

Ministero dell'Interno
Corpo Nazionale dei Vigili del Fuoco



CHIMICA E FISICA DELL'INCENDIO

Servizio Tecnico Centrale

ISPETTORATO PER LA FORMAZIONE PROFESSIONALE
CORSI MULTIMEDIALI

CHIMICA E FISICA DELL'INCENDIO

1. CHIMICA DELLA COMBUSTIONE	5
1.1. ATOMI E MOLECOLE	5
1.2. REAZIONE CHIMICA	9
1.3. IL SISTEMA PERIODICO DEGLI ELEMENTI	12
1.4. GENERALITÀ SULLA COMBUSTIONE	13
1.5. LA VELOCITÀ DI COMBUSTIONE	16
2. PROPAGAZIONE DELLA COMBUSTIONE.....	19
2.1. GENERALITÀ	19
2.2. LIMITI DI INFIAMMABILITÀ	20
2.3. TEMPERATURA DI INFIAMMABILITÀ.....	24
2.4. TEMPERATURA DI ACCENSIONE	25
2.5. LA FIAMMA.....	26
2.6. FIAMMA PREMISCELATA E FIAMMA DI DIFFUSIONE	26
2.7. FIAMMA LAMINARE E FIAMMA TURBOLENTA	27
2.8. DISTACCO E RITORNO DI FIAMMA	28
2.9. ESPLOSIONE, DEFLAGRAZIONE E DETONAZIONE	29
3. PARAMETRI DELLA COMBUSTIONE	31
3.1. GENERALITÀ.....	31
3.2. POTERE CALORIFICO	31
3.3. ARIA NECESSARIA PER LA COMBUSTIONE	35
3.4. TEMPERATURA DELLA COMBUSTIONE	35
4. COMBUSTIBILI.....	37
4.1. GENERALITÀ.....	37
4.2. COMBUSTIBILI SOLIDI	38
4.3. COMBUSTIBILI LIQUIDI	43
4.4. COMBUSTIBILI GASSOSI	48
4.5. CONSERVAZIONE DEI GAS	50
4.6. INQUINAMENTO DA COMBUSTIBILI	52
5. ESPLOSIVI.....	54
5.1. GENERALITÀ.....	54
5.2. CARATTERISTICHE DEGLI ESPLOSIVI.....	55
5.3. CLASSIFICAZIONE DEGLI ESPLOSIVI	57
5.4. TIPI DI ESPLOSIVI	58
5.5. ESPLOSIONI DI POLVERI	60
6. PRODOTTI DELLA COMBUSTIONE.....	62
6.1. GAS DI COMBUSTIONE	62
6.2. FIAMME	63
6.3. FUMI.....	64
6.4. CALORE	65
7. DINAMICA DEGLI INCENDI.....	66
7.1. FATTORI DA CUI DIPENDE UN INCENDIO.....	66
7.2. SVILUPPO DI UN INCENDIO	67
7.3. FASI DI UN INCENDIO	69
7.4. FASE INIZIALE O DI ACCENSIONE.....	69
7.5. FASE DELL'INCENDIO VERO E PROPRIO	72
7.6. FASE DI ESTINZIONE O DI RAFFREDDAMENTO	73
7.7. PROPAGAZIONE DEGLI INCENDI	73
7.8. CASI TIPICI DI PROPAGAZIONE DI INCENDI	74

8. PREVENZIONE DEGLI INCENDI.....	77
8.1. CAUSE DEGLI INCENDI	77
8.2. CLASSIFICAZIONE DEGLI INCENDI	79
8.3. SPECIFICHE MISURE DI PREVENZIONE INCENDI.....	79
9. SPEGNIMENTO DEGLI INCENDI	82
9.1. PROTEZIONE DAGLI INCENDI	82
9.2. MODALITÀ DI ESTINZIONE	83
9.3. SOSTANZE ESTINGUENTI	83
9.3.1. <i>Sabbia</i>	84
9.3.2. <i>Acqua</i>	84
9.3.3. <i>Schiuma</i>	86
9.3.4. <i>Polveri</i>	87
9.3.5. <i>Gas inerti</i>	88
9.3.6. <i>Idrocarburi alogenati</i>	89
9.4. SISTEMI ANTINCENDIO	91
APPENDICE.....	93
TABELLA DELLE UNITÀ DI MISURA	93
TABELLA DEI PREFISSI DI DIVISIONE E MOLTIPLICAZIONE.....	94

1. CHIMICA DELLA COMBUSTIONE

1.1. Atomi e molecole

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

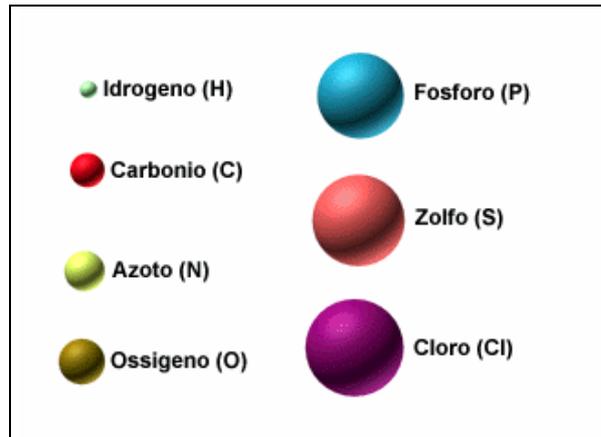


Fig.1

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

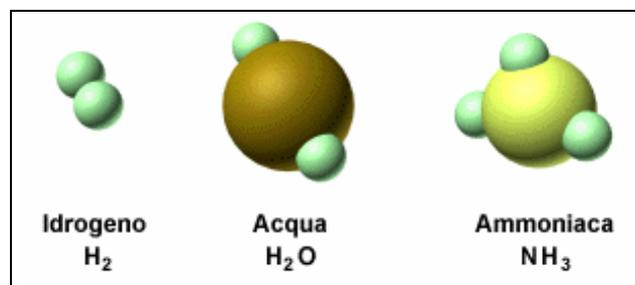


Fig.2

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



Fig.3

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**.

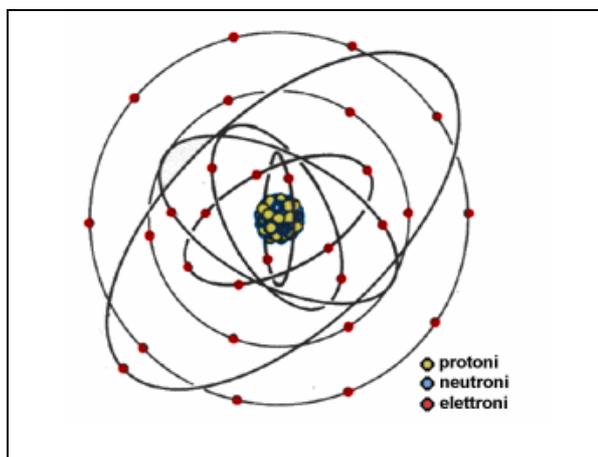


Fig.4

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

Protoni e **neutroni** insieme determinano la massa dell'atomo (**peso atomico** o **numero di massa**). Inoltre 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**.

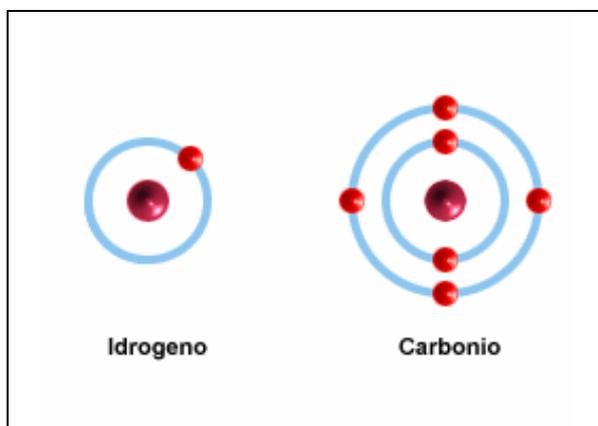


Fig.5

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

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 **nulla**.

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).

