

CHIMICA E FISICA DELL'INCENDIO

*Appunti ad uso esclusivo interno dei corsi per vigili permanenti in prova, redatti
con la collaborazione dei funzionari, Ing. Massimo RICCI e del C.T.A. Alberico ORSINI*

CHIMICA E FISICA DELL'INCENDIO

1. CHIMICA DELLA COMBUSTIONE	5
1.1. ATOMI E MOLECOLE	5
1.2. REAZIONE CHIMICA	8
1.3. GENERALITÀ SULLA COMBUSTIONE	10
1.4. LA VELOCITÀ DI COMBUSTIONE.....	12
2. PROPAGAZIONE DELLA COMBUSTIONE	15
2.1. GENERALITÀ	15
2.2. LIMITI DI INFIAMMABILITÀ.....	16
2.3. TEMPERATURA DI INFIAMMABILITÀ	20
2.4. TEMPERATURA DI ACCENSIONE.....	21
2.5. ESPLOSIONE, DEFLAGRAZIONE E DETONAZIONE.....	21
3. PARAMETRI DELLA COMBUSTIONE	24
3.1. GENERALITÀ	24
3.2. POTERE CALORIFICO.....	24
3.3. ARIA NECESSARIA PER LA COMBUSTIONE.....	25
3.4. TEMPERATURA DELLA COMBUSTIONE.....	26
4. COMBUSTIBILI.....	27
4.1. GENERALITÀ	27
4.2. COMBUSTIBILI SOLIDI.....	27
4.3. COMBUSTIBILI LIQUIDI	30
4.4. COMBUSTIBILI GASSOSI.....	34
4.5. CONSERVAZIONE DEI GAS	35
5. ESPLOSIVI.....	37
5.1. GENERALITÀ	37
5.2. CARATTERISTICHE DEGLI ESPLOSIVI	38
5.3. CLASSIFICAZIONE DEGLI ESPLOSIVI.....	40
5.4. TIPI DI ESPLOSIVI.....	41
5.5. ESPLOSIONI DI POLVERI.....	43
6. PRODOTTI DELLA COMBUSTIONE.....	45
6.1. GAS DI COMBUSTIONE	45
6.2. FIAMME.....	46
6.3. FUMI	47
6.4. CALORE.....	47
7. DINAMICA DEGLI INCENDI.....	48
7.1. FATTORI DA CUI DIPENDE UN INCENDIO	48
7.2. SVILUPPO DI UN INCENDIO.....	49
7.3. FASI DI UN INCENDIO.....	50
7.4. FASE INIZIALE O DI ACCENSIONE	51
7.5. FASE DELL'INCENDIO VERO E PROPRIO.....	53
7.6. FASE DI ESTINZIONE O DI RAFFREDDAMENTO	54
7.7. PROPAGAZIONE DEGLI INCENDI.....	54
8. LE MISURE PRECAUZIONALI DI PREVENZIONE DEGLI INCENDI	56
8.1. LE PRINCIPALI CAUSE D'INCENDIO	56
8.2. LE FASI DELLA PREVENZIONE INCENDI	59

1. CHIMICA DELLA COMBUSTIONE

1.1. Atomi e molecole

Tutta la materia è costituita da una combinazione di elementi (**atomi**).

La più piccola particella di una sostanza che possiede le proprietà di quella sostanza è la **molecola**.

Ogni molecola è costituita da due o più atomi legati fra loro in numero ben determinato.



Fig.1

L'atomo può essere schematicamente rappresentato da un **nucleo** centrale formato da **protoni** e **neutroni** intorno al quale ruotano, su traiettorie dette *orbitali atomici*, gli **elettroni**.

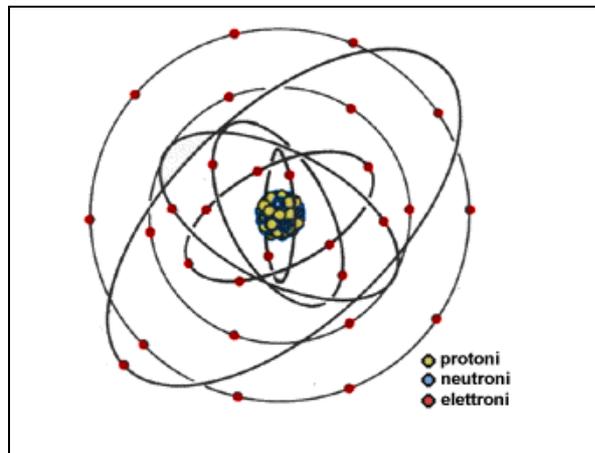


Fig.2

I protoni hanno una massa ed una carica positiva, i neutroni hanno una massa pari a quella del protone ed una carica nulla.

Gli elettroni hanno massa trascurabile e carica pari a quella dei protoni, ma di segno opposto.

Se il numero di elettroni in un atomo è pari a quello dei protoni, si dice che la sua **carica netta**, data dalla differenza tra protoni e elettroni, è **neutra**.

Protoni e neutroni insieme determinano la massa dell'atomo (**peso atomico** o **numero di massa**). Il numero di protoni distingue tra loro gli atomi di elementi diversi. Per esempio, un atomo di idrogeno, l'elemento più semplice, ha 1 protone, un atomo di carbonio ne ha 6. Il numero di protoni presenti in un nucleo viene chiamato **numero atomico**.

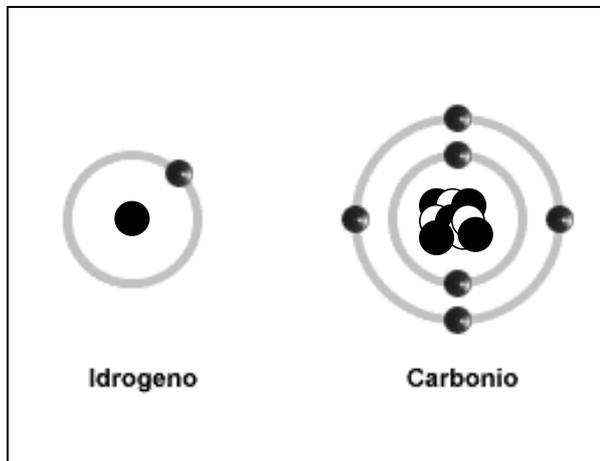


Fig.3

Struttura atomica di alcuni elementi più comuni

Elemento	Simbolo	Numero protoni	Numero neutroni	Numero elettroni
Idrogeno	H	1	0	1
Carbonio	C	6	6	6
Azoto	N	7	7	7
Ossigeno	O	8	8	8
Sodio	Na	11	12	11
Zolfo	S	16	16	16
Calcio	Ca	20	20	20

L'atomo con una carica netta diversa da zero viene chiamato **ione**. Se gli elettroni sono più dei protoni l'atomo risulta carico negativamente (ione negativo), viceversa se i protoni sono più degli elettroni risulta carico positivamente (ione positivo).

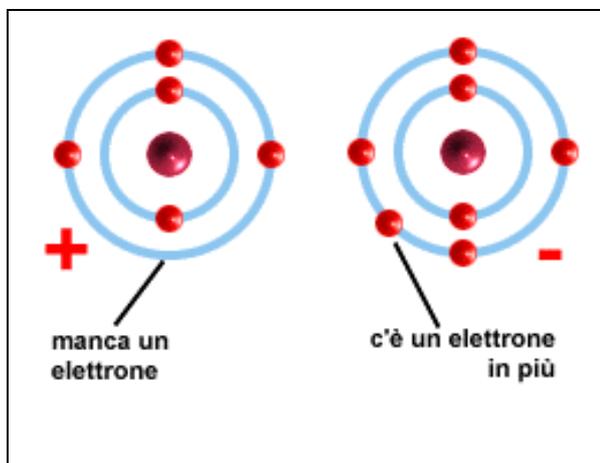


Fig.4

Gli elettroni determinano il comportamento chimico degli atomi ovvero come questi reagiscono fra loro.

L'**idrogeno** (fig.5a) che ha un solo elettrone sarà rappresentabile con un nucleo centrale ed un elettrone che si muove all'interno del primo livello energetico (il primo livello energetico può contenere fino a due elettroni) . Questo spiega la tendenza dell'idrogeno ad acquisire un elettrone.

L'**ossigeno** (fig.5b) con 8 elettroni avrà 2 livelli energetici, dei quali il primo può contenere solo due elettroni, mentre il secondo ne contiene 6, anche se in realtà può accettarne fino ad 8. Questo spiega la tendenza dell'ossigeno ad acquistare due elettroni trasformandosi in O^{2-} .

Gli atomi tendono infatti a **completare il loro livello energetico esterno** riempiendolo col massimo numero di elettroni che esso può contenere. Una tale situazione conferisce loro la massima stabilità.

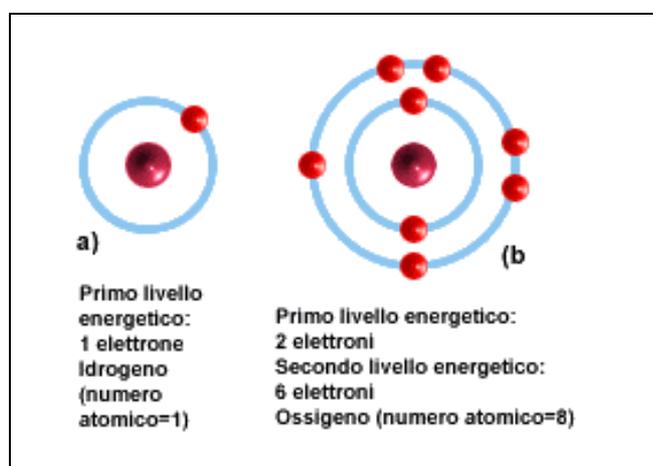


Fig. 5- Rappresentazione della disposizione elettronica in alcuni elementi.

Come si è visto, l'**atomo** è rappresentato da un **simbolo** (H = Idrogeno, C = Carbonio, ecc.)

Le **molecole**, che non sono altro che un insieme di atomi uniti da un legame chimico, sono rappresentate da una **formula** ed un **nome**.

La **formula** descrive la **composizione della sostanza** attraverso i simboli degli elementi in essa contenuti. Ad esempio l'**ossido di ferro**, indicato come **FeO**, contiene un atomo di ferro ed uno di ossigeno.

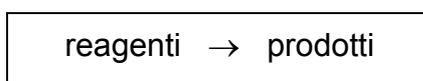
Spesso nelle formule sono presenti gli **indici** che rappresentano il **numero di atomi** di quell'elemento contenuti nella molecola. Così ad esempio in **H₂O**, il 2 sta ad indicare che in ogni molecola di acqua ci sono **2 atomi di idrogeno** ed **1 di ossigeno**; nel metano (CH₄) si ha un atomo di carbonio legato a quattro atomi di idrogeno.

1.2. Reazione chimica

Una reazione chimica consiste nella redistribuzione degli atomi in molecole o aggregati diversi da quelli esistenti precedentemente e quindi nella formazione di sostanze nuove, costituite dagli stessi elementi di quelli da cui hanno preso origine.

Queste trasformazioni comportano solitamente la rottura di alcuni legami nei reagenti e la formazione di nuovi legami, che andranno appunto a caratterizzare i prodotti.

Tutte le reazioni chimiche possono essere rappresentate attraverso equazioni chimiche, nelle quali **a sinistra** vengono scritti tutti i **reagenti**, **a destra** tutti i **prodotti** e fra di essi si disegna una **freccia** che punta verso i prodotti:



Una **reazione** può essere **completa** quando nello stato finale le sostanze reagenti non sono più presenti o lo sono in quantità trascurabili, **incompleta** o **parziale** quando nello stato finale oltre ai prodotti della reazione è presente ancora una parte più o meno cospicua delle sostanze reagenti.

Il termine **equazione** sta a significare che in ognuna di queste reazioni chimiche tutto ciò che sta prima della freccia, cioè i reagenti, viene convertito in uno o più prodotti: in questo passaggio nulla viene disperso.

Si noti che per realizzare una reazione chimica occorre mettere insieme atomi e molecole delle varie sostanze in **quantità proporzionali** ai numeri indicati nella rispettiva equazione. Tali numeri prendono il nome di **coefficienti stechiometrici**.

Inoltre, per la **conservazione della massa**, la somma degli atomi di ciascun elemento al primo membro è uguale alla somma degli stessi atomi al secondo membro.

Ad esempio nella reazione:

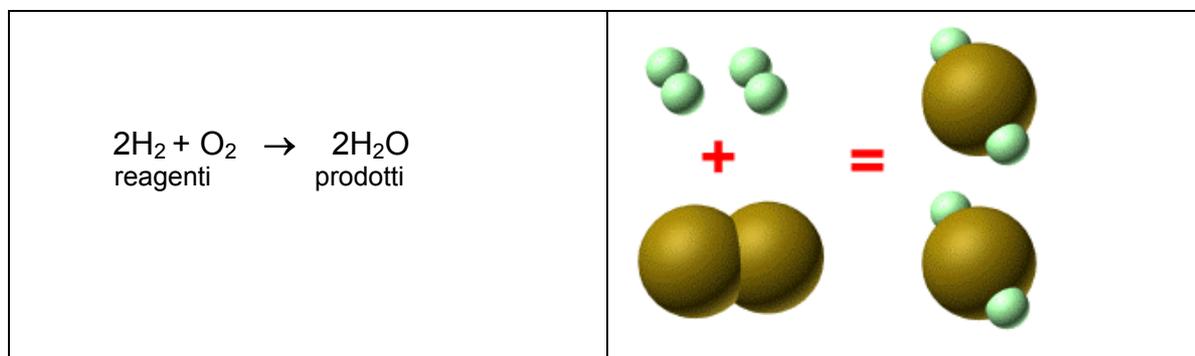


Fig.6

ogni molecola di ossigeno reagisce con due molecole di idrogeno. La proporzione è quindi 2:1.

Un atomo è tanto più stabile quanto più i suoi elettroni si trovano ad un livello energetico basso.

L'attività chimica di un elemento è determinata dal grado di riempimento del **livello energetico più esterno**. Se tale livello energetico contiene 6 elettroni, ma può contenerne fino ad 8, l'atomo tenderà ad acquistare appena possibile i due elettroni mancanti, al fine di raggiungere una maggiore stabilità.

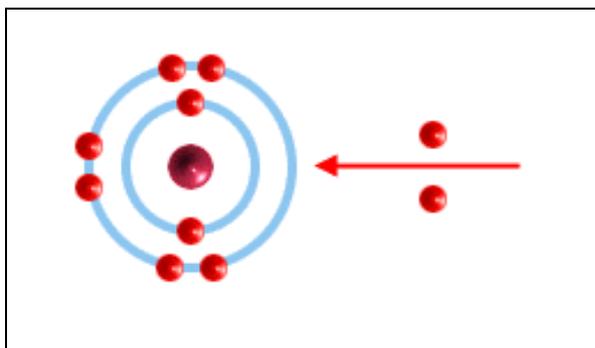


Fig.7

Negli atomi della maggior parte degli elementi (in pratica tutti ad esclusione dei gas nobili) il livello energetico più esterno è riempito solo parzialmente. Essi tendono a reagire fra loro in modo tale che dopo la reazione abbiano tali livelli energetici esterni completi. Così alcuni atomi perdono elettroni ed altri li acquistano, mentre in altri casi ancora gli atomi mettono in comune i loro elettroni.

