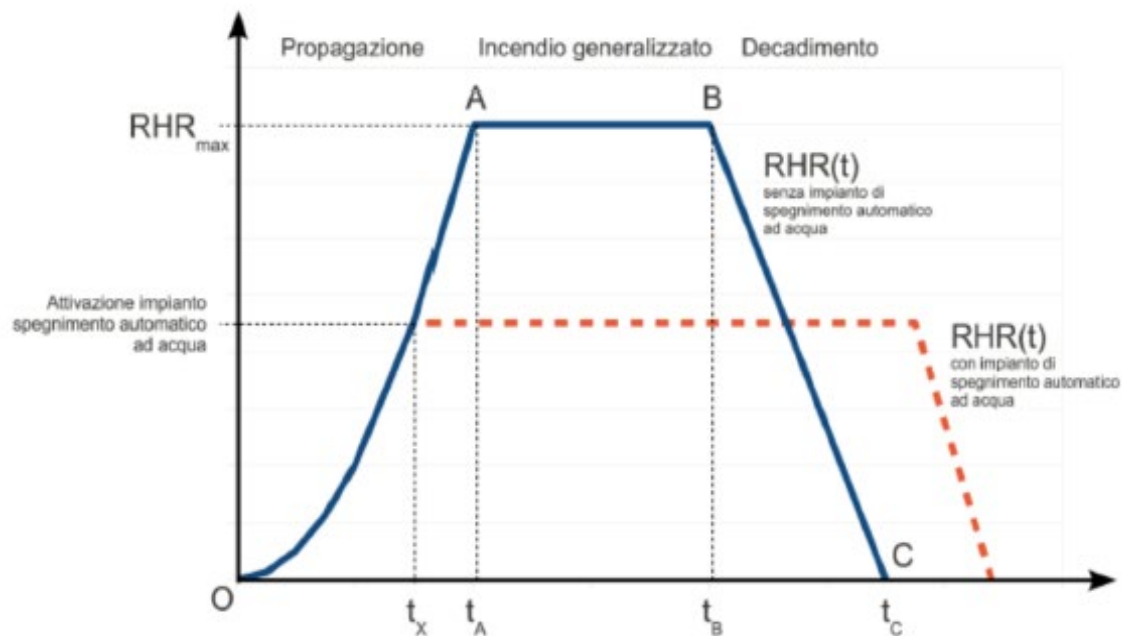
■ Potrona imbottita, secondo il materiale



# Rate of Heat Released – RHR vs t

## Curva di rilascio termico

- Eurocodice 1, UNI EN 1991-1-2:2004 Parte 1-2: Azioni in generale - Azioni sulle strutture esposte al fuoco.

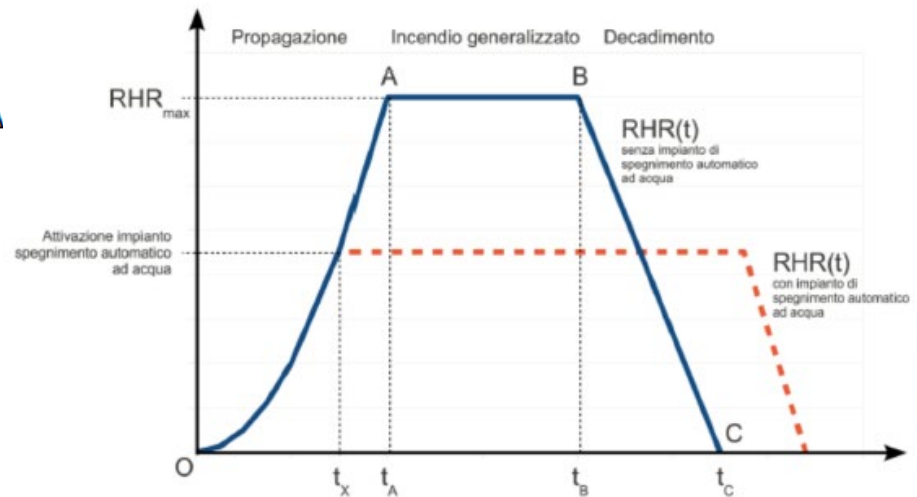
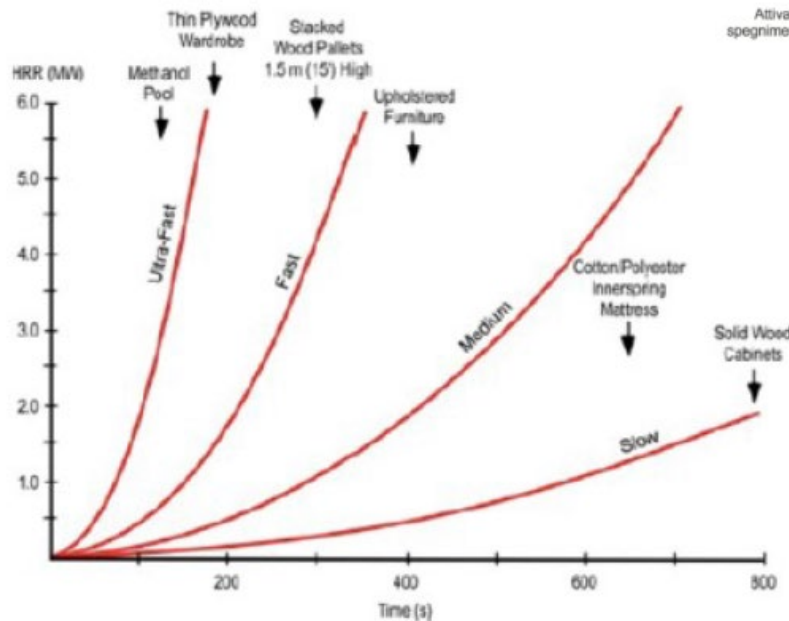