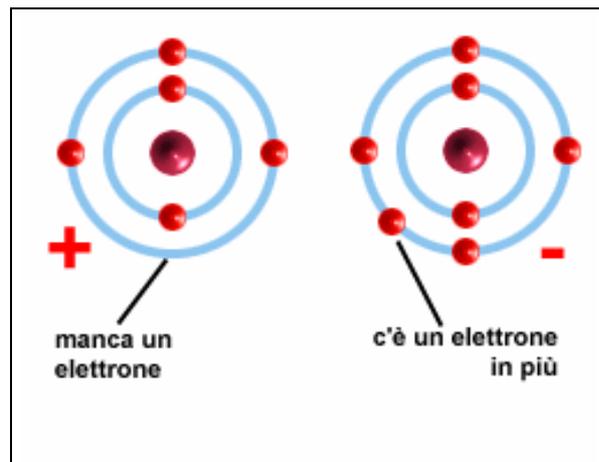


Fig.6

Ad esempio:

- **H**: l'atomo di idrogeno contiene un protone ed un elettrone; la sua carica netta è nulla;
- **H⁺**: ione positivo dell'idrogeno che ha ceduto un elettrone ed è rimasto con un solo protone carico positivamente, la sua carica netta è pari a +1;
- **O²⁻**: ione negativo dell'ossigeno che nel suo stato fondamentale ha 8 protoni ed 8 elettroni; qui ha acquistato due elettroni e quindi presenta una carica netta pari a -2.

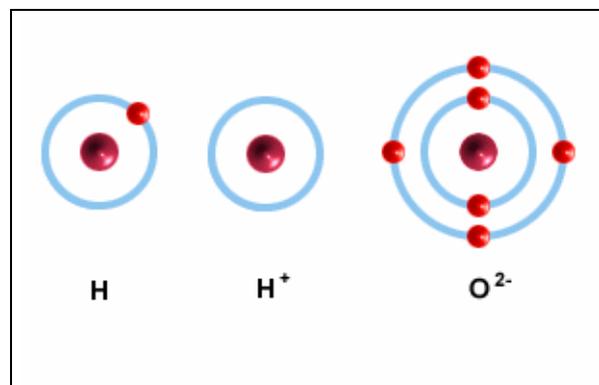


Fig.7

Gli elettroni determinano sia se un atomo reagirà con altri, sia come reagirà.

L'**idrogeno** (fig.8a) 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) .

L'**ossigeno** (fig.8b) 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 elettroni trasformandosi in O^{2-} .

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

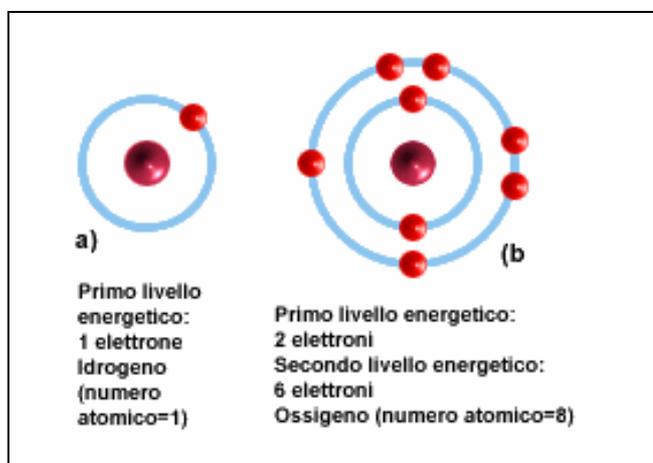


Fig. 8 - Rappresentazione della disposizione elettronica in alcuni elementi.

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.

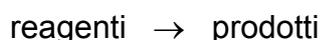
Spesso nelle formule sono presenti gli **indici** che rappresentano il **numero di atomi** di quell'elemento contenuti nella molecola. Così ad esempio in **H₂O**, il 2 sta ad indicare che in ogni molecola di acqua ci sono **2 atomi di idrogeno** ed **1 di ossigeno**; nel metano (CH₄) si ha un atomo di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

1.2. Reazione chimica

Una reazione chimica consiste in una ridistribuzione 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.

Una qualunque reazione chimica può essere generalmente rappresentata attraverso delle 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:

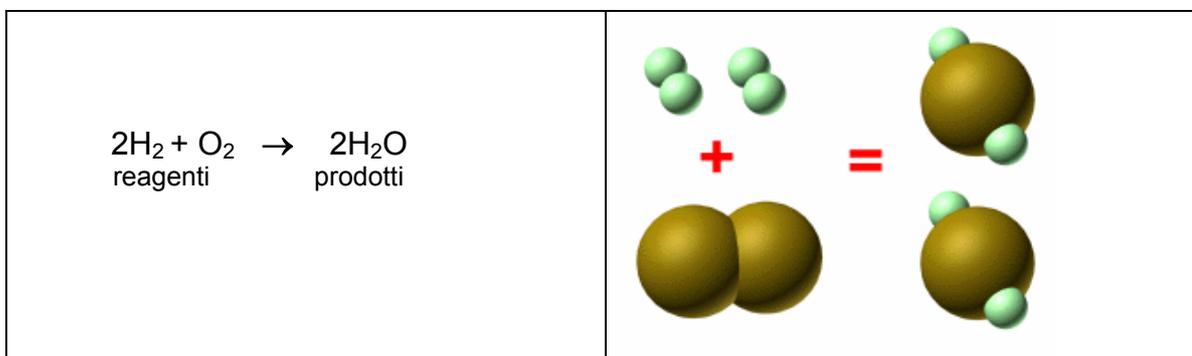


Fig.9

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

Riassumendo: ogni equazione di una reazione chimica dà informazioni sul **tipo di atomi** che contiene, sulle loro **proporzioni** attraverso i coefficienti stechiometrici, e sulla **direzione** della reazione attraverso la freccia.

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

La **stabilità** è determinata anche 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.

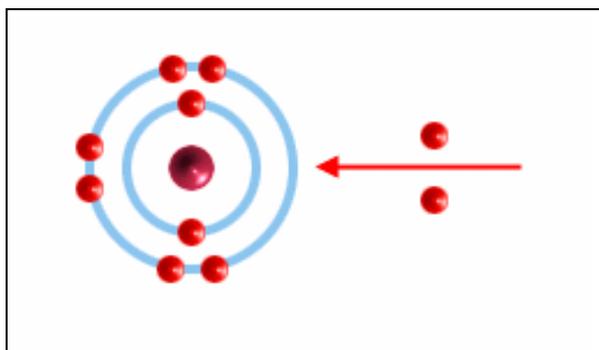


Fig.10

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 una specie di contatto. Gli elettroni situati sull'ultimo livello sono quelli che, interagendo fra loro, danno origine ai legami.

La formazione, a livello esterno, di un raggruppamento comprendente 8 elettroni costituisce la condizione alla quale tutti gli atomi tendono, e se essa non è realizzata in un atomo singolo tende a realizzarsi attraverso una combinazione di più atomi.

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 fra 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.

Il **numero di ossidazione** esprime il numero di elettroni scambiati, positivo o negativo, a seconda che si tratti di elettroni ceduti o acquistati.

L'interazione tra **sodio** e **cloro** è un esempio di quanto detto: l'atomo di sodio ha solo un elettrone nel suo livello energetico più esterno (fig. 11a-c), mentre l'atomo di cloro ha bisogno di avere un elettrone per completare il suo (fig. 11b-d).

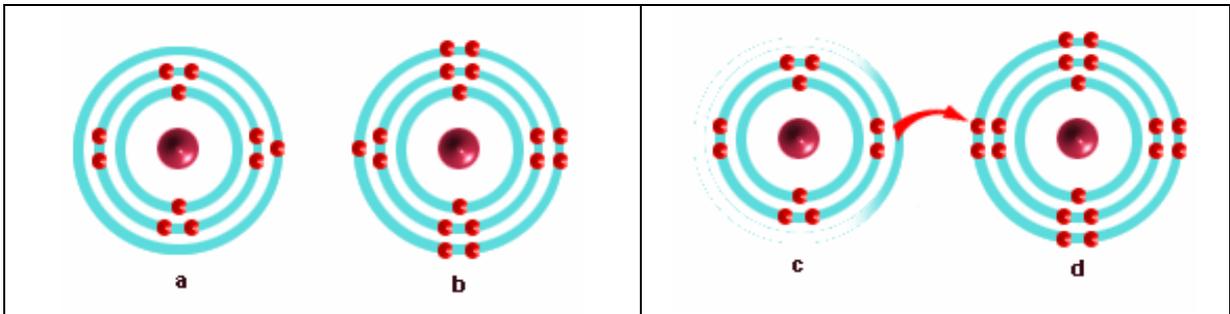


Fig. 11 - Interazione tra sodio e cloro

Quando l'atomo di sodio e l'atomo di cloro si incontrano, l'elettrone del livello energetico esterno del sodio **salta** in quello del cloro, che **completa l'ottetto** sull'ultima orbita. Quando il sodio perde il suo elettrone, il secondo livello energetico (con 8 elettroni) diventa il più esterno.