Quando due o più atomi si legano fra loro, essi debbono avvicinarsi fino a stabilire un contatto elettronico. Gli elettroni situati sull'ultimo livello sono quelli che, interagendo fra loro, danno origine ai legami chimici.

Non tutti gli atomi possiedono nella stessa misura la facoltà di attirare a sé gli elettroni di altri atomi. Il concetto di **elettronegatività** indica la misura con la quale un atomo esercita la sua influenza attrattiva sugli elettroni di altri atomi.

L'elettronegatività è bassa per atomi che hanno pochi elettroni nel livello esterno, particolarmente in quelli che ne hanno uno solo, mentre è alta negli atomi che hanno 6 o 7 elettroni e sono perciò vicini a completare l'ottetto.

1.3. Generalità sulla combustione

Si dice **combustione** qualunque reazione chimica nella quale un **combustibile**, sostanza ossidabile, reagisce con un **comburente**, sostanza ossidante, liberando **energia**, in genere sotto forma di **calore**.

Nella definizione il termine **ossidazione** va inteso nel significato che ha in chimica, cioè come **perdita di elettroni**.

Quando più atomi entrano in competizione per gli stessi elettroni, hanno il sopravvento i più elettronegativi, e riescono ad attirare verso di sé gli elettroni contesi. Così i **combustibili**, entrando in contatto con i comburenti, perdono elettroni, cioè **si ossidano**, mentre i comburenti **si riducono**, cioè acquistano elettroni.

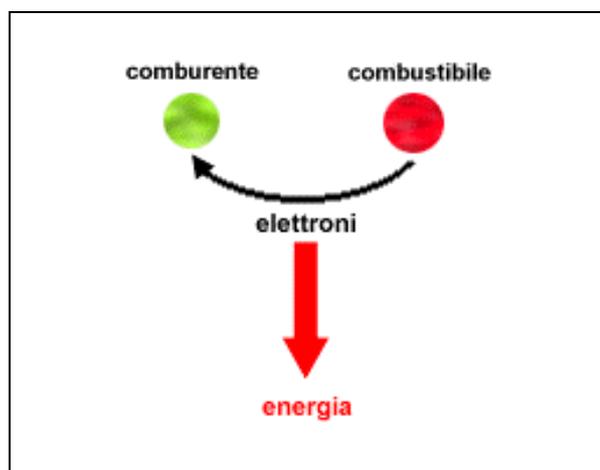


Fig.8

Il nome di **ossidazione** deriva dalla combinazione degli elementi con **l'ossigeno**.

L'ossigeno, che è fortemente elettronegativo, riesce a strappare elettroni a tutti gli elementi, con la sola eccezione del fluoro, l'elemento più elettronegativo in assoluto.

Vediamo cosa succede nella combustione più semplice, quella che coinvolge idrogeno ed ossigeno ($2\text{H}_2 + \text{O}_2 \rightarrow 2\text{H}_2\text{O} + \text{E}$).

All'inizio nelle molecole di idrogeno ed ossigeno gli elettroni di legame sono egualmente condivisi tra gli atomi, come è logico che avvenga tra atomi identici. Nel prodotto di reazione, invece, gli elettroni di legame sono di fatto completamente spostati verso l'ossigeno, più elettronegativo.

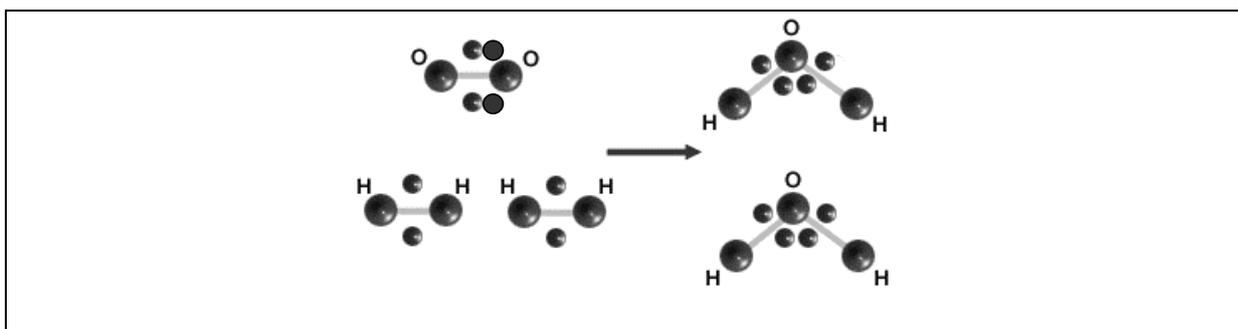


Figura 9 - Equa condivisione degli elettroni nelle molecole di idrogeno e di ossigeno e attrazione degli elettroni di legame verso l'ossigeno nell'acqua ($2\text{H}_2 + \text{O}_2 \rightarrow 2\text{H}_2\text{O}$)

Analogamente, nella combustione del carbonio ($C + O_2 \rightarrow CO_2 + E$) ogni atomo di carbonio mette in comune all'inizio i suoi elettroni di legame con gli altri atomi di carbonio. Nel prodotto di reazione con l'ossigeno, invece, gli elettroni di legame risultano tutti spostati verso l'ossigeno, più elettronegativo.

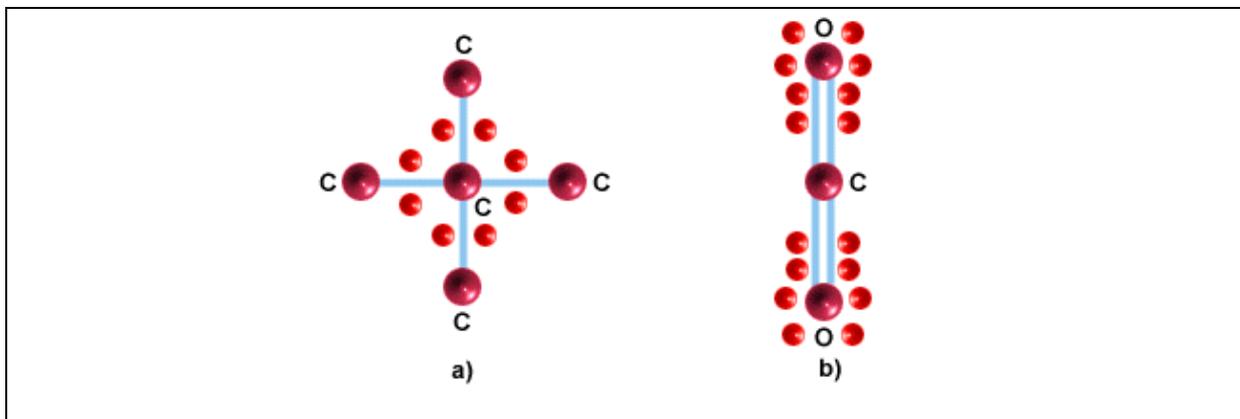


Figura 10 - a) Equa condivisione degli elettroni nel carbonio b) Nell'anidride carbonica gli elettroni di legame sono maggiormente attratti verso l'ossigeno, più elettronegativo ($C+O_2 \rightarrow CO_2$)

Ma come si spiega la liberazione di calore e quindi l'**esotermicità** delle reazioni di combustione?

Nelle reazioni di combustione i reagenti hanno più energia dei prodotti di reazione e la differenza di energia tra reagenti e prodotti è pari al calore emesso.

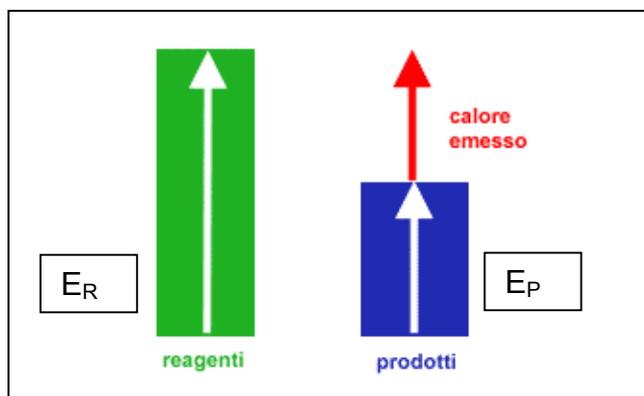


Fig. 11 - La combustione è una reazione esotermica che libera calore perché i reagenti possiedono più energia dei prodotti di reazione

Il calore generato, a sua volta, innalza la temperatura dei partecipanti alla reazione e la porta a valori tali per cui essi irradiano energia elettromagnetica con lunghezze d'onda comprese nel campo del visibile. La zona di reazione appare allora luminosa e si parla di **fiamme**.

Il comburente è quasi sempre l'ossigeno dell'aria.

Le sostanze combustibili più comuni sono, in larga parte, composte di idrogeno e carbonio. Nelle combustioni in aria si ha quindi formazione di acqua liquida o vaporizzata, e di anidride carbonica. Se però l'aria non è sufficiente ad ossidare completamente il carbonio si ha presenza, più o meno forte, di **ossido di carbonio**.

Mescolati ai prodotti di reazione del carbonio e dell'idrogeno si trovano di solito i prodotti di reazione dello zolfo, presente in quasi tutti i combustibili, gas inerti come l'azoto, gas derivanti dalla decomposizione termica di eventuali sostanze organiche, ed infine incombusti e residui minerali. Tutti questi prodotti insieme vengono chiamati **fumi**.

1.4. La velocità di combustione

La combustione è un **processo di ossidazione** che, in natura, di solito ha luogo in presenza di ossigeno atmosferico.

Come tutte le reazioni che liberano energia, anche le combustioni dovrebbero avvenire spontaneamente: perché si verifica allora che materiali combustibili in presenza dell'ossigeno rimangono in uno stato di "letargo" senza che nulla accada?

La risposta è che le combustioni (ossidazioni), sebbene spontanee dal punto di vista termodinamico, in genere procedono a velocità bassissime a temperatura ambiente. Le molecole "reagenti" devono infatti scontrarsi tra loro e riarrangiare opportunamente i loro atomi prima di riuscire a formare le molecole "prodotti".

L'arrangiamento degli atomi può richiedere una elevata energia, detta appunto **energia di attivazione** e non tutte le molecole che si scontrano hanno energia sufficiente a superare la barriera di attivazione.

Il concetto di energia di attivazione è illustrato nella figura che segue: la sfera non può precipitare dal livello superiore a quello inferiore liberando l'energia potenziale se prima non supera la barriera di attivazione.

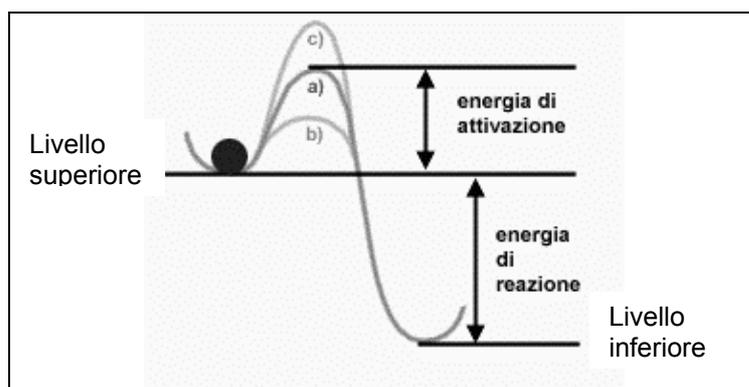


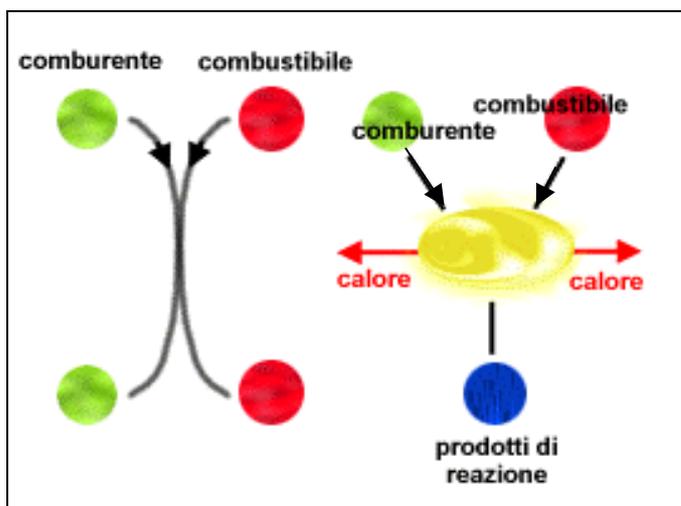
Fig. 12 - L'energia di attivazione (a) è la barriera che si deve superare per poter liberare l'energia di reazione. Un catalizzatore (b) abbassa l'energia di attivazione, mentre un inibitore (c) l'aumenta

Un **catalizzatore** fa procedere la reazione più velocemente perché fornisce un percorso alternativo in cui la barriera di attivazione è più bassa, mentre un **inibitore** rallenta la reazione perché innalza la barriera stessa.

L'energia posseduta dalle molecole è di tipo **cinetico**, cioè legata al loro moto e quindi alla temperatura. Più alta è la temperatura, più veloci si muovono le molecole, e quindi più probabile è che nell'urto superino la barriera di attivazione.

A bassa temperatura perciò le molecole, in genere, si urtano senza reagire, mentre, ad alta temperatura, reagiscono tra di loro in quanto l'energia d'urto è superiore all'energia di attivazione.

Fig. 13 - a) Rimbalzo senza reazione tra molecole a bassa temperatura e quindi lente.
b) Reazione tra molecole ad alta temperatura e quindi veloci



Questa è la ragione per cui, in un'atmosfera piena di ossigeno, non tutto ciò che è combustibile (inclusi noi stessi) prende fuoco.

La **temperatura** è il parametro che più influenza la velocità di reazione. Tutte le reazioni accelerano all'aumentare della temperatura perché le molecole, più veloci, collidono tra loro con maggior frequenza ed efficacia.

Ma da cosa è costituita, in realtà, la barriera di attivazione?

Una spiegazione convincente si può trovare nella teoria dello **stato di transizione**.

Secondo questa teoria, ogni reazione, per aver luogo, deve superare una "cima di collina" rappresentata da un livello energetico, tipico dei complessi attivati, superiore al livello iniziale.

Per esempio, la combustione tra idrogeno ed ossigeno può aver luogo solo passando attraverso i complessi attivati: H (idrogeno atomico), O (ossigeno atomico) e OH (radicale) la cui energia è globalmente superiore a quella delle molecole di idrogeno e di ossigeno da cui i complessi hanno origine.