# Rate of Heat Released – RHR vs t

Fase di propagazione dell'incendio

$$RHR(t) = 1000 \left( \frac{t}{t_a} \right)^2 \quad \text{per } t < t_A$$



# Rate of Heat Released – RHR vs t

**Tabella 5.4 – Fasi dell'incendio sui materiali coinvolti e sulle persone**

Fase	Ignizione	Crescita	Incendio pienamente sviluppato	Decadimento
Eventi	Innesco del primo oggetto, produzione di fumo e gas	Produzione di fumo e gas	I materiali partecipano alla combustione completamente, le temperature superano i 1000 °C	Le temperature si abbassano
Effetti sulle persone	L'aria inizia ad essere contaminata	L'aria diventa progressivamente intollerabile fino ad essere letale	L'atmosfera è letale	
Effetti sui materiali	Effetti trascurabili	I materiali sono contaminati ed anneriti dal fumo compaiono bolle sulla vernice	Le rifiniture sono distrutte, il legno strutturale brucia, la muratura non strutturale cede	Gli elementi protetti dall'incendio resistono

# Dinamica dell'Incendio

In seguito all'accensione di materiali contenuti in un ambiente confinato o semi-confinato (es: un capannone), *l'incendio – nella sua prima fase, quando è ancora di limitate dimensioni – si comporta come se avvenisse in ambiente non confinato.*

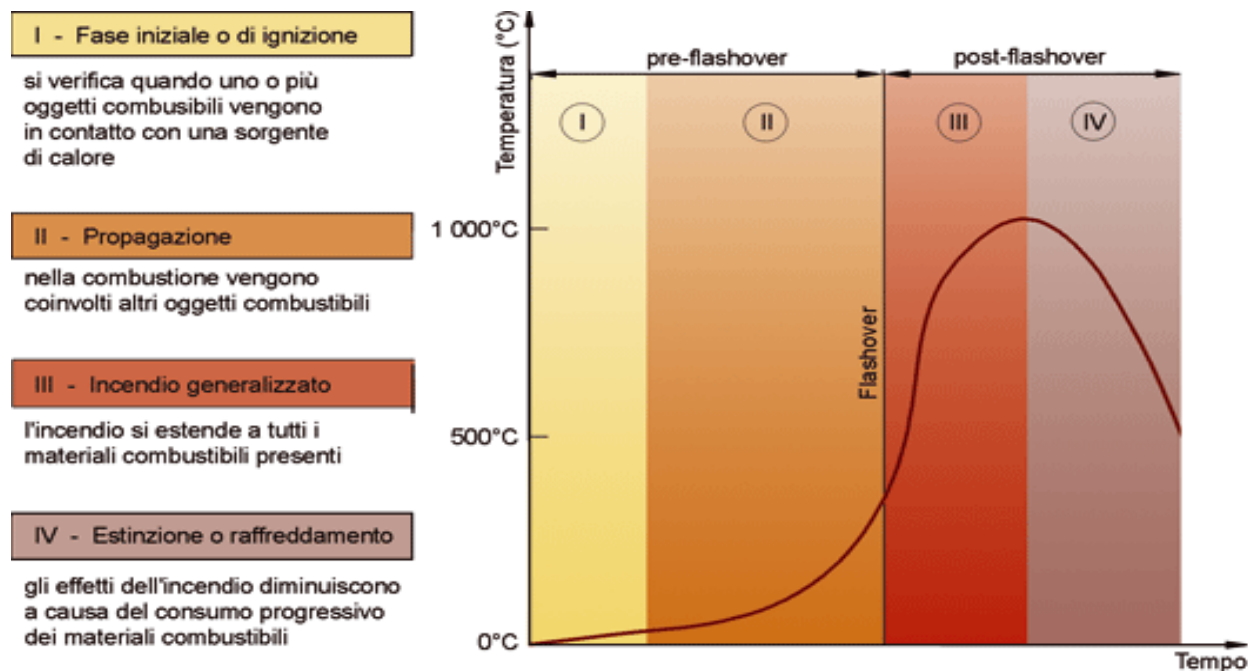
Se sussistono le condizioni per una sua propagazione (sufficiente disponibilità di combustibile e comburente), la sua evoluzione potrà essere influenzata dal confinamento «geometrico».