Entrambi gli atomi hanno completato i loro livelli energetici esterni e sono diventati più stabili. Inoltre gli atomi hanno acquisito delle **cariche elettriche** (sono diventati **ioni**): il sodio ha una carica elettrica positiva (dopo la reazione ha infatti 11 protoni e 10 elettroni) ed il cloro ha una carica negativa (dopo la reazione ha infatti 17 protoni e 18 elettroni).

Vi sono casi in cui la differenza di elettronegatività è bassa, o addirittura nulla, e allora nessuno dei due atomi è in grado di strappare all'altro elettroni; avviene allora che due o più coppie di elettroni, fornite dai due atomi, vengono messe in comune fra loro in modo che ciascun atomo raggiunga la configurazione più stabile. E' questo il caso della molecola di cloro (in figura sono indicati solo gli elettroni dell'ultima orbita):

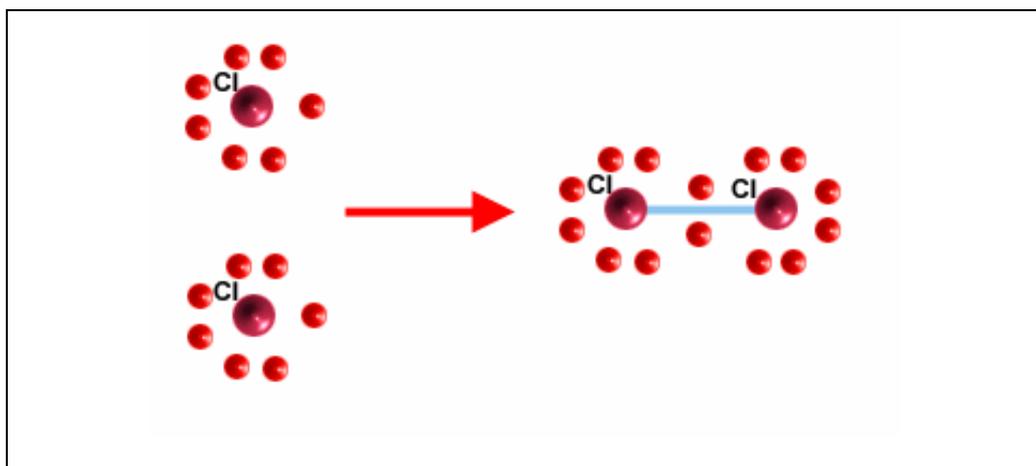


Fig. 12 - Molecola di cloro

In altri casi la coppia di elettroni che viene messa in comune è fornita da uno solo dei due atomi.

1.3. Il sistema periodico degli elementi

Ogni elemento è rappresentato da un simbolo. I simboli di tutti gli elementi sono contenuti nella **Tavola Periodica degli Elementi**.

Gruppo	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
	IA	IIA	IIIA	IVB	VB	VIB	VIIIB	VIIIIB			IB	IIB	IIIA	IVA	VA	VIA	VIIA	VIIIA
Periodo																		
1	1 H											Non metalli						2 He
2	3 Li	4 Be											5 B	6 C	7 N	8 O	9 F	10 Ne
3	11 Na	12 Mg	Metalli di transizione									13 Al	14 Si	15 P	16 S	17 Cl	18 Ar	
4	19 K	20 Ca	21 Sc	22 Ti	23 V	24 Cr	25 Mn	26 Fe	27 Co	28 Ni	29 Cu	30 Zn	31 Ga	32 Ge	33 As	34 Se	35 Br	36 Kr
5	37 Rb	38 Sr	39 Y	40 Zr	41 Nb	42 Mo	43 Tc	44 Ru	45 Rh	46 Pd	47 Ag	48 Cd	49 In	50 Sn	51 Sb	52 Te	53 I	54 Xe
6	55 Cs	56 Ba	* Lu	71 Hf	72 Ta	73 W	74 Re	75 Os	76 Ir	77 Pt	78 Au	79 Hg	80 Tl	81 Pb	82 Bi	83 Po	84 At	85 Rn
7	87 Fr	88 Ra	** Lr	103 Rf	104 Db	105 Sg	106 Bh	107 Hs	108 Mt	109 Uun	110 Uuu	111 Uub	112 Uut	113 Uuq	114 Uup	115 Uuh	116 Uus	117 Uuo
Elementi di transizione interna																		
Lantanidi	* La	57 Ce	58 Pr	59 Nd	60 Pm	61 Sm	62 Eu	63 Gd	64 Tb	65 Dy	66 Ho	67 Er	68 Tm	69 Yb				
Attinidi	** Ac	89 Th	90 Pa	91 U	92 Np	93 Pu	94 Am	95 Cm	96 Bk	97 Cf	98 Es	99 Fm	100 Md	101 No				

Fig.13 - Tavola periodica degli elementi

Nella Tavola Periodica gli elementi sono raggruppati in base alla loro **configurazione elettronica**. E' infatti da tale posizione ed in particolare dal numero e dalla posizione degli elettroni di valenza (nella maggior parte dei casi quelli del livello più esterno) che dipendono le proprietà chimiche dell'elemento.

Viene allora spontaneo adottare quale **criterio di ordinamento** il numero degli **elettroni sull'ultima orbita** e di raggruppare insieme gli elementi che hanno lo stesso numero di elettroni sull'ultima orbita.

Gli elementi vengono scritti in ordine crescente di numero atomico in righe orizzontali o **periodi**, assegnando a ciascun elemento una casella e andando a capo dopo il completamento del primo livello e successivamente ogni volta che nel livello esterno si forma un otetto.

In tal modo ciascun periodo comincia con un elemento avente un solo elettrone nell'ultimo livello e termina con un elemento in cui questo livello possiede 8 elettroni, è cioè completo.

Esaminando il sistema periodico si possono fare una serie di considerazioni:

- gli elementi di uno stesso gruppo hanno lo stesso numero di elettroni sull'ultimo livello, per questo motivo essi hanno proprietà chimiche simili. L'elettronegatività

va aumentando dal primo al settimo gruppo. Gli elementi del primo gruppo tendono a perdere l'elettrone esterno. Tale tendenza va diminuendo passando al secondo ed al terzo gruppo, e così via. L'elettronegatività è massima nel settimo gruppo ove si trovano gli elementi che quasi certamente riescono a strappare elettroni agli altri.

- In uno stesso gruppo la elettronegatività diminuisce procedendo dall'alto in basso. Ciò è spiegato dal fatto che gli atomi più leggeri, quindi più piccoli, hanno gli elettroni periferici più vicini al nucleo, essi perciò sono trattenuti più fortemente. L'elemento più elettronegativo è il **Fluoro**, quello meno elettronegativo è il **Francio**.
- L'ultimo gruppo comprende i **gas inerti** nei quali si realizza la formazione dell'ottetto elettronico esterno e quindi una particolare stabilità ed inerzia chimica.
- Il numero di ossidazione varia in modo abbastanza regolare passando da un gruppo all'altro. Nei primi due gruppi il numero di ossidazione è sempre positivo (perdita di elettroni). Negli altri gruppi si possono avere sia valori positivi che negativi. Nei gruppi VI e soprattutto VII il numero di ossidazione è quasi sempre negativo (acquisto di elettroni).

1.4. 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.

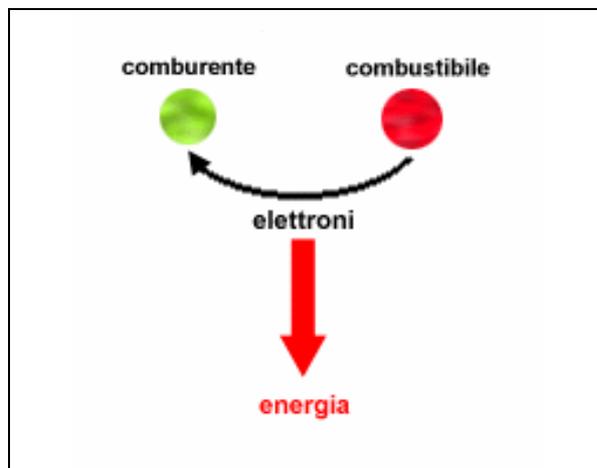


Fig.14

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. Se quindi sulla Terra il fluoro fosse abbondante come l'ossigeno, probabilmente chiameremmo "fluorazione" la perdita di elettroni, tanto più che l'associazione con fluoro produce più energia della reazione corrispondente con l'ossigeno.