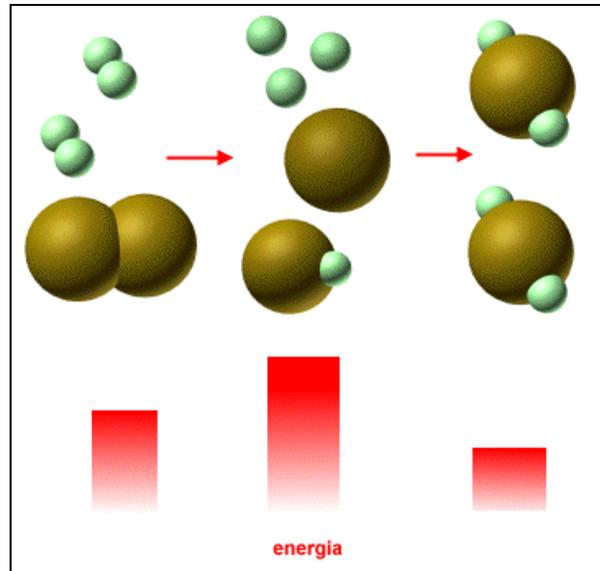


Fig.14

La velocità di reazione dipende dalla concentrazione, cioè dal numero per unità di volume, dei complessi attivati che si formano e questa concentrazione, a sua volta, dipende dalla temperatura. Sotto una certa temperatura, detta appunto **temperatura di accensione** o **temperatura di ignizione**, le collisioni molecolari, abbastanza veloci da superare la barriera di attivazione, e quindi da dar luogo a complessi attivati, sono poco probabili e la combustione procede perciò in forma lenta o latente.

Sopra questa temperatura, invece, un gran numero di collisioni danno luogo a complessi attivati e perciò la loro concentrazione cresce e si verifica la combustione.

Se poi in un volume abbastanza grande combustibile e comburente, ben miscelati, si portano alla temperatura di accensione, la liberazione di energia può avere l'andamento di una **esplosione**. Tutto dipende dalle modalità di raggiungimento della temperatura di accensione nel tempo e nei diversi punti e quindi, essenzialmente, dai processi di scambio termico e di liberazione di energia in forma termica: è questo il problema della propagazione delle combustioni.

2. PROPAGAZIONE DELLA COMBUSTIONE

2.1. Generalità

La propagazione della combustione richiede la presenza contemporanea di tre requisiti fondamentali:

- **combustibile**
- **comburente**
- **temperatura adeguata.**

E' da notare che la maggior parte delle combustioni avviene in **fase gassosa**.

Ciò risulta ovvio per i **combustibili** che si presentano già come gas, ma vale anche per quelli liquidi e solidi. Infatti, nel caso dei combustibili liquidi, si ha prima una evaporazione del liquido (le molecole di combustibile che si trovano in fase liquida per effetto della temperatura passano in fase gassosa) e successivamente avviene la combustione del gas. Anche nei solidi si ha prima un passaggio dalla fase solida a quella di vapore (sublimazione) di alcune sostanze che bruciano subito e solo successivamente si ha la combustione del carbonio nel residuo.

Indipendentemente dal tipo di combustibile da cui provengano, i gas combustibili si trovano a reagire con l'**ossigeno**: il **comburente**.

Il terzo requisito fondamentale è la **temperatura**, che permette di superare la barriera di attivazione. Questo può avvenire ad esempio con un **innesco**. Una volta sviluppatasi la reazione di combustione in un punto, il calore che da questa si propaga riscalda le zone circostanti: tale riscaldamento determina l'innesco di altre reazioni e quindi la **propagazione** della combustione.

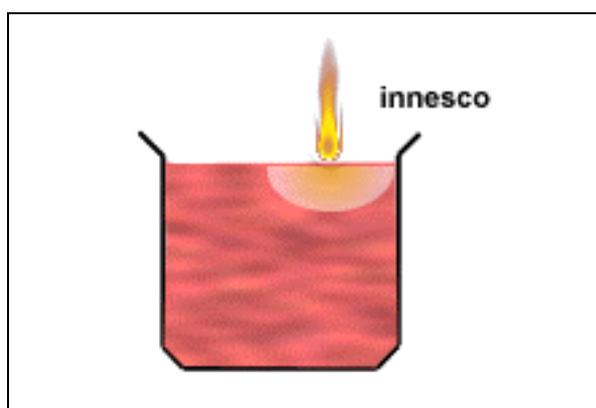


Fig.15

La **velocità** con la quale la propagazione avviene varia notevolmente in relazione alla natura del combustibile, al rapporto tra combustibile e comburente, alle dimensioni dell'ambiente di combustione, ecc.

Non è facile stabilire delle regole che permettano di prevedere la velocità di propagazione della fiamma poiché le variabili del fenomeno risultano troppo numerose.

Si può tuttavia affermare che la velocità di propagazione è tanto maggiore quanto più la quantità di combustibile e quella di comburente risultano tra loro in un rapporto prossimo a quello detto **stechiometrico**, con cui effettivamente si combinano nella reazione di combustione.

Per comprendere il fenomeno della propagazione di fiamma risultano molto importanti i seguenti parametri:

- **limite superiore ed inferiore di infiammabilità**
- **temperatura di infiammabilità**
- **temperatura di accensione.**

2.2. Limiti di infiammabilità

Come abbiamo già sottolineato, affinché la combustione avvenga è necessaria la presenza contemporanea di un combustibile, di un comburente e di una temperatura al di sopra di una certa soglia. Risulta però necessario che il rapporto tra combustibile e comburente sia compreso entro certi limiti, noti appunto come **limiti di infiammabilità**.

I limiti di infiammabilità nel caso di combustibili gassosi vengono espressi come la **percentuale in volume di combustibile nella miscela aria - combustibile**.

Si ha un **limite inferiore** ed un **limite superiore** di infiammabilità; l'intervallo di concentrazione tra questi due limiti è detto **campo di infiammabilità**.

Il limite **inferiore** rappresenta la **minima concentrazione** di combustibile nella miscela aria-combustibile che consente a quest'ultima, se innescata, di reagire dando luogo ad una fiamma in grado di propagarsi a tutta la miscela.

Il limite **superiore** rappresenta la **concentrazione massima** di combustibile nella miscela aria-combustibile che consente ancora la propagazione della fiamma a tutta la miscela.

Se nella miscela è presente un eccesso d'aria (poco combustibile), il calore sviluppato dall'innesco è insufficiente a far salire la temperatura degli strati adiacenti di miscela fino al punto di accensione. La fiamma non può propagarsi e si estingue.

Se nella miscela è presente un eccesso di combustibile (poca aria), questo funzionerà da diluente, abbassando la quantità di calore disponibile per gli strati adiacenti di miscela, fino ad impedire la propagazione della fiamma.

APPROFONDIMENTO

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.

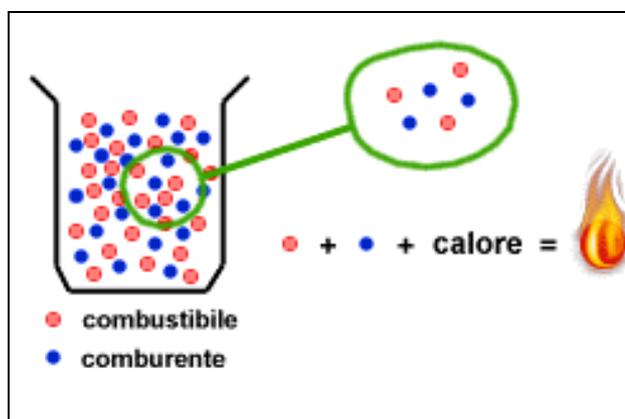


Fig.16

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.

Immaginiamo a questo punto che nel nostro recipiente ci siano più pallini scuri rispetto a quelli chiari, vale a dire, una quantità di combustibile minore di quella necessaria.

In tale eventualità accade che, il calore sprigionato dai primi due pallini molto probabilmente troverà due pallini scuri piuttosto che uno chiaro ed uno scuro, cosicché uno dei requisiti necessari alla propagazione della combustione manca e la fiamma non può propagarsi.

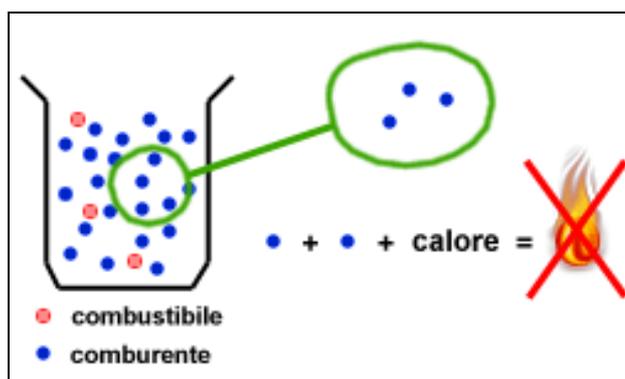


Fig.17

La concentrazione minima di palline chiare (atomi di combustibile) necessaria 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**.

Se invece nel nostro recipiente ci sono più pallini chiari rispetto a quelli scuri, cioè se la quantità di combustibile è superiore a quella di comburente, può accadere che il calore sprigionato dalla reazione troverà, in questo caso, con maggiore probabilità due pallini chiari. Anche in questa situazione la triade necessaria affinché la reazione avvenga non è soddisfatta e la combustione non può avvenire.

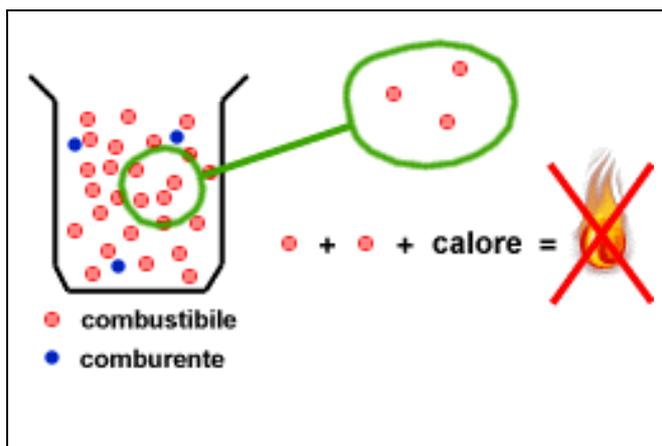


Fig.18

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

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

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 comburente / combustibile

L'ampiezza del **campo di infiammabilità** dei combustibili dipende dalla loro **reattività**, che a sua volta è determinata dal numero e dall'entità dei legami che tengono insieme gli atomi delle molecole. L'intervallo compreso tra il limite inferiore e il limite superiore di infiammabilità rappresenta il valore delle concentrazioni di combustibile entro le quali avviene propagazione della fiamma.

NOTA: in alcuni casi uno dei due limiti può non esistere; ciò accade nei composti capaci di decomporsi in modo esplosivo. Per alcune idrazine, ad esempio, non si nota limite superiore di infiammabilità. Se il comburente è un ossidante particolarmente attivo la miscela può presentare un limite inferiore di infiammabilità non calcolabile; ad esempio, in presenza di ozono anche miscele con concentrazione molto basse di combustibile possono bruciare in modo esplosivo.

I limiti di infiammabilità dipendono dalla **pressione** e dalla **temperatura**.

Pressioni più alte tendono ad allargare il campo di infiammabilità, pressioni più basse a restringerlo.

L'aumento della temperatura si allarga il campo di infiammabilità e viceversa.

Quando si introduce nell'aria una quantità di gas o di un vapore combustibile, prima che la miscela aria - combustibile divenga omogenea trascorre un certo tempo, durante il quale può accadere che alcune zone contengano il gas combustibile praticamente da solo, altre non lo contengano affatto, con estese zone a concentrazione intermedia. Mediante un innesco è possibile dar luogo ad una reazione autopropagantesi soltanto dove la composizione della miscela si trova compresa entro i limiti di infiammabilità.

Tuttavia, una volta avvenuta l'accensione, la turbolenza derivante dalla combustione a causa dell'aumento del volume e dell'espansione termica del gas - sia pure localizzata - favorisce il rimescolarsi del combustibile e del comburente e di conseguenza il propagarsi della reazione.

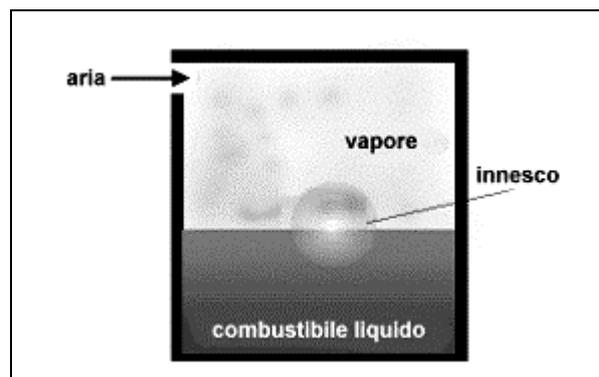


Fig.19

La velocità di propagazione risulta nulla in corrispondenza del limite inferiore e superiore di infiammabilità mentre è massima in corrispondenza del rapporto stechiometrico tra combustibile e comburente.

2.3. Temperatura di infiammabilità

La **temperatura di infiammabilità** 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.

La conoscenza della temperatura di infiammabilità risulta molto importante ai fini della conservazione e del trasporto dei combustibili liquidi.

Valori **bassi** della temperatura di infiammabilità indicano una **maggiore pericolosità** del combustibile:

- temperature inferiori ai 21°C indicano liquidi infiammabili ovvero sostanze esplosive a temperatura ambiente (ad esempio benzina ed alcol);
- temperature tra 21°C e 65°C indicano liquidi combustibili ovvero sostanze che possono esplodere solo se riscaldate;
- temperature superiori ai 65°C indicano liquidi che possono bruciare (gasolio, olio combustibile e lubrificanti).

Sostanza	Temperatura di infiammabilità (°C) (Valori indicativi)
Acetone	-18
Benzina	-20
Gasolio	65
Alcol etilico	13
Alcool metilico	11
Toluolo	4
Olio lubrificante	149

2.4. Temperatura di accensione

La **temperatura di accensione** rappresenta la temperatura minima alla quale un combustibile, riscaldato in presenza d'aria, brucia **senza necessità di innesco**.

La temperatura di accensione è molto importante non solo nel campo antincendio, ad es. 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.

Sostanza	Temperatura di accensione (°C) (Valori indicativi)
Acetone	540
Benzina	250
Gasolio	220
Idrogeno	560
Alcool metilico	455
Carta	230
Legno	220-250
Gomma sintetica	300
Metano	537

2.5. Esplosione, deflagrazione e detonazione

Se una reazione esotermica avviene in uno spazio delimitato, spesso il calore svolto non può essere dissipato. Come risultato la temperatura aumenta, la velocità di reazione cresce e ciò determina un ulteriore aumento nella velocità di produzione del calore. La velocità di reazione cresce senza limite ed il risultato è chiamato **esplosione termica**.

La rapida e localizzata liberazione di energia determinata dall'esplosione provoca considerevoli **effetti meccanici**.

Il verificarsi o meno di una esplosione dipende, oltre che dalle caratteristiche della miscela, dalla **pressione** e dalla **temperatura**.

Secondo il meccanismo termico dell'esplosione esiste, per una determinata composizione del sistema e per una determinata temperatura, una **pressione critica** al di sotto della quale si ha una reazione lenta e al di sopra della quale la reazione diventa esplosiva.