I **principali fattori** da prendere in considerazione per caratterizzare un incendio sono:

- **la temperatura massima raggiunta dei prodotti di combustione,**
- **la velocità di aumento della temperatura dei prodotti di combustione;**
- **la quantità d calore prodotta;**
- **la velocità di produzione del calore;**
- **il tempo necessario per raggiungere la temperatura massima dei fumi**

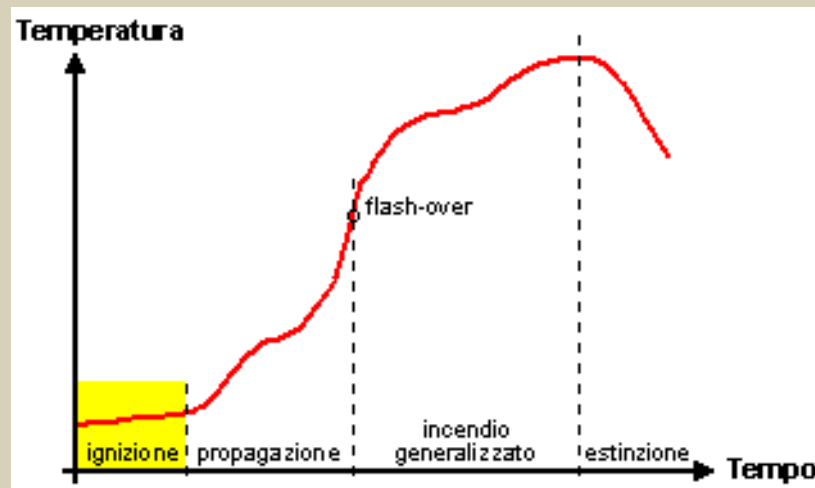
# Dinamica dell'Incendio

L'evoluzione dell'incendio può essere descritta in termini di **variazione della temperatura** dei prodotti di combustione all'interno dell'ambiente confinato o semi-confinato **in funzione del tempo**.



## Dinamica dell'incendio

Nell'evoluzione dell'incendio si possono individuare quattro fasi caratteristiche:

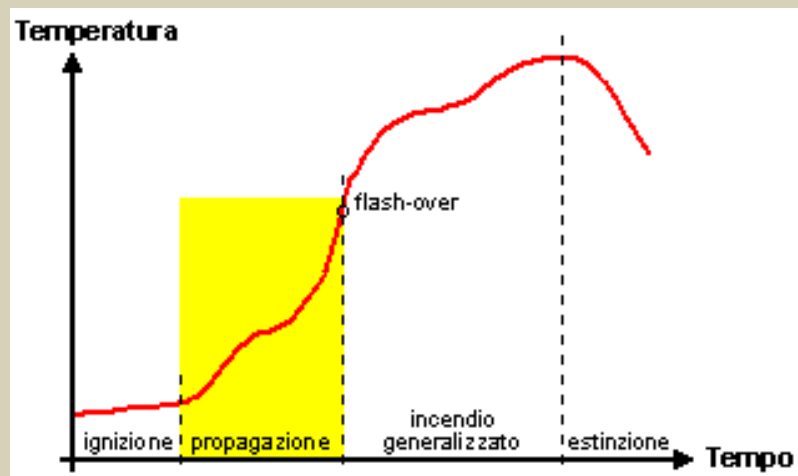


**Ignizione;** la sua durata dipende dai seguenti fattori:

- o infiammabilità del combustibile;
- o possibilità di propagazione della fiamma;
- o velocità di decomposizione del combustibile coinvolto dall'incendio;
- o geometria e volume degli ambienti;
- o possibilità di dissipazione del calore nel combustibile;
- o ventilazione dell'ambiente;
- o caratteristiche superficiali del combustibile;
- o distribuzione del combustibile nell'ambiente, punti di contatto, altezza;