Vediamo cosa succede nella combustione più semplice, quella che coinvolge idrogeno ed ossigeno.

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.

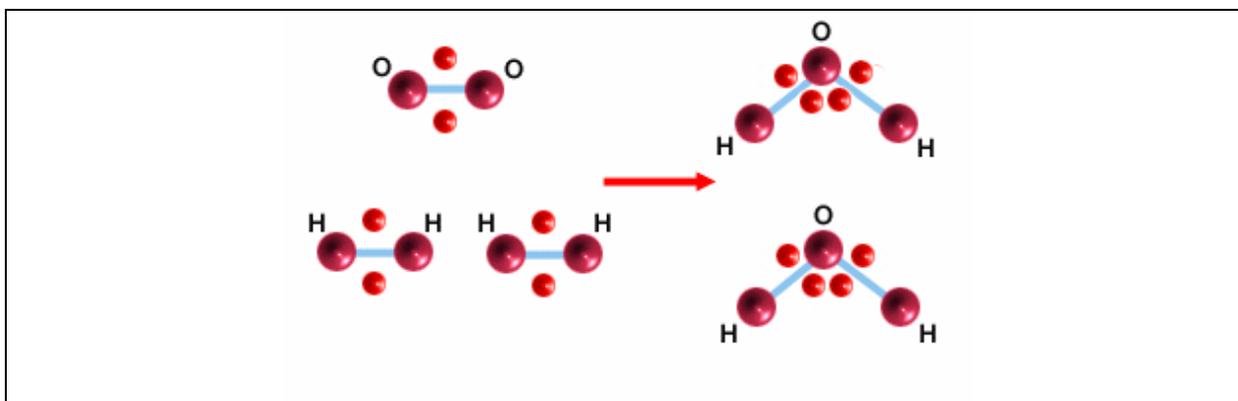


Figura 15 - Equa condivisione degli elettroni nelle molecole di idrogeno e di ossigeno e attrazione degli elettroni di legame verso l'ossigeno nell'acqua ($2H_2 + O_2 \rightarrow 2H_2O$)

Analogamente, nella combustione del carbonio 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.

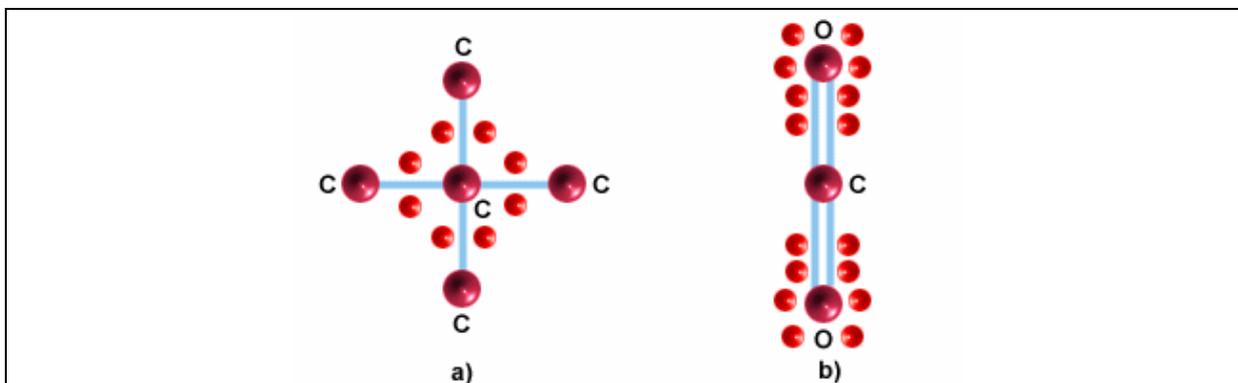


Figura 16 - a) Equa condivisione degli elettroni nel carbonio b) Nell'anidride carbonica gli elettroni di legame sono maggiormente attratti verso l'ossigeno, più elettronegativo ($C + O_2 \rightarrow CO_2$)

Se si definisce combustione qualsiasi reazione chimica in cui un combustibile reagisce con un comburente liberando energia sotto forma di calore, allora è combustione anche la reazione tra combustibile idrogeno e comburente fluoro.

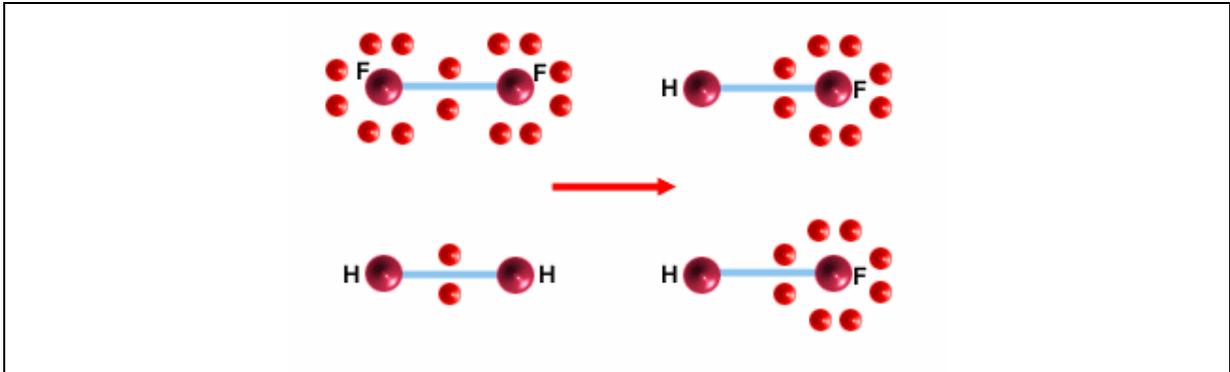


Figura 17 - Equa condivisione degli elettroni nelle molecole dell'idrogeno e del fluoro e attrazione degli elettroni di legame verso il fluoro nell'acido fluoridrico ($H_2 + F_2 \rightarrow 2HF$)

Come si spiega dunque, in base a questa teoria, la liberazione di calore e quindi l'**esotermicità** delle reazioni di combustione?

Si può usare il paragone meccanico con una **molla**. Gli elettroni condivisi equamente negli atomi di comburente e combustibile, prima della reazione, sono paragonabili a **molle "tese"**, e quindi dotate di energia elastica potenziale. Le molle del comburente sono però molto più forti delle molle del combustibile. Così quando, in seguito alla combustione, gli elettroni si portano verso il comburente, si scaricano le molle forti, mentre si caricano ulteriormente le molle deboli. Il risultato complessivo è la liberazione netta, in genere sotto forma di calore, di un certo quantitativo di energia chimica potenziale.

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

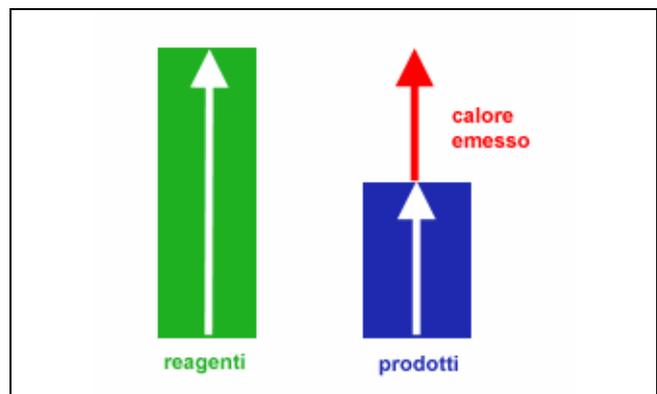


Fig. 18 - La combustione è una reazione esotermica che libera calore perché i reagenti possiedono più energia dei prodotti di reazione

Il calore generato, a sua volta, innalza la temperatura dei partecipanti alla reazione e molto spesso la porta a valori tali per cui essi irradiano energia elettromagnetica con lunghezze d'onda comprese nel campo del visibile. Le zone di reazione ci appaiono allora luminose e si parla di **fiamme**.

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**, prodotto tipico delle combustioni in atmosfera povera di ossigeno.

Mescolati ai prodotti di reazione di carbonio e idrogeno si aggiungono 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**.

1.5. La velocità di combustione

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

Nelle combustioni si liberano grandi quantità di **energia** in quanto gli elettroni di legame tendono a scivolare verso una posizione più stabile, cioè più prossima agli atomi di ossigeno.