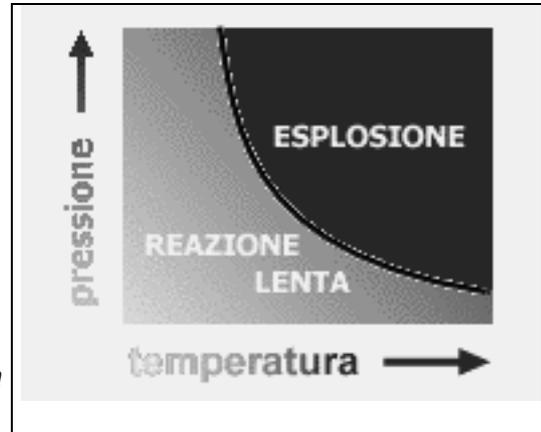


Fig.20 - Pressione critica

Affinché l'esplosione possa avvenire occorre che la composizione della miscela sia compresa entro certi **limiti** detti **di esplosività**. All'esterno di tali limiti la miscela può ancora reagire, ma con velocità bassa non esplosiva. Il campo di esplosività è quindi interno al campo di infiammabilità.

Il **limite inferiore di esplosività** è la più bassa concentrazione in volume di vapore di combustibile nella miscela al di sotto della quale non si ha esplosione in presenza di innesco.

Il **limite superiore di esplosività** è la più alta concentrazione in volume di vapore di combustibile nella miscela al di sopra della quale non si ha esplosione in presenza di innesco.

Tali limiti sono molto ampi per certe miscele. Ad esempio:

- la miscela acetilene-aria è esplosiva entro i limiti del 3 e 53% in volume di acetilene
- quella idrogeno-aria fra il 10 ed il 66% in volume di idrogeno.

Per altre miscele invece i limiti sono molto ristretti: ad esempio, la miscela benzina-aria è esplosiva all'incirca entro i limiti dell'1 e 6% in volume di vapori del combustibile.

Quando la reazione di combustione si propaga alla miscela infiammabile non ancora bruciata con una velocità minore di quella del suono, l'esplosione è chiamata **deflagrazione**.

Quando la reazione procede nella miscela non ancora bruciata con una velocità superiore a quella del suono (velocità di propagazione supersoniche dell'ordine del chilometro al secondo), l'esplosione è detta **detonazione**. Gli effetti distruttivi delle detonazioni sono maggiori rispetto a quelli delle deflagrazioni.

Qualitativamente si può affermare che:

- le probabilità di esplosione (detonazione o deflagrazione) crescono nell'intorno della composizione stechiometrica;
- un intervallo ampio di infiammabilità, come ad esempio quello dell'idrogeno che va dal 4 al 75% in volume, è indice di particolare reattività e quindi di rischio di esplosione;
- un intervallo ristretto di infiammabilità fa pensare, all'opposto, ad un evolversi lento della combustione.

In mancanza di informazioni sicure o di dati sperimentali è comunque prudente considerare ogni miscela di combustibile e di comburente in fase gassosa come **potenzialmente esplosiva** se la sua composizione è compresa entro i limiti di infiammabilità.

3. PARAMETRI DELLA COMBUSTIONE

3.1. Generalità

Vedremo ora tre parametri importanti delle combustioni:

- il **potere calorifico** dei combustibili
- l'**aria** teorica **necessaria** alla combustione
- la **temperatura teorica di combustione**.

3.2. Potere calorifico

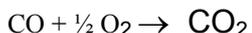
Il potere calorifico indica la quantità di calore (espresso in kcalorie o in milioni di joule - MJ) sviluppata dalla combustione di una quantità unitaria di combustibile (espressa in kg per i combustibili solidi e liquidi, in metri o in decimetri cubici misurati in condizioni normali, cioè a pressione atmosferica e a 0°C per i gas).

L'**unità di misura** utilizzata per esprimere tale parametro è **MJ/kg** (mega Joule per chilogrammo) o **kcal/kg** (chilo calorie per chilogrammo). Un MJ corrisponde a 238 kcal.

Tenendo conto che nella combustione dell'idrogeno si formano molecole d'acqua, possono esistere due definizioni del potere calorifico, derivanti da due diversi modi di misura dello stesso:

- il **potere calorifico superiore**, per il quale si considera il calore sviluppato dalla reazione allorché tutti i prodotti della combustione sono alla temperatura ambiente e quindi l'acqua prodotta è allo stato liquido;
- il **potere calorifico inferiore**, per il quale invece si considera l'acqua prodotta allo stato di vapore.

Per i combustibili che non contengono idrogeno, né acqua alloro interno, non risulta alcuna differenza tra potere calorifico superiore ed inferiore. E' il caso, ad esempio, dell'ossido di carbonio:



Poteri calorifici dei principali combustibili

Combustibile	Potere Calorifico Inferiore			Potere calorifico Superiore		
	MJ/kg	MJ/Nm ³	MJ/dm ³	MJ/kg	MJ/Nm ³	MJ/dm ³
Benzina	-	-	31,4	-	-	33,8
Coke	29,0	-	-	30,0	-	-
Gas naturale	-	34,5	-	-	38,5	-
Gasolio	-	-	35,5	-	-	37,9
G.P.L.	46,0	-	25,0	50,0	-	27,2
Legna secca	16,7	-	-	18,4	-	-
Olio combustibile	41,0	-	-	43,8	-	-

3.3. Aria necessaria per la combustione

E' la quantità di aria necessaria per bruciare completamente un Kg o un m³ di combustibile.

L'ossigeno è in pratica fornito dall'**aria**, in cui è contenuto nel rapporto in volume di 1/5 circa (la restante parte è azoto più tracce di altri gas).

Composizione dell'aria (percentuali in volume):

OSSIGENO	AZOTO	ANIDRIDE CARBONICA	ARGON
20.95%	78,08%	0.033%	0.934%

Nell'aria esistono poi altri componenti minori.

La quantità di aria strettamente necessaria alla combustione dipende dalla composizione chimica del combustibile: l'aria necessaria è tanto maggiore quanto più elevato è il potere calorifico del combustibile.

Aria teorica occorrente per la combustione

Combustibile	Aria teorica Nm³/kg combustibile
Legna secca	5,7
Gas naturale	9,5 Nm ³ / Nm ³ combustibile
Gasolio	11,8
Coke	8,2
Olio combustibile	11,2
Idrogeno	28,6
Cellulosa	4,0
Benzina	12,0
Propano	13

3.4. Temperatura della combustione

La temperatura della combustione è la **massima temperatura** alla quale possono essere portati, **teoricamente**, i prodotti di combustione dal calore svolto dalla combustione stessa.

La temperatura di combustione è condizionata dal potere calorifico del combustibile e dalla capacità termica dei prodotti di combustione.

Il **calcolo** della temperatura teorica di combustione viene eseguito nell'ipotesi che tutta l'energia liberata dalla reazione vada esclusivamente ad aumentare la temperatura, senza che vi siano scambi di calore con l'esterno né perdite dovute a conversioni di energia termica in energia radiante (in realtà 1/3 dell'energia termica prodotta è convertita in energia radiante).

Nella valutazione di tale parametro si deve tenere conto della **dissociazione**, i cui effetti diventano sensibili a temperature superiori a 1500°C. A tale temperatura infatti non è più possibile trascurare la dissociazione parziale delle molecole dei costituenti del gas di combustione. Tali reazioni, fortemente endotermiche, comportano una temperatura finale più bassa di quella calcolata in assenza di dissociazione.

Nelle combustioni reali, inoltre, bisogna prendere in considerazione l'eventuale **eccesso d'aria** impiegato, oltre alla temperatura alla quale l'aria si trova all'inizio della combustione (**preriscaldamento**).

Da quanto detto risulta che le temperature **teoriche** di combustione sono sempre **maggiori** di quelle **reali**.

Temperature teoriche massime di combustione confrontate con quelle massime effettive misurate realmente

Sostanza	TEMPERATURA DI COMBUSTIONE	
	Massima teorica	Massima reale
Metano	2.218°C	1.880°C
Etano	2.226°C	1.895°C
Propano	2.232°C	1.925°C
Butano	2.237°C	1.895°C
Fiammifero	-	Oltre 1.000°C

4. COMBUSTIBILI

4.1. Generalità

Si definiscono **combustibili** le sostanze in grado di reagire con l'**ossigeno** (o con un altro **comburente**) dando luogo ad una reazione di **combustione**.

I componenti principali dei combustibili sono il **carbonio** (C) e l'**idrogeno** (H).

I vari tipi di combustibili possono essere classificati in base allo **stato fisico** (a temperatura e pressione ambiente) differenziandosi in combustibili **solidi**, **liquidi**, e **gassosi**.

Un'altra classificazione possibile si basa sull'origine dei combustibili, distinguendo tra combustibili **naturali** e **derivati**. I combustibili naturali si adoperano così come si trovano in natura, quelli derivati vengono forniti quali prodotti di trasformazione di combustibili naturali o di particolari lavorazioni industriali.

Classificazione dei combustibili

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

4.2. Combustibili solidi

I **combustibili solidi** sono i più abbondanti e quelli che vengono usati da più tempo. Ad essi appartiene il più antico ed il più noto fra i combustibili: il **legno**. Questo si produce continuamente nelle piante come risultato di sintesi biochimiche tra l'anidride carbonica e l'acqua con l'utilizzazione dell'energia solare.

Il **legno** è costituito da cellulosa (il componente fondamentale), lignina, zuccheri, resine, gomme e sostanze minerali varie, che danno luogo, al termine della combustione, alle ceneri. Stesse caratteristiche presentano tutte le sostanze che derivano dal legno come la carta, il lino, la juta, la canapa, il cotone, ecc. Il grado di combustibilità di tutte queste sostanze, può essere alterato a seguito di particolari trattamenti (ad es. pittura).

Il legno può bruciare con fiamma più o meno viva - o addirittura senza fiamma - o carbonizzare a seconda delle condizioni in cui avviene la combustione.

La temperatura d'accensione del legno è di circa 250°C, tuttavia se il legno è a contatto con superfici calde per molto tempo possono avvenire fenomeni di carbonizzazione con possibilità di accensione spontanea a temperature anche molto minori.

Una caratteristica importante del legno per quanto riguarda la combustione è la **pezzatura**, definita come il rapporto tra il volume del legno e la sua superficie esterna. Una grande pezzatura vuol dire che le superfici a contatto con l'aria sono relativamente scarse mentre è grande la per disperdere il calore.



Fig. 21 - Pezzatura del legno.

In generale, quando il combustibile è suddiviso in piccole particelle, la quantità di calore da somministrare è tanto più piccola quanto più piccole sono le particelle, sempre che naturalmente si raggiunga la temperatura di accensione. Così il legno che in grandi dimensioni può essere considerato un materiale difficilmente combustibile, quando invece è suddiviso allo stato di segatura o addirittura di polvere può dar luogo addirittura ad esplosioni.

Per un combustibile solido diventa quindi fondamentale la sua **suddivisione**. Una grossa pezzatura comporta un basso rischio di incendio, mentre con una pezzatura piccola lo stesso materiale risulta molto pericoloso.

Va notato che nel caso di materiali di grossa pezzatura diventa rilevante non solo il fatto che la sorgente di calore abbia una temperatura elevata ma anche il **tempo di esposizione** alla sorgente di calore.

La bassa conduttività termica del legno (proprietà di trasmettere il calore) determina una minore velocità di propagazione della combustione.

La composizione del legno e degli altri principali combustibili solidi è mostrata in tabella.

Altri combustibili solidi

I **carboni fossili** sono combustibili solidi naturali prodotti dalla lenta trasformazione del legno di antiche piante ad alto fusto sottoposto all'azione di alte pressioni e temperature nel sottosuolo.

L'unica eccezione è costituita dalla **torba**, che deriva dalla trasformazione del materiale organico di alghe e muschi, ma non è molto usata come combustibile a causa dell'alto contenuto di acqua, della scarsa percentuale di carbonio e dell'eccessiva produzione di ceneri in seguito alla sua combustione. Attualmente il suo principale impiego è come concime per giardinaggio.

I carboni originati dal legno di antiche piante possono essere classificati in tre categorie: **lignite, litantrace, antracite**.

Le **ligniti** si trovano ad uno stato di carbonizzazione non molto avanzato (di qui il nome) e, dato l'elevato contenuto in acqua, trovano scarso impiego come combustibili.

Le **litantraci** costituiscono il carbon fossile propriamente detto, hanno elevato contenuto in carbonio, scarsissimo contenuto di acqua e ceneri ed una discreta percentuale di sostanze volatili.

Normalmente non vengono usate direttamente come combustibili, ma impiegate per la produzione di *carbon coke* mediante riscaldamento, in ambiente privo di ossigeno,

Composizione dei principali combustibili solidi

Combustibile	C%	H%	O%	Ceneri	Potere cal. kcal/kg	Impieghi
Legna	50%	6%	44%	1-3%	300-3500	Combustibile ad uso domestico.
Torba	60	6	34	25 e oltre	4000-4500	Concimazione e arricchimento di terreni agricoli.
Lignite	65-75	5-6	19-29	10-25	4000-6000	Combustibili a scarso valore (si ottengono idrocarburi).
Litantrace	75-93	4-6	6-20	4-7	7200-8800	Uso industriale
Antracite	93-95	2-4	<3	<3	7700-8500	Ottimo combustibile per uso civile e industriale

a temperature superiori ai 1000° C. Durante questo processo si separano anche svariati prodotti gassosi, che vengono raccolti e raffreddati. In seguito al raffreddamento una parte di essi condensa e forma *catrami*, mentre la parte che non condensa viene raccolta ed utilizzata come combustibile gassoso.

L'**antracite** è il carbone al più avanzato stato di carbonizzazione (e perciò con il più elevato contenuto di carbonio: oltre il 95%) e viene utilizzata direttamente come combustibile, senza essere sottoposta a lavorazioni.

Il **carbon coke**, prodotto per riscaldamento della litantrace, è più adatto di quest'ultima ad essere usato come combustibile. Dalle litantraci a corta fiamma si produce il coke metallurgico, largamente impiegato nell'industria siderurgica, da quelle a lunga fiamma si ottiene il coke da gas, usato per il riscaldamento domestico.

La **carbonella** normalmente usata nei barbecue non è un combustibile fossile, ma un combustibile solido artificiale prodotto per riscaldamento della legna in assenza di ossigeno e per questo motivo viene chiamata *carbone di legna*. Oggi non ha alcuna importanza industriale, ma è stato il primo combustibile artificiale usato dall'uomo. Tradizionalmente veniva prodotto nelle cosiddette *carbonaie*, mucchi di legno coperti di terra per impedire il contatto con l'ossigeno dell'aria.

Gli **agglomerati** sono prodotti per compressione di torbe, ligniti o polveri residue della lavorazione dei carboni più pregiati fino ad ottenere mattonelle o bacchette (eventualmente con l'aiuto di sostanze agglomeranti) che vengono usate come combustibile domestico.

4.3. Combustibili liquidi

I **combustibili liquidi** sono, tra i combustibili, quelli che presentano il più elevato potere calorifico per unità di volume. Vengono adoperati sia nei motori che negli impianti di riscaldamento.

I combustibili liquidi artificiali sono pochi e di scarsa importanza, mentre ben più importante è la classe dei combustibili liquidi naturali, alla quale appartengono i **petroli**.