## Dinamica dell'incendio

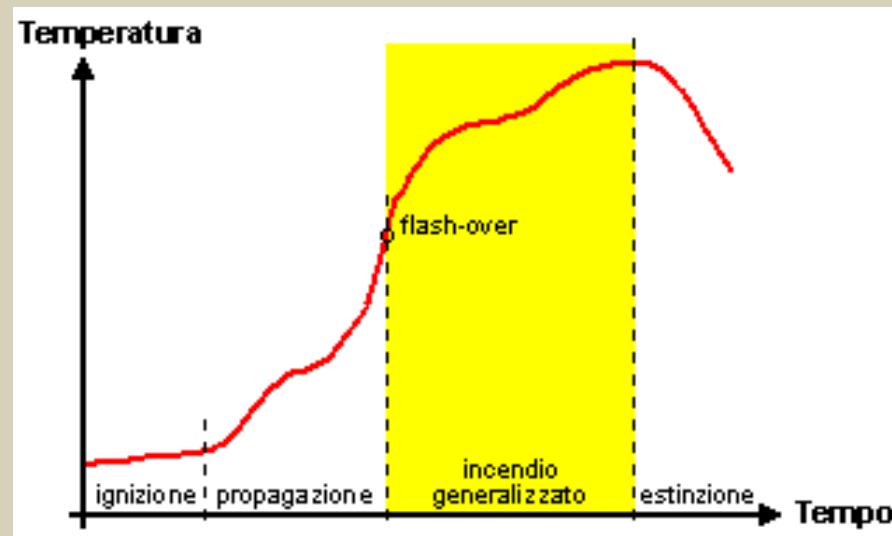
Nell'evoluzione dell'incendio si possono individuare le fasi caratteristiche:



*Ignizione ed Estensione;* si ha:

- o riduzione di visibilità a causa dei prodotti di combustione;
- o produzione di gas tossici e corrosivi;
- o formazione e propagazione di sacche nelle quali gas infiammabili si concentrano e possono raggiungere i loro limiti di infiammabilità e di esplosione;
- o aumento della velocità di combustione;
- o aumento rapido delle temperature;
- o aumento dell'energia di irraggiamento;
- o effetti al contorno (sinergismo).

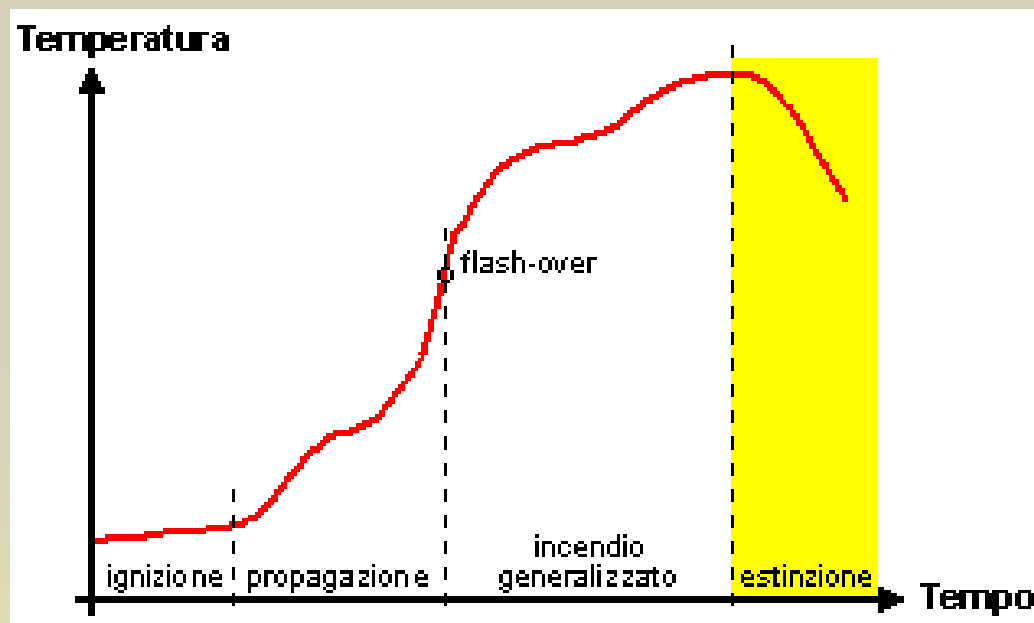
I materiali vicini e non al focolaio di incendio, anche se non toccati dal fuoco, raggiungono il loro punto di accensione e contribuiscono a dare maggior corpo al fenomeno producendo gas infiammabili.