Come tutte le reazioni che liberano energia, anche le combustioni dovrebbero avvenire spontaneamente: perché allora alcune rimangono in uno stato di apparente "letargo" per lungo tempo?

La risposta è che le combustioni, 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 liberando l'energia potenziale se prima non supera la barriera di attivazione.

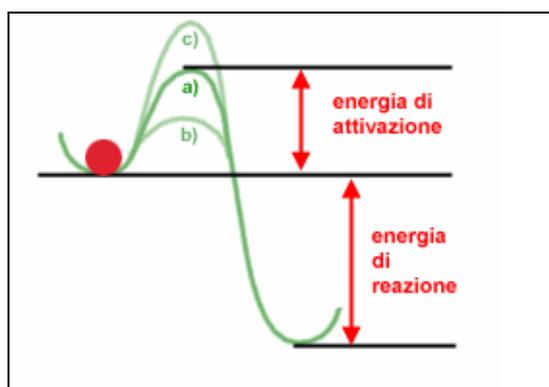


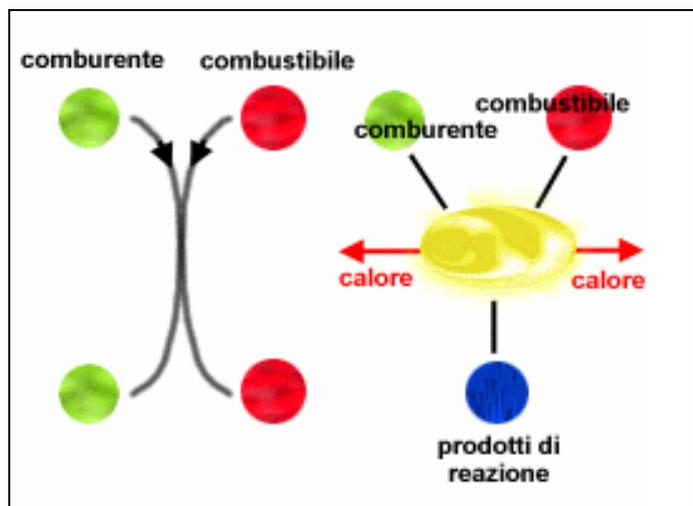
Fig. 19 - L'energia di attivazione (a) è la barriera che si deve superare per poter liberare l'energia di reazione. Un catalizzatore (b) abbassa l'energia di attivazione, mentre un inibitore (c) l'aumenta

Un **catalizzatore** allora 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 in media, cioè in senso statistico, le molecole, e quindi più probabile è che sullo slancio superino la barriera.

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. 20 - 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 facilmente: la temperatura ambiente, fortunatamente, è una temperatura bassa per la maggior parte delle reazioni di ossidazione.

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.

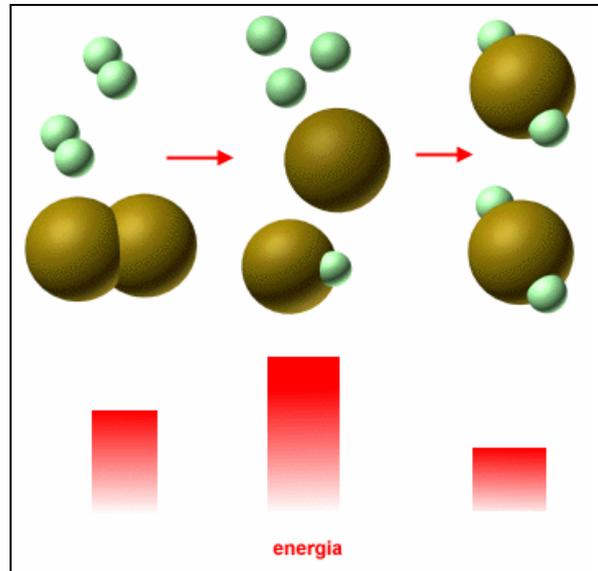


Fig.21

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 la temperatura di accensione, invece, un gran numero di collisioni danno luogo a complessi attivati e perciò la concentrazione dei complessi attivati cresce e la combustione diventa più rapida.

Se poi in un volume abbastanza grande combustibile e comburente, ben miscelati, si portano alla temperatura di accensione in un intervallo ristretto di tempo, 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

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

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

E' utile 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 si trovano a reagire con l'**ossigeno**: il **comburente**.

Il terzo requisito fondamentale è la **temperatura**, che deve permettere alla miscela di combustibile e comburente una reazione di combustione. Questo può avvenire ad esempio per **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 di combustione e quindi la **propagazione** della fiamma.

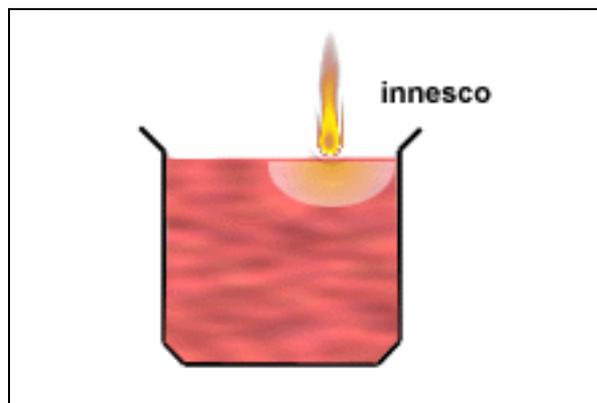


Fig.22

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

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 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 distinguono in **limite inferiore** e **limite superiore** di infiammabilità.

Il limite **inferiore** di infiammabilità 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** di infiammabilità rappresenta la **concentrazione massima** di combustibile in presenza della quale il comburente, cioè l'aria, risulta insufficiente per dar luogo ad una fiamma in grado di propagarsi a tutta la miscela.

Se il gas o vapore infiammabile è diluito con un eccesso d'aria, il calore sviluppato dall'accensione è insufficiente a far salire la temperatura degli strati adiacenti di miscela fino al punto di accensione. La fiamma non può propagarsi attraverso l'intera miscela ma si estingue. Se nella miscela è presente un eccesso di combustibile (al di sopra del limite superiore di infiammabilità), questo funzionerà da diluente, abbassando la quantità di calore disponibile agli 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.

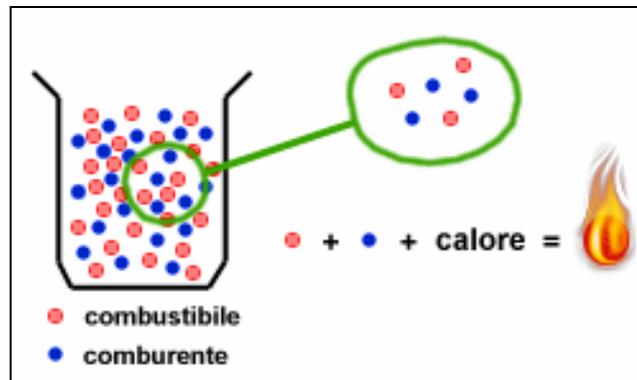


Fig.23

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 di aria.

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

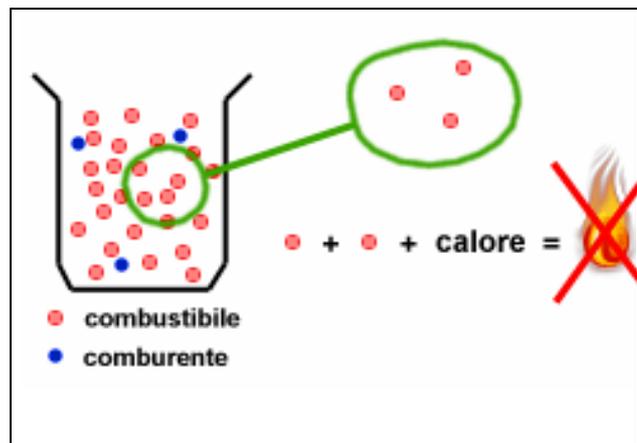


Fig.24

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

Se invece nel nostro recipiente ci sono più palline chiare rispetto a quelle scure, cioè se la quantità di combustibile è superiore a quella di comburente, può accadere che il calore sprigionato dalle palline chiare e scure troverà con maggiore probabilità due palline, in questo caso chiare. Anche in questa situazione la triade necessaria affinché la reazione avvenga non è soddisfatta: manca infatti la pallina scura e la combustione non avviene.