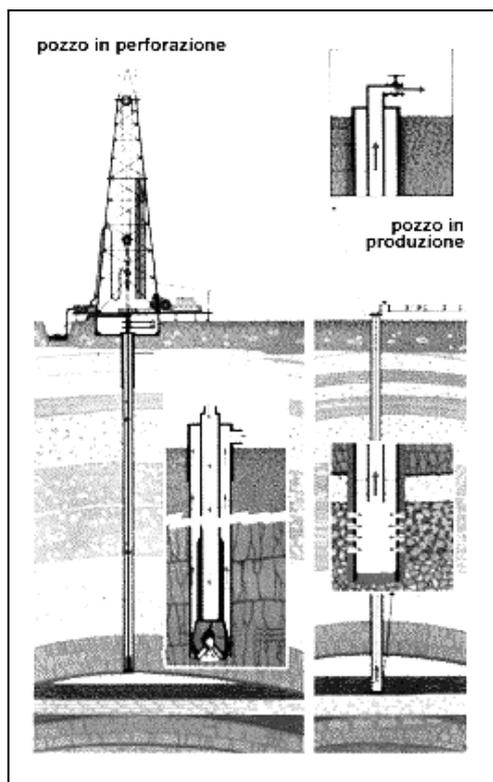


Fig.22 - Pozzo di petrolio

Il petrolio non è un'unica sostanza, ma una miscela formata prevalentemente da un gran numero di idrocarburi (composti chimici formati esclusivamente da carbonio ed idrogeno) con proprietà chimiche e fisiche molto diverse. Nei diversi tipi di petroli possono essere presenti anche sostanze diverse dagli idrocarburi, ad esempio composti dello zolfo (che determinano il tenore di zolfo), che sono una delle principali cause dell'inquinamento da anidride solforosa nelle grandi città.

Si deve tenere presente che, anche se il petrolio nel suo complesso è un liquido, i diversi idrocarburi che lo compongono possono essere liquidi, solidi o gassosi.

Il petrolio viene estratto in diverse regioni del mondo mediante l'uso di pozzi e piattaforme marine. Esso deriva dalla lenta trasformazione, a pressioni elevate ed in assenza di aria, di **materiali organici** accumulatisi su fondale di bacini marini e portati nel sottosuolo dall'evoluzione geologica.

Il petrolio appena estratto è chiamato **greggio** e non viene usato come tale, ma trasportato in diversi modi (oleodotti, navi cisterna) fino a particolari impianti, chiamati **raffinerie**, nei quali viene lavorato per ottenere i suoi derivati più importanti.

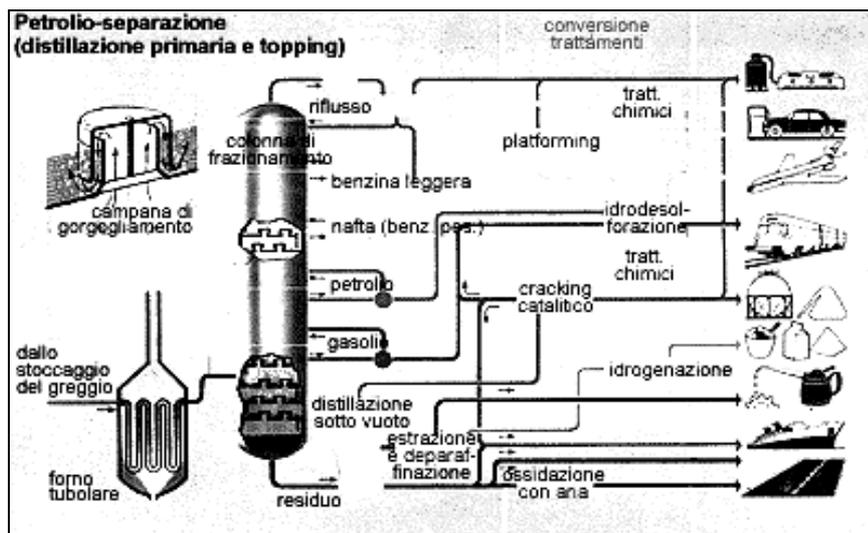


Fig. 23 – Ciclo del petrolio

La principale lavorazione a cui viene sottoposto il greggio è la **distillazione**. Questa è una tecnica che consente di separare i diversi componenti di una miscela liquida scaldandola lentamente e raccogliendo i vapori delle sostanze componenti man mano che evaporano alle diverse temperature.

La prima grossolana distillazione consente di separare frazioni che distillano in intervalli di temperatura piuttosto ampi. Successivamente queste frazioni vengono ulteriormente distillate per ottenere i prodotti finali: gas di raffineria, benzine, cherosene, gasolio. La parte liquida che rimane come residuo della distillazione costituisce gli oli pesanti, quella solida il bitume.

Le **benzine** sono la frazione che si separa fra i 60° ed i 200°C ed il loro impiego più importante è come carburanti nei motori a scoppio, ad esempio nelle automobili;

il **cherosene** è la frazione che distilla fra 160° e 270°C, molto usata nel riscaldamento domestico;

il **gasolio** quella che distilla fra 250° e 340°C, che trova l'impiego più importante quale combustibile dei motori Diesel.

Gli **oli pesanti** vengono di solito sottoposti a trattamenti che consentono di trasformarli in benzine, ben più preziose, mentre il **bitume** viene usato prevalentemente per la pavimentazione delle strade.

L'indice della maggiore o minore **combustibilità** di un liquido è fornito dalla temperatura di infiammabilità, in base alla quale i combustibili liquidi vengono così classificati:

- **categoria A:** liquidi aventi temperatura di infiammabilità inferiore a 21°C
- **categoria B:** liquidi aventi temperatura di infiammabilità compresa tra 21°C e 65°C
- **categoria C:** liquidi aventi temperatura di infiammabilità oltre 65° e fino a 125°C

Combustibili liquidi

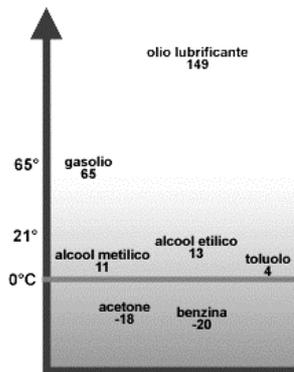


Fig. 24

Sostanza	Temperature 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

Fig.25

Tanto più è **bassa** la temperatura di infiammabilità tanto maggiori sono le probabilità che si formino vapori in quantità tali da essere incendiati.

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

Un'ultima considerazione si deve fare a proposito della **densità** dei vapori infiammabili, definita come la massa per unità di volume di vapori del combustibile.

I vapori **più pesanti dell'aria**, in assenza o scarsità di ventilazione tendono ad accumularsi e a ristagnare nelle zone basse dell'ambiente formando facilmente miscele infiammabili.

4.4. Combustibili gassosi

I combustibili gassosi più importanti sono senza dubbio il **metano**, l'**etano**, il **propano** e il **butano** (il primo è il comune gas usato nelle grandi città, miscele di propano e butano costituiscono il gpl contenuto, ad esempio, nelle bombole dei fornelli da campeggio).

Questi combustibili possono essere **trasportati e distribuiti con facilità** allacciando le abitazioni direttamente alla rete delle società del gas, od a piccoli depositi locali. Altro vantaggio è la **facilità di regolazione** del flusso di gas e quindi della quantità di calore prodotta.

Il **metano**, gas naturale, è molto diffuso nel sottosuolo di un gran numero di paesi, inclusa l'Italia, e spesso si trova associato ai giacimenti petroliferi.

L'uso principale del metano è nelle attività domestiche (fornelli ed impianti di riscaldamento a gas), ma non mancano naturalmente gli impieghi industriali.

Fra i combustibili gassosi artificiali merita un cenno l'**idrogeno**, ottenuto a partire dall'acqua attraverso un procedimento chiamato *idrolisi* ed attualmente oggetto di un gran numero di studi per il suo possibile impiego come combustibile pulito (l'unico prodotto della sua combustione è infatti il vapore d'acqua).

I **gas** vengono divisi in:

- gas leggeri
- gas pesanti.

Si definisce **gas leggero** un gas avente peso minore dell'aria (idrogeno, metano, ecc.). Quando liberato dal proprio contenitore tende a disperdersi salendo nell'atmosfera.

Si definisce **gas pesante** un gas avente peso superiore rispetto all'aria (GPL, acetilene, ecc.). Un gas pesante quando liberato dal proprio contenitore tende a stratificare e a permanere nella parte bassa dell'ambiente.

4.5. Conservazione dei gas

Sono definiti gas solo quelle sostanze che si trovano allo stato gassoso nelle condizioni normali di pressione e di temperatura (pressione atmosferica, 15°C).

I gas vengono pertanto conservati all'interno di **contenitori** (grandi serbatoi , bombole, bottiglie ecc.), **sotto pressione** ed a volte **liquefatti** in maniera da consentire un maggiore stoccaggio.

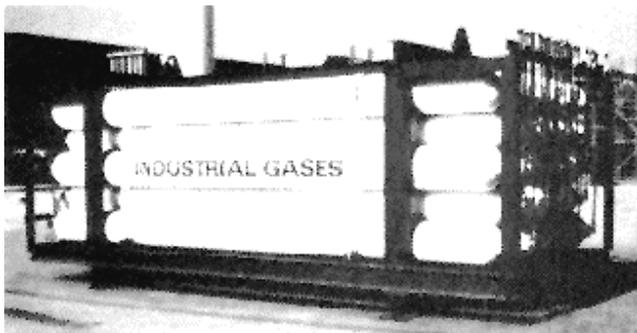


Fig.26 - Contenitori di gas sotto pressione.

Gas compressi - Sono quelli conservati allo stato gassoso sotto pressione alla temperatura ambiente in appositi recipienti (bombole). Tali recipienti vengono riempiti di gas fino al raggiungimento di una data pressione di carica che è funzione della resistenza della bombola stessa.

Pressione di carica di gas comuni

Gas	Pressione di stoccaggio (kg/cm ²)
Metano	300
Idrogeno	250
Gas nobili	250
Ossigeno	250
Aria	250

Gas liquefatti - Sono quelli (butano, propano, ammoniaca, cloro) che alla temperatura ambiente vengono conservati in appositi recipienti allo stato **liquido** sotto una pressione relativamente bassa (meno di 10 atmosfere).

Il gas liquefatto è molto più concentrato di quelli compressi (1 litro di gas liquefatto può sviluppare nel passaggio di fase fino a 800 litri di gas). Il riempimento del recipiente non deve essere mai completo in quanto un aumento della temperatura provocherebbe un aumento di volume del liquido ed un aumento della pressione, per cui il recipiente potrebbe scoppiare. Per evitare tale rischio, è prescritto un **limite massimo di riempimento**.

Grado di riempimento per gas liquefatti

Gas liquefatto	Grado di riempimento (kg/dm³)
Ammoniaca	0,53
Cloro	1,25
Butano	0,51
Propano	0,42
GPL miscela	0,43-0,47
CO ₂	0,75

Gas criogenici - Sono conservati allo stato **liquido** in particolari contenitori, a **temperature e pressioni relativamente basse**. La temperatura dell'ambiente circostante può generare aumenti di pressione; è necessario quindi rendere possibile una minima evaporazione, che consenta di "smaltire", come calore di evaporazione, il calore assorbito dall'ambiente esterno.

Gas disciolti - Sono conservati in fase gassosa disciolti entro un **liquido** ad una determinata pressione (ad esempio, acetilene disciolto in acetone, anidride carbonica disciolta in acqua gassata-minerale).

5. ESPLOSIVI

5.1. Generalità

Gli **esplosivi** sono sostanze o miscugli di sostanze capaci di trasformarsi, molto rapidamente, in gas ad alta temperatura sotto l'influenza di azioni esterne, raggiungendo un volume molto maggiore di quello iniziale. La reazione veloce e violenta (**esplosione**) a cui danno luogo genera particolari e caratteristici **fenomeni fisici** (luce, suono, spostamento di materiali ecc.).

La **capacità distruttiva** delle sostanze esplodenti non sta nel fatto che provocano reazioni fortemente esoergoniche (un esplosivo come la nitroglicerina libera 6,4 MJ/kg rispetto all'olio combustibile, che libera ben 41,9 MJ/kg) quanto piuttosto nell'estrema rapidità con cui tale energia viene liberata, cioè nell'estrema **velocità delle reazioni**. Basti pensare che le combustioni ordinarie avvengono nell'ordine dei minuti o dei secondi, le deflagrazioni nell'ordine del secondo o meno e le detonazioni in tempi inferiori al decimillesimo di secondo.

La velocità delle esplosioni è dovuta al fatto che gli esplosivi contengono nelle loro molecole ossigeno sufficiente all'ossidazione parziale o totale dei reagenti.

Non sempre le sostanze esplosive si manifestano come tali; molte di esse in determinate condizioni (al di fuori dei limiti di esplosività) possono bruciare anziché esplodere.

Si chiama **bilancio di ossigeno** la quantità di ossigeno in eccesso o difetto contenuto nell'esplosivo rispetto alla quantità necessaria ad ossidare tutto il carbonio in anidride carbonica e tutto l'idrogeno in acqua. Rispetto a quest'ultima il bilancio di ossigeno viene indicato **percentualmente**. E' indicato col segno **+** quando l'ossigeno è in eccesso e con il segno **-** quando è in difetto.

Quando un esplosivo è formato da un unico composto chimico e ha un bilancio positivo di ossigeno, l'esplosivo si dice **completo**.

Un fattore importantissimo nell'impiego di un esplosivo è la **sicurezza** durante tutte le fasi, che vanno dal momento della fabbricazione fino a quello dell'impiego.

Un esplosivo sicuro deve avere innanzitutto una bassa sensibilità alle sollecitazioni meccaniche ed una buona stabilità chimica. Infine, in impieghi particolari quali quelli minerari, il bilancio di ossigeno deve essere positivo e l'esplosione non deve dar luogo a fiamme o a temperature particolarmente elevate.

5.2. Caratteristiche degli esplosivi

Le principali caratteristiche degli esplosivi sono:

- densità di caricamento
- sensibilità
- calore di esplosione
- stabilità
- pressione specifica o forza specifica
- temperatura di esplosione.

Densità di caricamento - E' il rapporto tra la massa di esplosivo ed il volume della cavità in cui è inizialmente contenuto; si misura in kg/dm^3 . Per ogni esplosivo è stata calcolata una **densità limite** di caricamento, al di sopra della quale si sviluppa, durante l'esplosione, una pressione talmente grande per cui viene spezzato qualunque tipo di involucro per quanto resistente esso sia.

Sensibilità - E' l'attitudine di un esplosivo ad iniziare più o meno facilmente la sua decomposizione sotto l'azione di un impulso esterno. Il grado di sensibilità all'urto o al calore dipende essenzialmente dalla **natura chimica** dell'esplosivo, ma può essere modificato da altri fattori quali lo stato fisico, la struttura, l'umidità. A seconda della maggiore o minore sensibilità di un esplosivo, ne varia il mezzo d'innescò, cioè tutto ciò che può fornire l'impulso iniziale capace di determinare la reazione di decomposizione in una massa esplosiva.