***Incendio generalizzato (flash over);*** le cui caratteristiche essenziali sono :

- o brusco aumento della temperatura;
- o aumento esponenziale della velocità di combustione;
- o forte aumento dell'emissione dei gas, che si espandono sia in senso orizzontale sia, soprattutto, in senso ascensionale; si formano zone di turbolenza - visibili;
- o i combustibili vicini al focolaio si autoaccendono, quelli più lontani si riscaldano e raggiungono la loro temperatura di combustione con produzione di gas di pirolisi infiammabili;
- o si formano onde di choc e lance di fuoco.

***Estinzione;*** raggiunta l'accensione completa dei materiali combustibili, il fenomeno incomincia a rallentare e, in assenza di apporti esterni, si avvia all'estinzione; la temperatura nell'ambiente incomincia a decrescere.





# Dinamica dell'Incendio

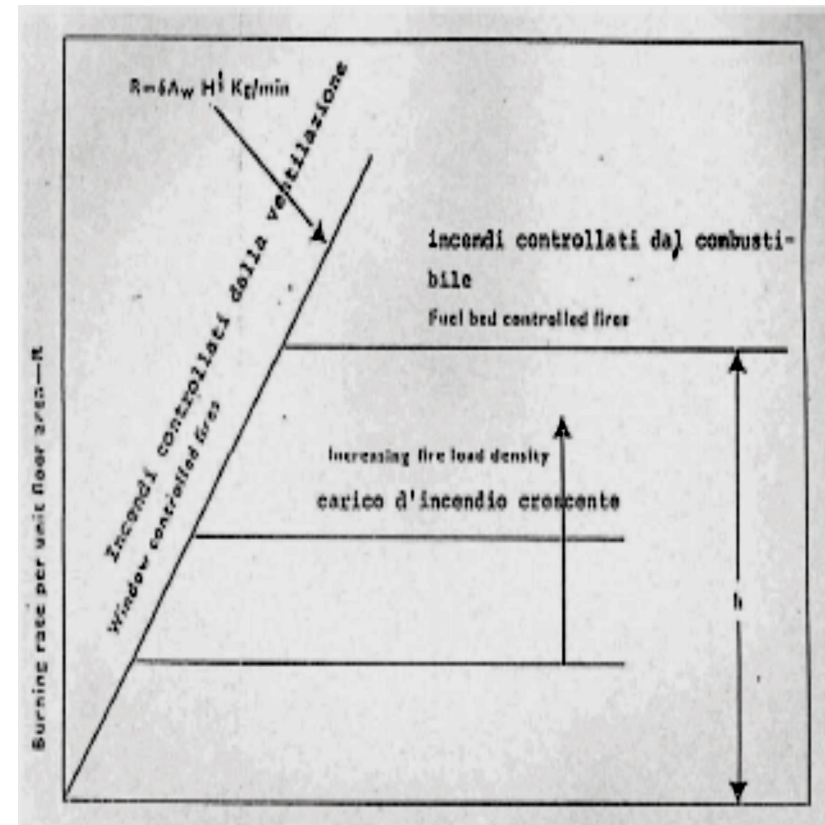
## Regimi di combustione

### Incendio controllato dalla ventilazione

La velocità di ventilazione dipende dalla quantità di aria che alimenta l'incendio attraverso le varie aperture e quindi dalle loro dimensioni (fattore di ventilazione)

### Incendio controllato dal combustibile

L'aria disponibile è molto superiore a quanta ne occorra;  
la velocità di combustione dipende dalla efficienza del contatto combustibile-comburente consentita dalla geometria del combustibile



# Dinamica dell'Incendio flash-over