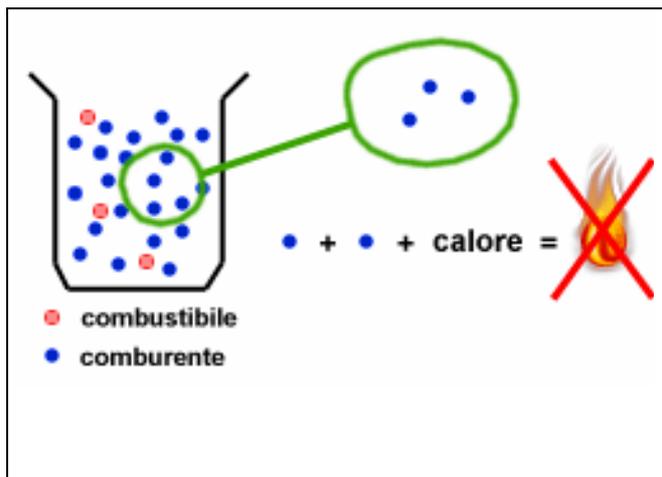


Fig.25

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 le condizioni risultano favorevoli alla propagazione della fiamma.

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.

Inoltre, i limiti di infiammabilità dipendono dalla **pressione** e dalla **temperatura**.

Pressioni più alte tendono ad allargare i limiti di infiammabilità, pressioni più basse a restringerlo.

L'effetto della pressione è legato alla distanza tra le molecole allo stato gassoso e alla conseguente influenza di tale distanza sul trasferimento di energia necessario per la propagazione della fiamma.

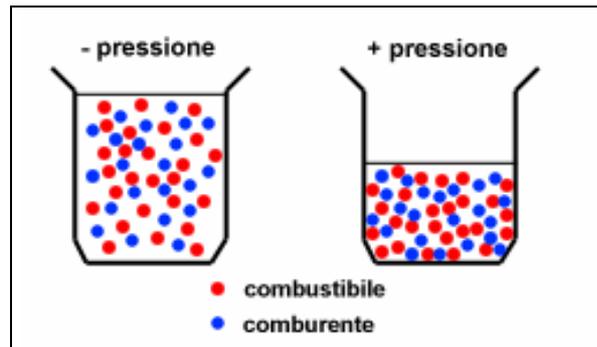


Fig.26

Abbassando la pressione, i limiti di infiammabilità si avvicinano tra loro. A pressioni molto basse la propagazione della fiamma può risultare talmente ostacolata che la miscela diventa non esplosiva. Questo fenomeno è dovuto al fatto che le molecole di combustibile e comburente sono lontane tra loro e risulta poco probabile che vengano soddisfatti contemporaneamente i tre requisiti fondamentali della combustione, vale a dire la presenza contemporanea di combustibile, comburente e temperatura adeguata.

L'aumento della pressione provoca in genere un innalzamento del limite superiore e quindi un allargamento dei limiti di infiammabilità.

Va tuttavia notato che l'andamento dei limiti con la pressione non è per tutti i combustibili quello descritto; infatti si possono presentare situazioni che differiscono da quanto detto e che risultano molto più complesse.

L'aumento della temperatura di una miscela di gas e aria allarga il campo di infiammabilità. Tale andamento è spiegabile considerando la tendenza delle reazioni ad incrementare di molto la loro velocità all'aumentare della temperatura. Anche in questo caso, l'entità dell'effetto è diverso da combustibile a combustibile.

Quando si introduce nell'aria una grande 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 lo contengano in concentrazione molto basse, 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 fiamma.

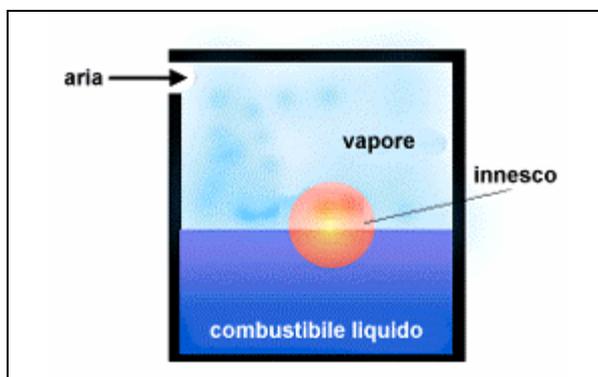


Fig.27

La velocità di propagazione risulta nulla in corrispondenza del limite inferiore e superiore di infiammabilità mentre è massima in corrispondenza del rapporto stechiometrico. Al di là di queste considerazioni qualitative, non è facile prevedere la velocità di propagazione della fiamma: infatti, questa risulta dipendente da un numero **molto grande di variabili** che determinano una propagazione lenta della fiamma o una molto più rapida che prende il nome di esplosione.

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.

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

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

- temperature inferiori ai 20°C indicano sostanze esplosive (ad esempio benzina ed alcol);
- temperature tra 21°C e 65°C indicano sostanze che esplodono solo se riscaldate;
- temperature superiori ai 65°C indicano i normali combustibili (gasolio, olio combustibile e lubrificanti).

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

2.4. Temperatura di accensione

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

La temperatura di accensione è molto importante nei **motori Diesel**. Infatti, non essendo in essi presente la candela (che nei motori a benzina determina l'innesco), viene prima preparata una quantità sufficiente d'aria alla temperatura di accensione del combustibile, che viene quindi iniettato all'interno della camera di combustione dando luogo ad una accensione per autoinnesco.

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. La fiamma

Nella maggior parte degli incendi in corrispondenza del fronte di reazione si ha la manifestazione di **fiamme**.

Le fiamme possono essere classificate in base a due diversi schemi a seconda che si prenda in considerazione la modalità di formazione della miscela combustibile - comburente o la modalità con cui i gas si muovono attraverso la zona di reazione.

Considerando la diversa modalità di formazione della miscela combustibile - comburente si distinguono:

- **fiamma premiscelata**
- **fiamma di diffusione.**

Considerando invece la modalità con cui i gas si muovono attraverso la zona di reazione si distinguono:

- **fiamma laminare**
- **fiamma turbolenta.**

2.6. Fiamma premiscelata e fiamma di diffusione

Si parla di **fiamma premiscelata** allorché il combustibile ed il comburente costituiscono una miscela prima di dar luogo alla reazione di combustione, come si verifica di solito nei bruciatori.

Un esempio è costituito da un tipo di bruciatore chiamato **becco Bunsen**.

Questo è costituito da un tubo di ottone o rame verticale posto su una base di metallo collegata alla rete di distribuzione di gas tramite un tubo di gomma.

Il gas entra attraverso il tubo in un foro e si mescola con l'aria che esso stesso aspira da due aperture laterali; la fiamma così miscelata brucia sulla parte alta del tubo dove appunto si vede la fiamma.

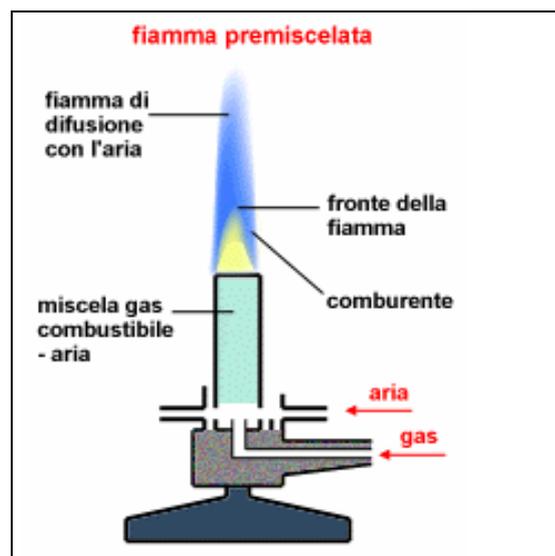


Fig.28 - Fiamma premiscelata.

Si parla di **fiamma di diffusione** allorché il gas combustibile dopo un preriscaldamento reagisce con il comburente (aria) che diffonde verso la zona di reazione e brucia nella zona più luminosa della fiamma in cui si raggiunge la

temperatura più alta. La velocità di propagazione della fiamma è determinata dalla velocità di diffusione del combustibile e del comburente l'uno nell'altro.

La fiamma della **candela** è un esempio di fiamma di diffusione. La cera fonde a causa del calore proveniente dalla fiamma ed una volta fusa passa in fase gassosa; l'aria, a sua volta, diffonde dalla zona esterna verso la zona ove salgono i vapori del combustibile; la superficie sulla quale combustibile e comburente si incontrano è quella dove si sviluppa la fiamma (**fronte di fiamma**).