Per gli esplosivi più sensibili basterà un piccolo urto o sfregamento; per gli esplosivi meno sensibili sarà necessario un urto più forte o l'accensione per mezzo di un corpo in ignizione; per altri, meno sensibili ancora, ci vorrà un urto ancora più violento.

Calore di esplosione - E' il calore liberato dall'unità di massa di un esplosivo all'atto della sua decomposizione. Viene espresso in kJ/kg (o anche in kcal/kg). Rappresenta il **potenziale** dell'esplosivo, ovvero il lavoro massimo che si può ottenere dall'esplosione di un chilo di esso.

Esplosivo	Calore di esplosione(kJ/kg)
Nitroglicerina	6610
Polvere nera	2900
Tritolo	3980

Stabilità - E' l'attitudine che gli esplosivi hanno a mantenersi inalterati più o meno a lungo. Sulla stabilità hanno influenza la struttura chimica, le materie prime utilizzate nella fabbricazione, il modo di conservazione, la presenza di corpi estranei, il calore, la luce, l'umidità. Un esplosivo a bassa stabilità può, decomponendosi lentamente, dar luogo in qualche punto della sua massa ad un aumento di temperatura, che, accelerando la reazione di decomposizione, può trasformarla in esplosione. La stabilità degli esplosivi deve essere controllata non solo all'atto della loro fabbricazione, ma anche periodicamente durante la loro conservazione.

Pressione specifica o forza specifica - Fra le varie caratteristiche degli esplosivi è quella di maggior interesse *pratico*. E' pari alla pressione in bar che 1 kg di esplosivo è in grado di esercitare quando l'esplosione avviene dentro il volume di un litro. Essa viene presa come termine di confronto dell'effetto di un esplosivo. Si determina mediante manometri a schiacciamento.

Esplosivo	Forza specifica (1 litro * bar)
Nitroglicerina	10200
Nitrato d'ammonio	5185
Tritolo	8100
Polvere nera	≈3000

Temperatura di esplosione - E' la temperatura che viene raggiunta durante l'esplosione. In tabella sono riportate alcune delle temperature di esplosione calcolate matematicamente; in realtà le temperature reali risultano inferiori a quelle calcolate poiché una parte del calore di esplosione va perduto per conduzione o irraggiamento.

Esplosivi	Temperatura di esplosione °C
Nitrato di ammonio	1120
Polvere nera	2770
Fulminato di mercurio	3530
Tritolo	2190
Nitroglicerina	3470

Volume specifico - E' il volume di gas che 1kg di esplosivo può sviluppare. Per poter confrontare tra di loro i vari esplosivi, ci si riferisce all'unità di massa l/kg. In tabella sono riportati alcuni valori del volume specifico calcolati a pressione atmosferica e a 15°C.

Esplosivo	Volume (litri / kg di gas)
polvere nera	285
Nitroglicerina	752
Nitrato d'ammonio	937

Poiché un gas occupa un volume tanto maggiore quanto più alta è la temperatura a cui si trova, ad una maggiore quantità di calore che si libera durante l'esplosione (e quindi ad una maggiore temperatura di esplosione dei gas formati) corrisponde un maggior volume occupato dai prodotti di combustione.

5.3. Classificazione degli esplosivi

Gli esplosivi possono essere distinti in base alla **velocità** con la quale la **reazione** di combustione si propaga nella massa dell'esplosivo stesso, oppure in base alla loro **natura chimica**.

In base al primo criterio si distinguono:

- esplosivi **deflagranti** o **propellenti**
- esplosivi **dirompenti**
- esplosivi **detonanti** o **innescanti**.

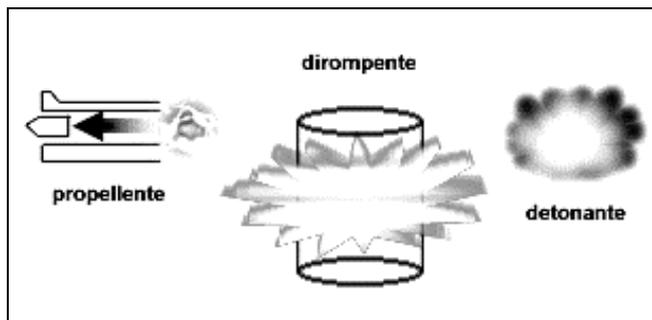


Fig.27 - Tipi di esplosivi.

Esplosivi deflagranti o propellenti - Sono quelli in cui la progressione lenta della reazione si traduce in un'azione prevalentemente **di spinta**, generalmente utilizzata nelle armi da fuoco, nei razzi e in pirotecnica. Infatti nella deflagrazione la reazione di decomposizione veloce e graduale si propaga da strato a strato di esplosivo. Se l'esplosivo che si decompone con deflagrazione è racchiuso, ad esempio, nella camera a scoppio di un'arma, la deflagrazione provoca un aumento graduale della pressione, con la tendenza ad allargare il recipiente che lo contiene più che a romperlo. Per tale motivo questi tipi di esplosivo risultano adatti a spingere un proiettile fuori da una canna (da cui il nome di propellenti). Ne è un esempio la polvere nera.

Esplosivi dirompenti - Sono caratterizzati dalla capacità di reagire istantaneamente solo in presenza di una elevata energia di attivazione esterna. La reazione di decomposizione (detonazione) avviene ad elevatissima velocità e l'azione meccanica dei gas prodotti si esplica istantaneamente. L'immediato aumento di pressione, prodotto dai gas che si formano durante la reazione, produce la **rottura** violenta dei recipienti nei quali sono contenuti (da cui l'attributo dirompenti). Ne sono un esempio la nitroglicerina e il tritolo.

Esplosivi detonanti o innescanti - Si distinguono nettamente da tutti gli altri esplosivi per la loro grandissima sensibilità. Quando per una azione esterna (urto, sfregamento, ecc.) inizia la loro decomposizione, anche all'aria libera, questa procede a velocità elevatissime, conducendo sempre alla **detonazione**. Questo tipo di esplosivi trovano impiego come sostanze innescanti primarie, essendo sufficiente un urto o uno sfregamento a farli detonare e a trasmettere o la fiamma o la detonazione ad altri esplosivi. Ne sono un esempio il fulminato di mercurio, l'azotidrato di piombo, la pentrite.

Dal punto di vista **chimico** si possono distinguere:

- **miscugli esplosivi gassosi**
- **esplosivi chimici**

Miscugli esplosivi gassosi - Sono formati da più sostanze (che in generale da sole non hanno proprietà esplosive), alcune delle quali agiscono come comburenti ed altre come combustibili.

Esplosivi chimici - Si dividono in **inorganici** (ad esempio clorato di potassio) ed **organici** (ad esempio tritolo, nitroglicerine). Quelli organici contengono nella stessa molecola tutti gli elementi necessari per una combustione più o meno completa. L'ossigeno in essi contenuto ossida nella reazione esplosiva il carbonio e l'idrogeno che nella stessa molecola sono presenti. Per queste ragioni la reazione di esplosione dei composti chimici organici è più violenta che nel caso dei miscugli.

5.4. Tipi di esplosivi

Vediamo ora in dettaglio alcuni degli esplosivi più utilizzati:

Nitroglicerina - Fu scoperta nel 1847, ma la sua pericolosità non ne fece intravedere le possibilità di utilizzo. Soltanto dopo il 1863 Nobel risolse il problema di diminuirne il pericolo, dovuto all'elevata sensibilità all'urto, facendola assorbire a farina fossile e ottenendo così la **dinamite**.

La trinitroglicerina, una delle 5 nitroglicerine possibili, è la più esplosiva. E' un liquido denso, incolore e viscoso, non è solubile in acqua ma in solventi organici (etere, acido acetico, ecc.).

Le nitroglicerine sono velenose.

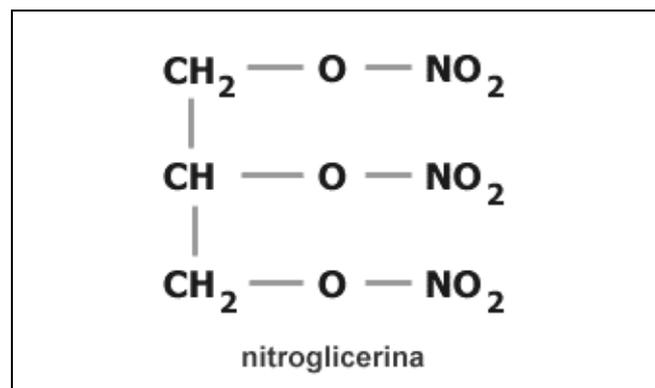


Fig.28 - Struttura della nitroglicerina

Pentrite (tetranitropentaeritrite) - Buon esplosivo, la sua fabbricazione non richiede tutte quelle precauzioni necessarie per la glicerina essendo relativamente stabile. Si può lavorare in grandi quantità e conservare senza correre grandi pericoli.

Si presenta sotto forma di cristalli bianchi fondenti a 140°C

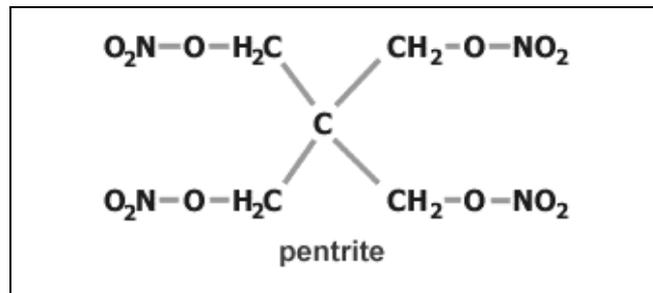


Fig.29 - Struttura della pentrite

Tritolo (trinitrotoluene) - E' il miglior esplosivo militare da scoppio, mentre è poco adatto all'uso in miniera in quanto dalla sua combustione si libera molta CO che inquinerebbe l'aria delle gallerie. E' una sostanza cristallina, di colore giallo scuro, insolubile in acqua ma solubile in solventi organici. Le caratteristiche esplosive sono modeste, ma il costo di produzione è molto basso. Acceso con una fiamma brucia lentamente senza esplodere. E' stabile all'urto.

Polvere nera – E' il primo esplosivo impiegato nella storia. E' costituito da un miscuglio di carbone di legna, zolfo e nitrato di potassio. Viene ora impiegato nella fabbricazione di micce a lenta combustione. Le reazioni chimiche che avvengono durante l'esplosione della polvere nera variano a seconda che questa avvenga all'aria libera a pressione ordinaria, oppure sotto pressione; variano anche a seconda delle percentuali di zolfo e di carbone presenti.

Dinamiti - Si chiamano dinamiti gli esplosivi che contengono come componente essenziale la nitroglicerina mescolata con altre sostanze che l'assorbono (farina fossile). Inizialmente la dinamite venne usata come esplosivo al posto della nitroglicerina, che è molto poco sicura sia nella manipolazione che nel trasporto. In seguito furono prodotti altri tipi di dinamite sostituendo la farina fossile con altre sostanze (segatura di legno, carbone).

Le dinamiti si possono suddividere in diverse categorie:

- a) **dinamiti a base inerte**: sono quelle che, come la dinamite di Nobel, contengono come sostanza assorbente un composto che non prende affatto parte alla reazione esplosiva;
- b) **dinamiti a base parzialmente attiva**: sono quelle che contengono una sostanza (come segatura di legno, carbone, idrocarburi) che per sé stessa non è esplosiva, ma che, per il carbonio che contiene, viene bruciata almeno in parte da quell'atomo di ossigeno che avanza nell'esplosione della nitroglicerina e quindi prende parte alla reazione esplosiva svolgendo anidride carbonica;
- c) **dinamiti a base attiva**: sono quelle che contengono, mescolate alla nitroglicerina, altre sostanze esplosive, come nitrati, clorati, paraffina. L'esplosivo risultante, pur mantenendo una elevata potenzialità, è facilmente plasmabile ed è relativamente poco sensibile alle sollecitazioni meccaniche.

5.5. Esplosioni di polveri

Si è visto, trattando dei combustibili solidi, come uno dei parametri più importanti al fine di determinare la loro infiammabilità sia appunto il loro grado di **polverizzazione** (pezzatura). La polverizzazione infatti aumenta la superficie esposta all'aria e quindi suscettibile di reazione. Una nube di polveri combustibili si può quindi assimilare ad una miscela infiammabile di gas, tanto più pericolosa quanto più piccola è la dimensione media delle particelle di polvere.

Si intendono per **polveri** le sostanze composte da particelle più piccole di 420 micrometri. Le polveri si definiscono **esplosive** quando sono in grado di incendiarsi in presenza di un innesco (scintilla, fiamma ecc.).

Anche le polveri sono caratterizzate da una **concentrazione** limite **inferiore di infiammabilità** (anche di una superiore, che però non ha interesse pratico) e da una **temperatura di accensione**, al di sopra della quale la polvere si incendia; più tale temperatura è bassa, più pericolosa risulta la polvere.

Temperature di accensione di 190-120°C, come quelle delle polveri di zolfo, significano che la combustione può essere innescata da una tubazione di vapore non isolata. Temperature di accensione di 20°C, come quelle delle polveri di uranio o zirconio, rendono praticamente certa la combustione a concentrazioni superiori a quella minima di infiammabilità.

Un altro parametro di grande interesse è l'**energia minima di attivazione**, cioè la minima quantità di energia elettrica richiesta ad una scintilla per accendere una nube di polveri.

Tra i fattori che **riducono il rischio** di esplosioni va ricordata l'**umidità** del materiale e quindi l'elevata umidità relativa dell'aria durante le lavorazioni. Un aumento del contenuto di umidità della polvere causa infatti un aumento della temperatura di accensione ed una riduzione della pressione generata da una eventuale esplosione, in quanto l'umidità evaporando assorbe vapore e riduce l'energia distruttiva libera.

L'umidità inoltre può essere utile per evitare accumuli di cariche elettrostatiche nelle nubi di polvere.

La concentrazione di polveri può venire ridotta anche da impianti di ventilazione, facendo tuttavia attenzione che non se ne accumulino pericolose concentrazioni nelle condotte.

Durante le lavorazioni si possono diluire le polveri pericolose con polveri inerti o inibitrici di reazione, quali quelle usate negli estintori (carbonati di sodio e potassio).

Polveri: parametri caratteristici

Natura della polvere	Tipo di polvere	Minima energia di attivazione (joule)	Massima pressione di esplosione (bar)	Velocità di accrescimento della pressione media (bar/s)
Polveri metalliche	Alluminio atomizzato	0,050	5,1	562
	Magnesio	0,080	6,0	253
	Stagno	0,08	2,6	59
	Cromo	0,140	5,9	91
Polveri di materie plastiche e sintetiche	Polietilene a bassa pressione	0,06	5,8	78
	Resine epossidiche	0,015	6,0	140
	Nylon	0,020	6,0	85
	Gomma sintetica	0,03	6,5	78
Polveri di prodotti agricoli	Farina di grano	0,06	6,4	98,4
	Polvere di mais	0,04	6,7	119,5
	Zucchero in polvere	0,03	6,4	119,5
	Cacao	0,03	4,8	77,3

6. PRODOTTI DELLA COMBUSTIONE

6.1. Gas di combustione

I gas di combustione sono quei prodotti della combustione che rimangono allo stato gassoso anche quando raggiungono, raffreddandosi, la temperatura ambiente di riferimento (15°C).