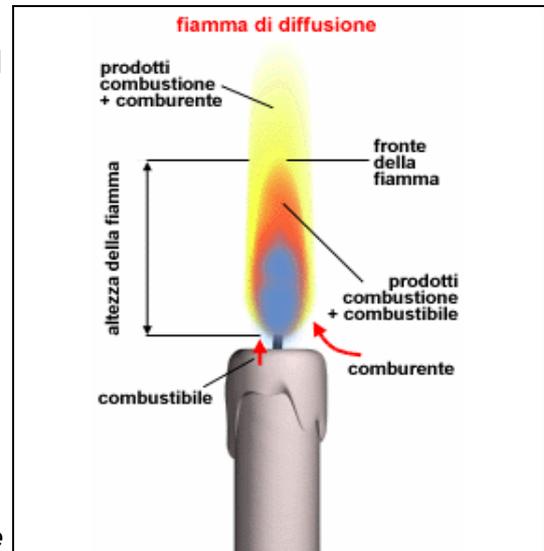


Fig.29 - Fiamma di diffusione

La fiamma a diffusione è utilizzata frequentemente nelle applicazioni pratiche; infatti, dato che combustibile ed aria si miscelano solo nel momento in cui devono reagire e soltanto nello spazio di reazione, essi garantiscono un migliore livello di sicurezza rispetto alle fiamme premiscelate.

2.7. Fiamma laminare e fiamma turbolenta

Per spiegare il significato di fiamma laminare e fiamma turbolenta partiamo da un esempio. Immaginiamo un becco Bunsen nel quale sia possibile regolare la velocità di erogazione del gas e apriamo il rubinetto del gas quel poco che consente alla fiamma di sussistere una volta innescata.

In questo caso il flusso del gas che attraversa il tubo con una certa velocità si mescola con l'aria che entra dai fori laterali e la miscela percorre l'intero tubo mantenendo sempre la stessa velocità e dando luogo in cima ad una fiamma regolare, detta appunto **laminare**. Se si aumenta progressivamente la velocità di erogazione del gas, si vede che - superato un determinato valore - la fiamma assume un andamento vorticoso, come se all'interno di essa interi volumi di molecole fossero spostati casualmente da una parte all'altra: questa è la fiamma **turbolenta**.

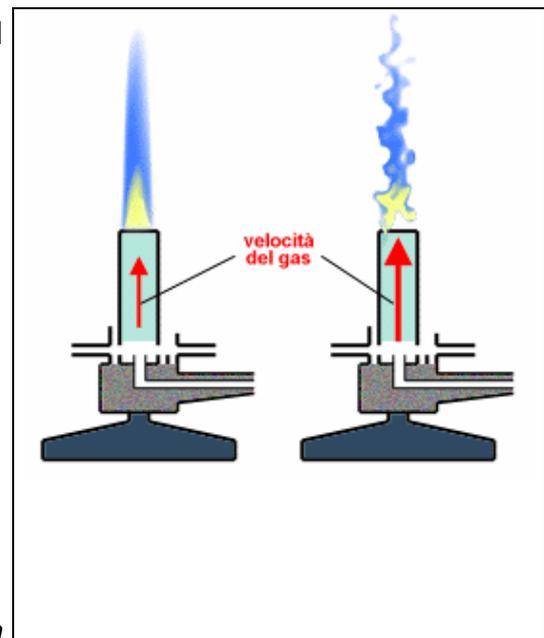


Fig.30 - Fiamma turbolenta

2.8. Distacco e ritorno di fiamma

Partiamo da un esempio ed immaginiamo di avere un becco Bunsen con un rubinetto per regolare la velocità di erogazione del gas in uscita. Il combustibile all'altezza dei due fori laterali si mescola con l'aria e la miscela attraversa con una certa velocità l'intero tubo fino a bruciare in cima con una fiamma.

Se la velocità con cui la miscela esce dal tubo è maggiore della velocità con cui la fiamma si propaga all'interno della miscela, si osserva che la fiamma **si stacca** dal bruciatore e compare ad una certa distanza dal foro di uscita del gas.

Questo fenomeno viene chiamato **distacco di fiamma** e si può presentare in quei combustibili che hanno una bassa velocità di propagazione di fiamma. Le conseguenze possono essere una combustione non completa del combustibile, o addirittura la possibile estinzione della fiamma. Arricchendo il combustibile con idrogeno, che ha una alta velocità di propagazione di fiamma, il fenomeno non si verifica.

Il **ritorno di fiamma** è il fenomeno inverso: esso si presenta quando la velocità di uscita della miscela combustibile è minore della velocità con cui la fiamma si propaga. In questo caso la fiamma tende a rientrare nel condotto dal quale proviene la miscela.



Fig.31 - Distacco e ritorno di fiamma.

Questo fenomeno, come si può immaginare, è molto pericoloso.

Un aspetto che la tecnologia tenta di affrontare è proprio quello della **stabilizzazione della fiamma**, vale a dire dell'utilizzo di modelli di bruciatori che evitino fenomeni di

distacco e ritorno di fiamma e che consentano alla fiamma di rimanere come incollata su una superficie solida.

2.9. Esplosione, deflagrazione e detonazione

Se una reazione esotermica avviene in uno spazio limitato, spesso il calore svolto non può essere dissipato. Come risultato la temperatura aumenta, la velocità di reazione cresce e ciò determina un corrispondente 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.

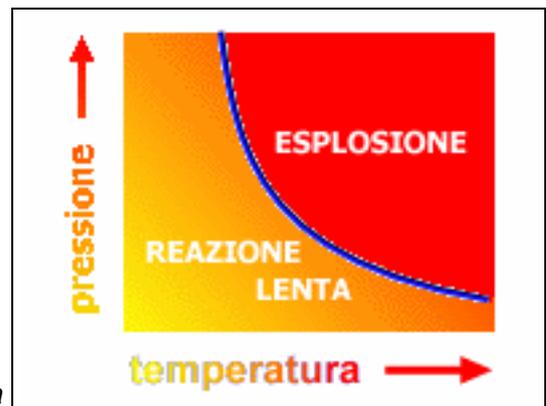


Fig.32 - Pressione critica

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 **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.

I limiti variano però con la pressione e con la temperatura, crescendo in generale all'aumentare di queste.

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

E' molto difficile prevedere attraverso calcoli teorici lo sviluppo e la propagazione della combustione. E' possibile invece valutare alcuni parametri fondamentali che la influenzano e che forniscono elementi guida per la predisposizione delle difese contro gli incendi.

I fattori che più influenzano le combustioni sono:

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

3.2. Potere calorifico

Il potere calorifico si definisce come 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, per i gas in metri o in decimetri cubici misurati in condizioni normali, cioè a pressione atmosferica e a 0°C).

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.

I **valori** del potere calorifico vanno dalle 900 kcal/m³ del gas d'aria alle 11.000 kcal/kg delle benzine automobilistiche ed oltre.

Una descrizione più dettagliata del potere calorifico parte dalla considerazione che i prodotti della combustione contengono quasi sempre vapor d'acqua, che deriva sia dalla presenza di umidità nel combustibile sia dalla presenza di idrogeno nelle molecole.

APPROFONDIMENTO

L'**umidità** può essere contenuta in tutti e tre i tipi di combustibile: solido, liquido e gassoso.

Nei combustibili solidi essa può trovarsi come acqua assorbita da un liquido (acqua di imbibizione) o dall'aria (per igroscopicità dell'ambiente).

L'umidità contenuta nei combustibili diminuisce la velocità di combustione in quanto parte dell'energia termica sviluppata serve a riscaldare e a far evaporare l'acqua.

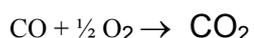
Tenendo conto della presenza di molecole d'acqua nei prodotti, possono esistere due definizioni del potere calorifico, derivanti da due diversi modi di misura dello stesso:

- 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.

La differenza tra potere calorifico superiore e potere calorifico inferiore è dell'ordine del:

- 3 -4% con i combustibili solidi
- 6-7% con i combustibili liquidi
- 8-11% con i combustibili gassosi.

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



Nella pratica, comunque, si fa riferimento soprattutto al potere calorifico inferiore.

Anche negli incendi si può ritenere, con ottima approssimazione, che il calore sviluppato sia valutabile sulla base del potere calorifico inferiore. Tuttavia nella determinazione del carico d'incendio, cioè della quantità equivalente di legna secca contenuta nell'unità di superficie di un locale, la normativa impone di far riferimento ai poteri calorifici superiori, probabilmente per avere una stima più prudente.