La produzione di tali gas dipende dal tipo di combustibile, dalla percentuale di ossigeno presente e dalla temperatura raggiunta nell'incendio.

Nella stragrande maggioranza dei casi, la **mortalità per incendio** è da attribuire all'**inalazione** di questi gas che producono danni biologici per anossia o per tossicità.

Vediamo ora i principali gas di combustione.

Ossido di carbonio - Gas tossico, spesso presente in grandi quantità negli incendi, costituisce di solito il pericolo più grande. E' sempre presente in grandi quantità quando si tratti di fuochi sviluppatosi in ambienti chiusi con scarsa ventilazione e in tutti i casi dove **scarseggia l'ossigeno** necessario alla combustione. L'**azione tossica** dell'ossido di carbonio è dovuta al fatto che esso altera la composizione del sangue: il monossido di carbonio forma infatti con l'emoglobina un composto (la carbossiemoglobina) che impedisce la formazione dell'ossiemoglobina, fondamentale per l'ossigenazione dei tessuti del corpo umano. L'esposizione in ambienti contenenti l'1,3% di monossido di carbonio produce incoscienza quasi istantaneamente e la morte dopo pochi minuti. La percentuale dello 0,15% per 1 ora o dello 0,05% per 3 ore può risultare mortale. La percentuale dello 0,4% è fatale in meno di 1 ora.

Anidride carbonica - Si forma sempre in grandi quantità negli incendi. E' un gas asfissiante che provoca una accelerazione del ritmo respiratorio, con la conseguenza che, se sono presenti gas tossici, aumenta la quantità di sostanze tossiche immesse nell'organismo. Una percentuale del 5% di anidride carbonica nell'aria, la rende irrespirabile.

Idrogeno solforato - Si sviluppa in tutti quegli incendi in cui bruciano materiali contenenti zolfo, come ad esempio la lana, le gomme, le pelli, la carne ed i capelli. L'idrogeno solforato ha odore caratteristico di uova marce, ma tale sensazione che si ha alle prime inalazioni scompare dopo poco tempo. Esposizioni ad aria contenente percentuali tra lo 0,04 e lo 0,07% per più di mezz'ora possono essere pericolose in quanto provocano vertigini e vomito. In percentuali maggiori diviene molto tossico ed attacca il sistema nervoso provocando dapprima affanno e successivamente il blocco della respirazione.

Anidride solforosa - Si può formare nella combustione di materiali contenenti lo zolfo quando questa avviene in eccesso d'aria. In genere se ne formano quantità relativamente modeste salvo che negli incendi di zolfo. Percentuali dell'ordine dello 0,05% sono da considerarsi pericolose anche per esposizioni di breve durata. E' un gas irritante delle mucose degli occhi e delle vie respiratorie.

Acido cianidrico - E' un gas **altamente tossico**, ma fortunatamente negli incendi ordinari si forma in piccole dosi. Quantità relativamente apprezzabili si trovano invece nelle combustioni incomplete (con poco ossigeno) di seta, lana, resine acriliche, uretaniche e poliammidiche. E' impiegato come fumigante per distruggere i parassiti. Occorre indossare l'autoprotettore quando si debba intervenire in locali ove sia impiegato o depositato l'acido cianidrico. Ha odore caratteristico di mandorle amare ed una concentrazione dello 0,03% è già da considerare mortale.

Aldeide acrilica o acroleina - E' un gas altamente tossico ed irritante. Si forma durante l'incendio di prodotti derivati dal petrolio, di oli, grassi ed altri materiali comuni. Concentrazioni superiori a 10 p.p.m. possono risultare mortali.

Fosgene - Gas **altamente tossico**, è presente nelle combustioni di materiali contenenti cloro, come ad esempio alcuni materiali plastici. La formazione di tale gas è da temere soprattutto se l'incendio si sviluppa in un ambiente chiuso. L'impiego di estintori al tetracloruro di carbonio può provocarne la formazione con effetti particolarmente dannosi in locali chiusi.

Ammoniaca - Si forma nella combustione di materiali contenenti azoto (lana, seta, materiali acrilici, fenolici e resine melamminiche). L'ammoniaca è impiegata in alcuni impianti di refrigerazione e costituisce un notevole rischio di intossicazione in caso di fuga. Produce sensibili irritazioni agli occhi, al naso, alla gola ed ai polmoni. L'esposizione per mezz'ora all'aria contenente 0,25-0,65% di ammoniaca può causare seri danni all'organismo e addirittura la morte.

Perossido di azoto - Gas di colore rosso bruno **altamente tossico**. Esposizioni all'aria con percentuali dallo 0,02% allo 0,07% possono essere mortali in breve tempo. Esso si forma insieme ad altri vapori nitrosi nella combustione della nitrocellulosa, del nitrato di ammonio e di altri nitrati organici.

Acido cloridrico - E' un prodotto della combustione di tutti quei materiali contenenti cloro come la maggioranza delle materie plastiche. La concentrazione di 1,500 p.p.m. è fatale in pochi minuti. La sua presenza viene facilmente avvertita a causa dell'odore pungente e del suo effetto irritante per le mucose. L'acido cloridrico ha inoltre la proprietà di corrodere i metalli.

6.2. Fiamme

Le fiamme sono costituite dall'**emissione di luce** conseguente alla combustione di gas sviluppatasi in un incendio.

In particolare nell'incendio di combustibili gassosi è possibile valutare approssimativamente il valore raggiunto dalla temperatura di combustione dal **colore della fiamma**.

Scala cromatica delle temperature nella combustione dei gas

Colore della fiamma	Temperatura °C
Rosso nascente	500
Rosso scuro	700
Rosso ciliegia	900
Giallo scuro	1100
Giallo chiaro	1200
Bianco	1300
Bianco abbagliante	1500

6.3. Fumi

I **fumi** sono formati da piccolissime particelle solide (aerosol), liquide (nebbie o vapori condensati) disperse nei gas prodotti durante la combustione.

Salvo casi particolari quali la combustione del metano, la combustione è quasi sempre accompagnata dalla formazione di fumi; normalmente sono prodotti in quantità tali da impedire la visibilità ostacolando l'attività dei soccorritori e l'esodo delle persone. E' quindi il fumo il primo ostacolo che si deve evitare nei locali ove si sviluppa l'incendio.

Le **particelle solide** dei fumi sono costituite da sostanze incombuste: particelle di carbonio, catrami e ceneri. Queste, trascinate dai gas prodotti dalla combustione, formano il fumo di colore scuro.

Le **particelle liquide**, invece, sono costituite essenzialmente da vapor d'acqua proveniente dall'umidità dei combustibili, ma soprattutto dalla combustione dell'idrogeno. Al di sotto dei 100°C, quando i fumi si raffreddano, il vapor d'acqua condensa dando luogo a fumo di colore bianco.

E' noto l'effetto **irritante** del fumo sulle mucose degli occhi e sulle vie respiratorie che si va a sommare alla normale carenza di ossigeno al momento dell'incendio.

6.4. Calore

Il **calore** è la causa principale della propagazione degli incendi. Esso realizza l'aumento della temperatura di tutti i materiali e corpi esposti, provocandone il danneggiamento fino alla distruzione.

Oltre certi limiti, il calore causa all'uomo disidratazione dei tessuti, difficoltà respiratorie e ustioni.

Una temperatura dell'aria di 150°C è da ritenersi sopportabile solo per brevissimo tempo e sempre che l'aria sia sufficientemente secca. Negli incendi, invece, sono presenti grandi quantità di vapore acqueo, così anche temperature di 50°C risultano estremamente pericolose.

7. DINAMICA DEGLI INCENDI

7.1. Fattori da cui dipende un incendio

I principali **fattori** da cui dipende lo sviluppo e la modalità di propagazione di un incendio sono:

- compartimento
- carico d'incendio
- ventilazione
- velocità di combustione.

Compartimento - E' un **settore di edificio** delimitato da elementi costruttivi atti ad impedire, per un prefissato periodo di tempo, la propagazione dell'incendio e/o dei fumi e a limitare la trasmissione termica ai settori adiacenti dell'edificio in caso di incendio. Gli elementi costruttivi che limitano il compartimento si dicono **elementi di chiusura**. Ove manchino elementi di chiusura idonei si considera quale compartimento l'intero edificio. L'ampiezza massima di un compartimento dipende dalla destinazione, dal carico di incendio, dai mezzi di rivelazione e segnalazione, e dai mezzi di spegnimento automatici installati.

Carico d'incendio – E' la quantità di calore che si svilupperebbe per combustione completa di tutti i materiali combustibili contenuti nel compartimento, compresi le strutture, gli infissi, le opere di finitura dei muri, pavimenti e soffitti costituiti da materiali combustibili. Il carico di incendio viene indicato con **Q**.

Il fattore **Q** dipende dalla qualità e dalla quantità del materiale combustibile. Tuttavia la **quantità di calore teorica** è ben lungi dall'essere raggiunta nei casi concreti, a causa di molti fatti accessori (stato di suddivisione, distribuzione, forma e modalità di deposito) e soprattutto per il fatto che non si verifica mai la combustione completa di tutto il materiale combustibile nel compartimento.

APPROFONDIMENTO

Il carico di incendio si calcola con la seguente formula:

$$Q = \sum_{(1 \rightarrow n)} G_i P_i$$

dove:

- ❖ Q= carico d'incendio
- ❖ $\sum_{(1 \rightarrow n)}$ = somma estesa a tutti gli n materiali combustibili presenti
- ❖ G_i = massa del materiale combustibile
- ❖ P_i = potere calorifico inferiore del combustibile

Riferendo il carico d'incendio alla superficie totale del compartimento (A_t) abbiamo il **carico di incendio per unità di area**:

$$q = 1/A_t \sum_{(1 \rightarrow n)} G_i P_i$$

Ventilazione - La portata volumetrica d'aria entrante Q_a è proporzionale all'area dell'apertura e alla radice quadrata dell'altezza, secondo la formula:

$$Q_a = k A_f \sqrt{H}$$

Nella formula:

A_f e H sono l'area e l'altezza delle finestre.

k rappresenta un **coefficiente di proporzionalità** che dipende dalla differenza di temperatura tra interno ed esterno e dal rapporto tra il volume di gas prodotto per unità di massa e il volume di aria richiesto per la combustione completa dell'unità di massa di combustibile.

Velocità di combustione - Si distinguono due casi tipici :

- se c'è **carezza di ossigeno**, la velocità di combustione è approssimativamente proporzionale alla quantità d'aria che affluisce attraverso le aperture e non dipende in maniera apprezzabile dalla quantità, porosità e forma del combustibile. Si dice che la combustione è **controllata dalla ventilazione**;
- se invece la **disponibilità di ossigeno è più che sufficiente**, la velocità è indipendente dalla quantità d'aria affluita, ma dipende dalle proprietà degli strati combustibili e dalla quantità, porosità e forma del combustibile. Si dice che la combustione è **controllata dagli strati di combustibile**.

Altri fattori di propagazione di un incendio che si aggiungono a quelli sopra menzionati sono:

- caratteristiche geometriche del locale e delle aperture
- ampiezza del locale
- proprietà termiche dei materiali e delle strutture che limitano il locale (conduttività e capacità termica).

7.2. Sviluppo di un incendio

Il **focolaio iniziale** di molti incendi è determinato frequentemente da una modesta sorgente di energia che viene a contatto con materiali combustibili per fatti accidentali (negligenza, distrazione, cattivo uso di sorgenti di energia, imprudenza, ignoranza).

Ogni incendio inizia con la così detta fase di **ignizione** durante la quale un materiale combustibile assorbe da una sorgente una quantità di calore sufficiente a far aumentare la sua temperatura fino a raggiungere il valore al quale ha luogo la combustione che, una volta iniziata, prosegue indipendentemente da apporti energetici esterni.

Se l'oggetto combustibile acceso è distante da altro materiale combustibile, il fuoco non si può propagare e, una volta esaurito il combustibile, la combustione cessa.

Se invece l'oggetto combustibile è a contatto più o meno stretto con altri materiali combustibili (o anche se questi sono ad una certa distanza), questi possono emanare per effetto di pirolisi vapori e gas che facilmente si accendono; le fiamme che ne conseguono possono propagare l'incendio ad altri elementi combustibili e quindi, per gradi, a tutto il locale.

La continuazione o meno del processo di combustione dipende dal **bilancio termico** che si instaura.

Se il bilancio termico è **positivo**, cioè se prevale la quantità di calore generata su quella dispersa, la combustione continua; se il bilancio termico è **negativo**, la velocità di combustione scende al di sotto di un livello critico e si inizia un processo di autoestinzione.

7.3. Fasi di un incendio

L'incendio viene analizzato da diversi punti di vista e viene pertanto schematizzato in varie fasi :

1. fase iniziale o di accensione
2. fase di incendio vero e proprio o a velocità di combustione costante
3. fase di estinzione o raffreddamento

La prima fase va dal primo apparire della fiamma al così detto **flashover** o infiammazione generalizzata; la seconda dal flashover al punto in cui la temperatura media raggiunge il suo valore massimo; la terza fase va dal punto di temperatura massimo fino all'estinzione. La fase di estinzione si ritiene completata quando la temperatura media raggiunge circa i 300°C.

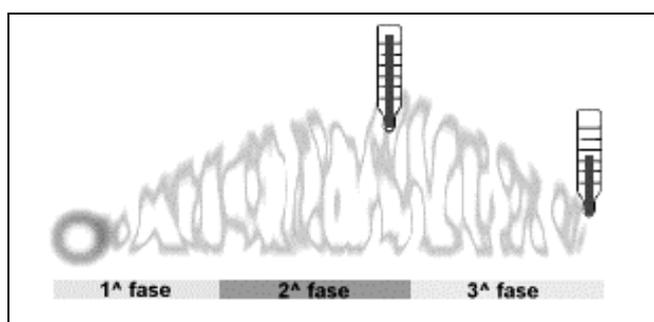


Fig.30 - Schema delle fasi di un incendio

7.4. Fase iniziale o di accensione

E' la fase più studiata perché è in essa che si cercano quegli elementi necessari a contrastare l'incendio quando ancora i danni sono ridotti.

La **fase iniziale** di un incendio corrisponde ad un regime di grande instabilità.

Le circostanze che influenzano l'ulteriore sviluppo di un incendio sono aleatorie: per esempio la rottura dei vetri delle finestre che avviene intorno ai 100°C, la natura e la disposizione dei vari mobili o la natura dei rivestimenti. La propagazione del fuoco da un oggetto combustibile all'altro avviene, specie all'inizio, per **irraggiamento** e **convezione**.

Durante questa fase le **temperature** sono molto differenti da punto a punto e subiscono rapide ed importanti oscillazioni. La temperatura media cresce e le differenze di temperature da punto a punto tendono a divenire sempre più piccole.

La prima fase può essere suddivisa in vari **stadi**.

1° stadio (inizio di ignizione)

Tale stadio dipende dai seguenti fattori:

- infiammabilità del combustibile
- possibilità di propagazione della fiamma
- grado di partecipazione al fuoco del combustibile
- geometria e volume degli ambienti
- possibilità di dispersione del calore
- ventilazione dell'ambiente
- caratteristiche superficiali del combustibile.

Questo stadio inizia allorché un oggetto combustibile viene posto a contatto stretto con una sorgente di calore anche modesta (piccola estensione, bassa emissione di calore, breve tempo).

Perché l'oggetto combustibile si accenda è necessario che, oltre ad essere molto vicino alla sorgente, sia in grado di svolgere gas e vapori infiammabili in tempi relativamente brevi. Se ciò non avviene accade che la sorgente termica si esaurisce prima che si verifichi l'accensione.

In generale l'ossigeno disponibile è sovrabbondante per le modeste e limitate reazioni che si verificano inizialmente e quindi il progredire di questa fase raramente è controllato dalla quantità d'aria disponibile.

Al termine di questo stadio l'aumento di temperatura media è molto modesto.

2° Stadio (di propagazione)

Tale stadio è caratterizzato da:

- produzione di gas
- riduzione della visibilità a causa dei fumi
- aumento della partecipazione alla combustione dei combustibili solidi e liquidi
- aumento delle temperature
- aumento delle energie di irraggiamento.

In questo stadio vengono coinvolti altri oggetti combustibili (mobili, rivestimenti di pareti ecc.) e la dimensione del fuoco va via via aumentando.

Il progredire dell'incendio dipende dalle caratteristiche dei materiali.

La continuazione della combustione dipende dalla natura dello strato prossimo a quello superficiale e dalla sua inerzia termica (conduttività e dalla capacità termica). Se il calore fornito non è sufficiente ad innalzare la temperatura della parte di materiale combustibile adiacente non ancora coinvolta nell'incendio si può verificare una graduale estinzione.

Se invece il bilancio è positivo allora la combustione continuerà ad una velocità sempre maggiore; la temperatura ambiente aumenterà con conseguente aumento della velocità di combustione.

Nel caso la ventilazione sia insufficiente, la quantità di ossigeno si riduce, determinando una combustione incompleta, una diminuzione della temperatura e un rallentamento della velocità di combustione.

Il progredire dell'incendio è generalmente **irregolare**; viene facilitato dalla rottura dei vetri delle finestre ed ostacolato, fino ad una possibile autoestinzione, da deficienza di ossigeno o da una insufficiente esposizione degli oggetti circostanti la cui temperatura può non raggiungere quella di ignizione.

3° Stadio (dalla propagazione al flashover)

Tale stadio è caratterizzato da:

- incremento della temperatura
- crescita della velocità di combustione
- forte aumento di emissione di gas e di particelle incandescenti
- i combustibili vicino al focolaio sono soggetti ad autoaccensione, quelli più lontani si riscaldano fino a raggiungere la temperatura di combustione con produzione di gas di distillazione infiammabili.

L'incendio si propaga, le fiamme raggiungono il soffitto dove si accumulano gas e fumi caldi. La temperatura aumenta più rapidamente, ma non raggiunge valori tali da determinare l'ignizione spontanea di tutte le sostanze combustibili. Con una adeguata ventilazione, l'incendio prosegue da oggetto a oggetto, mentre le fiamme e i gas caldi irradiano, in tutte le direzioni, l'energia termica che si produce.

In questo stadio la temperatura raggiunge un valore tale per cui risulta molto improbabile l'autoestinzione.

La maggior parte del materiale combustibile prende fuoco per effetto del calore che riceve o per irraggiamento o per convezione. Si sviluppano grandi quantità di fumo che fuoriesce dalle finestre o dalle altre aperture. Tutti i materiali combustibili esposti emettono gas infiammabili. L'incendio si sviluppa con pieno vigore e le temperature crescono rapidissimamente. Siamo ormai allo stadio chiamato **flashover** o di **infiammazione generalizzata**.

7.5. Fase dell'incendio vero e proprio

Se il locale non è sufficientemente ventilato, l'ossigeno disponibile decresce rapidamente e risulta insufficiente per alimentare la combustione completa del combustibile nel locale. Ne segue che i gas infiammabili non combusti fuoriescono dalle finestre, dove, in presenza dell'ossigeno dell'aria, bruciano sulla facciata dell'edificio.

Il **flashover** rappresenta uno **stadio irreversibile** al di là del quale vi è scarsa possibilità che l'incendio si spenga da solo prima che il combustibile sia tutto esaurito.

Solitamente si danno due **definizioni** del flashover:

1. punto in cui la temperatura del gas presso il soffitto raggiunge il valore medio di 600°C
2. punto in cui l'intensità del calore raggiunge un valore di convezione e di irraggiamento pari a 1,25 W/cm² che rappresenta il limite per l'accensione dei materiali cellulosei.

Il flashover è caratterizzato da una serie di fenomeni:

- si ha l'infiammazione generalizzata di tutti i materiali combustibili e dei gas di distillazione
- le temperature nei diversi punti del locale tendono a diventare uniformi
- la combustione accelera notevolmente e richiede considerevoli volumi di ossigeno
- il tenore di ossido di carbonio è molto elevato, in alcuni casi si arriva anche al 20% e questo implica un serio pericolo di intossicazione per le persone che si imbattono nei fumi dell'incendio.

Il flashover è seguito da una fase più o meno lunga a **combustione costante**.

La temperatura media è elevata, la quantità di calore in gioco è notevole e i materiali combustibili bruciano tutti.

Della potenza termica generata, mediamente, oltre il 60% viene asportata con i gas di combustione, circa il 10% viene irradiato attraverso le finestre verso l'esterno e circa il 30% viene ceduta alle strutture che limitano i locali (muri, pavimenti e soffitti).

La dilatazione dovuta alla temperatura, la conseguente diminuzione di densità del gas di combustione e la differenza di pressione tra esterno ed interno determinano la fuoriuscita dei gas di combustione attraverso le parti alte delle finestre ed il richiamo di aria fresca dall'esterno che penetra nel locale dal basso. La parte bassa del locale risulta quindi in depressione, mentre la parte alta è invece in pressione.

7.6. Fase di estinzione o di raffreddamento

La **temperatura**, dopo aver raggiunto il suo valore massimo, comincia in questa fase a diminuire più o meno rapidamente e ciò in rapporto alla potenza termica ancora sviluppata dalla combustione dei residui dei materiali combustibili ed al calore riemesso dalle strutture che delimitano il locale.

Il **calore** accumulatosi permane per tempi abbastanza lunghi e la sua restituzione avviene in relazione soprattutto alla ventilazione del locale.

Una notevole potenza termica continua ad essere asportata coi fumi, a disperdersi per irradiazione attraverso le finestre, mentre l'afflusso di aria fresca abbassa gradualmente la temperatura media.

7.7. Propagazione degli incendi

Vediamo ora meglio i meccanismi attraverso i quali l'incendio si propaga.

Innanzitutto le **correnti di fumo** caldo che lasciano la zona di combustione sono la principale causa di propagazione dell'incendio.

Alcuni aspetti sono da rilevare:

- **termoespansione dell'aria causata dall'aumento di temperatura:** l'aumento della temperatura provoca un proporzionale aumento del volume occupato dal gas. Durante un incendio questo fenomeno provoca la rottura delle finestre e delle porte;
- **effetti camino:** il principale meccanismo di movimento dei fumi diventa il tiraggio. Questo per manifestarsi ha bisogno di "camini" quali scale, vani ascensore, cavedi di impianti e così via. Di qui la pericolosità negli edifici di tutti gli attraversamenti di piano non protetti adeguatamente;
- **azioni della ventilazione:** le correnti d'aria fanno muovere il fumo, il loro effetto principale è di determinare un movimento orizzontale non solo del fumo ma anche dell'incendio;
- **funzionamento improprio della ventilazione meccanica:** gli impianti di ventilazione se non progettati adeguatamente possono causare rapidi trasferimenti di fumo e calore attraverso le condotte di passaggio dell'aria. Di qui la necessità delle serrande tagliafuoco e di sistemi di arresto automatico degli impianti. Gli impianti di ventilazione possono, al contrario, essere progettati anche per l'estrazione dei fumi in caso di incendi e venire così integrati nel sistema di protezione dell'edificio.

Il secondo meccanismo per ordine di importanza della propagazione degli incendi è **l'irraggiamento termico**. Il calore di irraggiamento viene trasmesso direttamente dalla sorgente per via elettromagnetica. La potenza irradiata diminuisce con il quadrato della distanza e quindi l'irraggiamento è tanto più pericoloso quanto più vicini sono i corpi interessati. Non tutta la superficie esterna di un edificio in preda a fiamme irradia in uguale misura: meno pericolose risultano le pareti, soprattutto se dotate di buona resistenza al fuoco e quindi capaci di non aumentare troppo la temperatura; al contrario risultano assai pericolose le aperture e, in genere, tutte le superfici che lasciano vedere le fiamme.

La propagazione a distanza degli incendi, oltre che per effetto della convezione dei fumi caldi e dell'irraggiamento, può aver luogo per **conduzione** attraverso le strutture di separazione. A causa della continuità che esiste tra le diverse parti di un edificio, la propagazione termica attraverso pareti e solette può portare alla temperatura di accensione anche sostanze combustibili contenute in locali non direttamente investiti dalle fiamme.

8. LE MISURE PRECAUZIONALI DI PREVENZIONE DEGLI INCENDI

8.1. Le principali cause d'incendio

Le più comuni **cause di incendio** sono le seguenti:

- sigaretta
- autocombustione
- camino
- fulmine
- cause elettriche
- utilizzo di fonti di calore.

Sigaretta - Gli incendi causati dalla sigaretta sono circa il 9% del totale, al secondo posto dopo le cause elettriche.

L'ideale sarebbe impedire di fumare in tutte le aree a rischio. Essendo però impossibile attuare una tale disposizione, è opportuno predisporre delle aree ben definite ed organizzate dove sia consentito fumare in completa sicurezza.



Fig. 31

Autocombustione - Si parla di autocombustione quando senza alcun apporto di energia dall'esterno, quali scintille, fiamma o contatto con corpo incandescente, una sostanza combustibile si accende a seguito di una reazione di ossidazione, inizialmente lenta con successivo, graduale e sensibile accumulo di calore in grado di originare un vero e proprio incendio.

Se il calore viene dissipato da una opportuna ventilazione, non si correrà il rischio di incendio. Quando invece il materiale è ammassato si ha una maggiore probabilità di incendio.

Un altro fattore che aumenta il rischio di autocombustione si ha quando il materiale e il locale in cui questo si trova sono ad una temperatura alta (per la presenza di radiatori o tubazioni di vapore).

Altri elementi che facilitano il processo di autocombustione sono l'umidità e la presenza di alcune impurità che possono fungere da catalizzatore.

Alcune prove hanno dimostrato che, a parità di massa, maggiore è il volume delle sostanze depositate, minore è il valore della temperatura necessaria alla quale inizia il processo di autocombustione.

Classi di rischio per materiali soggetti ad autocombustione

Materiali ad alto rischio	Carbone di legna
	Colori ad olio
	Erba medica
	Tessuti di seta, cotone, lino
Materiali a rischio moderato	Carbone bituminoso
	Carta da macero umida
	Fieno
	Vernici
Materiali a basso rischio	Acqua ragia vegetale
	Olio di ricino

Talvolta vengono imputati ad **autocombustione** anche gli **incendi di bosco**. Una tale attribuzione è da ritenere poco attendibile poiché il materiale presente nel bosco non è fra quello soggetto a processo di autocombustione, né si presenta ammassato, cioè nella condizione di rendere possibile il fenomeno.

Purtroppo la causa degli incendi di bosco va attribuita al cattivo comportamento dell'uomo (accensione di fuochi, mozziconi di sigaretta, fiammiferi, ecc.).

Camino - Il classico incendio di camino è quello causato dall'improvviso accendersi della fuliggine costituita da particelle di carbonio che si depositano lungo le pareti della canna fumaria.

Le cause di tali incendi sono sempre dovute a deficienze nella costruzione del camino o nella conduzione dell'impianto termico o mancata pulizia della canna fumaria.



Fig. 32

Fulmine - Gli incendi provocati da fulmine non sono rari; per evitarli è necessario dotare gli edifici degli adeguati dispositivi contro le scariche atmosferiche.



Fig. 33

Cause elettriche - Le principali cause d'incendio sono il corto circuito e il surriscaldamento. Onde evitare tali fenomeni occorre installare impianti elettrici correttamente progettati e garantire una buona manutenzione di questi.



Fig. 34

Utilizzo di fonti di calore - Le cause più comuni di incendio al riguardo includono:

- detenzione delle bombole di gas utilizzate negli apparecchi di riscaldamento (anche quelle vuote) in locali non idonei
- materiali combustibili depositati sopra o in vicinanza degli apparecchi di riscaldamento
- utilizzo di apparecchi in ambienti non idonei
- utilizzo di apparecchi in mancanza di una adeguata ventilazione degli ambienti.

8.2. Le fasi della prevenzione incendi

Con il termine **prevenzione incendi** si intende l'insieme delle azioni che devono essere affrontate per impedire il verificarsi e il propagarsi dell'incendio. Per questo occorre innanzitutto:

- acquisire una completa conoscenza del processo che si vuole realizzare
- valutare i rischi connessi all'uso di determinate sostanze o materiali
- individuare e studiare i sistemi e le tecnologie atte ad evitare o ridurre al minimo i pericoli di incendio.

Il raggiungimento della sicurezza può essere ottenuto mediante tre differenti tipologie di interventi:

- a) in fase di progettazione e realizzazione
- b) in fase di esercizio
- c) in fase di addestramento del personale o degli utenti di una particolare attività.

Fase di progettazione e realizzazione - Questo tipo di intervento è certamente il più impegnativo in quanto coinvolge l'impostazione dell'impianto o della struttura da realizzare. E' in questa fase che devono essere rispettati i concetti e le esigenze di protezione passiva ed attiva e degli impianti.

Fase di esercizio - Questa fase prevede il rispetto rigoroso delle norme di esercizio e di sicurezza previste. Non basta infatti che in sede di progetto e realizzazione siano state adottati tutti gli accorgimenti e le tecniche più opportune se poi in sede di esercizio si vanificano gli sforzi precedenti con interventi illogici o errati che possono dare origini a situazioni pericolose. Sempre nella fase di esercizio, bisogna assicurare un'accurata verifica periodica delle attrezzature di difesa contro gli incendi, procedendo ad ogni necessaria manutenzione per poter disporre in ogni momento di un sistema di protezione in perfetta efficienza.

Fase di addestramento del personale - In questa fase occorre insegnare in modo scrupoloso ed approfondito le modalità d'uso degli impianti e in particolare le norme di esercizio e di emergenza. Si devono inoltre predisporre corsi di addestramento sui metodi e sulle tecniche di pronto intervento. L'addestramento deve essere affrontato cercando di ipotizzare ogni possibile situazione di pericolo o di incidente per fornire precise procedure d'azione e ridurre quindi al minimo la necessità di ricercare o decidere all'istante il comportamento più efficace (sono quindi previste anche prove pratiche).