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	-	-

APPROFONDIMENTO

Il potere calorifico si può determinare per via sperimentale con vari metodi; per i **combustibili solidi** comunemente si usa la **bomba calorimetrica di Mahler**.

Il dispositivo è costituito da un crogiolo di platino contenuto nella scatola di acciaio inossidabile, robusta tanto da poter resistere a pressioni di decine di atmosfere. Il crogiolo è collegato ad un polo di un generatore di corrente elettrica; inoltre in esso pesca un altro conduttore di platino foggato, nella parte terminale, a spirale e collegato con l'altro polo del generatore, cosicché il circuito elettrico si chiude attraverso il crogiolo stesso.



Fig.33 - Bomba di Mahler.

Nel crogiolo si pone il combustibile in esame; la scatola viene poi chiusa ermeticamente e dalla valvola si introduce l'ossigeno sotto pressione in eccesso. Tutta la bomba viene messa in un calorimetro ad acqua. Si fa quindi passare la corrente nel circuito elettrico, in modo che la spirale, arroventandosi, accenda il combustibile, il quale, a seguito della combustione, riscalda la bomba e l'acqua del calorimetro.

L'aumento della temperatura segnato dal calorimetro permette di ricavare il potere calorifico (kcal/kg) attraverso la seguente formula:

$$P_c = \Delta T (M + m) / P$$

dove:

- ❖ ΔT è la variazione di temperatura registrata
- ❖ M ed m sono le capacità termiche rispettivamente del liquido calorimetrico e della bomba (entrambe note)
- ❖ P è il peso di combustibile bruciato nella bomba.

Il potere calorifico così registrato è a volume costante, in quanto nella scatola il volume rimane pressoché uguale durante la combustione, mentre la pressione varia per il consumo di ossigeno e la produzione di fumi. Per i fumi ha interesse particolarmente il potere calorifico a pressione costante, che può differire anche di

molto da quello a volume costante; con opportune formule è possibile ricavare dal secondo il valore del primo.

Per i **gas** la determinazione del potere calorifico a pressione costante viene eseguita mediante il **calorimetro di Junkers**.

I fumi prodotti dalla combustione attraversano un'intercapedine, raffreddata dall'acqua che circola in una doppia camicia. Il gas a contatto con le pareti fredde dell'intercapedine si raffredda mentre l'acqua si riscalda.

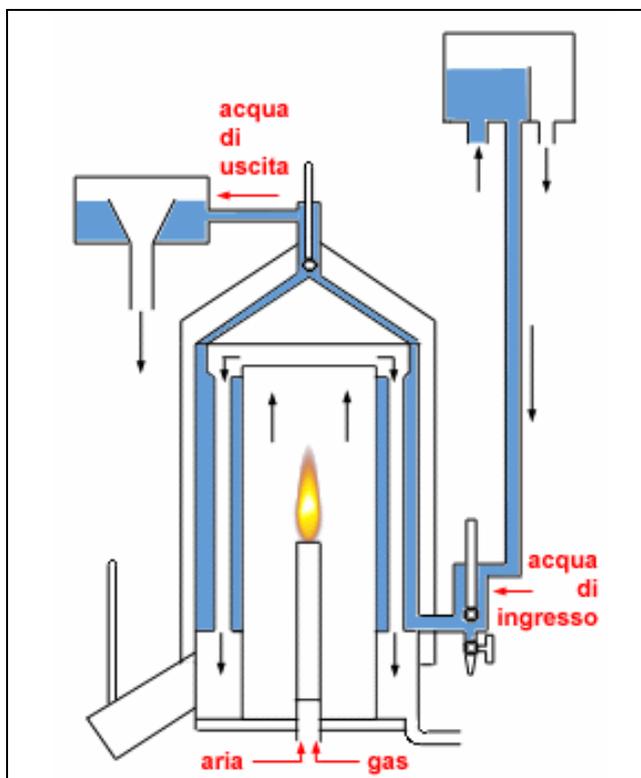


Fig.34 - Calorimetro di Junkers.

Operando in condizioni di regime e con una portata di gas costante è possibile determinare il potere calorifico dalla relazione:

$$P_c = G \Delta T / V$$

dove:

- P_c è il potere calorifico
- G è la portata dell'acqua di raffreddamento
- ΔT è la differenza di temperatura dell'acqua di raffreddamento tra l'uscita e l'entrata
- V è la portata volumetrica del gas bruciato misurata in condizioni normali.

Entrambi i metodi esposti permettono di ricavare sperimentalmente il valore del potere calorifico superiore; il valore del potere calorifico inferiore può essere ricavato con opportune relazioni matematiche.

3.3. Aria necessaria per la combustione

Per bruciare un combustibile sfruttando al massimo la sua capacità di produrre un effetto termico, è necessario farlo **combinare** con una **determinata quantità di ossigeno**.

Tale 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)¹.

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.

Nella pratica non è però sufficiente l'aria teorica: affinché si sviluppi la combustione completa occorre una quantità d'aria maggiore. La parte in più del valore teorico viene chiamata **eccesso d'aria**, e dipende dal tipo di combustibile. L'aria in eccesso non prende parte però alla combustione e la si trova pertanto nei prodotti.

Un difetto d'aria provoca la formazione di prodotti intermedi, quali ad esempio l'ossido di carbonio.

Aria teorica occorrente per la combustione

Combustibile	Aria teorica Nm ³ /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. Tale parametro rappresenta un dato di rilevante interesse pratico in quanto da questo è possibile ricavare informazioni sulla **pericolosità** e sull'**evolversi** della combustione.

¹ Composizione dell'aria (percentuali in volume)

OSSIGENO	AZOTO	ANIDRIDE CARBONICA	ARGON
20,95%	78,08%	0,033%	0,934%

Nell'aria esistono poi componenti minori: Ne 18,18 p.p.m.- He 5,24 p.p.m.-Kr 1,14 p.p.m.-Xe 0,087 p.p.m.- H₂ 0,5 p.p.m.- CH₄ 2 p.p.m.- N₂O 0,5 p.p.m. (p.p.m.= parti per milione)]

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 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 più usati sono il **carbonio** (C) e l'**idrogeno** (H).

APPROFONDIMENTO

Il carbonio e l'idrogeno vengono definiti elementi utili in quanto conferiscono al combustibile due principali requisiti: sviluppare calore in notevole quantità e dare una combustione completa con la minima produzione di sostanze inquinanti.

Un kg di C, infatti, bruciando completamente produce 34,03 MJ di calore, trasformandosi in anidride carbonica che non è dannosa. Un kg di idrogeno produce 144,42 MJ, circa quattro volte più del carbonio, e si trasforma in acqua, che si libera come vapor d'acqua date le temperature a cui la combustione ha luogo.

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

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 è la **pezzatura**, definita come il rapporto tra il volume del legno e la sua superficie esterna. Se un combustibile ha una grande pezzatura vuol dire che le sue superfici a contatto con l'aria sono relativamente scarse ed inoltre ha una massa maggiore per disperdere il calore che gli viene somministrato.

In pratica un pezzo piccolo di legno prende fuoco facilmente anche con sorgenti a relativamente bassa temperatura, mentre un pezzo di legno sufficientemente grande prende fuoco con molta più difficoltà.



Fig. 35 - Pezzatura del legno.

In generale, sia per i combustibili solidi che per quelli liquidi, si ha che 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 del legno (proprietà di trasmettere il calore) determina una minore velocità di propagazione della combustione.

Come è ovvio il legno mantiene le sue proprietà combustibili anche quando viene destinato ad altri usi (essenzialmente nell'arredamento e nell'edilizia) e di questo si deve tenere conto nel progettare le misure antincendio degli edifici.

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

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

APPROFONDIMENTO

Le **ceneri** rappresentano il residuo solido di un combustibile dopo la completa combustione. Sono generalmente formate da impurità minerali (polveri, sabbia) e da composti organo-metallici provenienti dal greggio.

Anche se la quantità è minima, la loro incidenza sulla formazione di fuliggine e sulla corrosione può essere rilevante.

La quantità delle ceneri prodotte viene misurata scaldando il campione finemente polverizzato dentro un crogiolo a temperatura superiore a 850°C.

APPROFONDIMENTO

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.



Fig.36 - Campione di torba

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.



Fig.37 - Giacimento di Lignite.

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.



Fig. 38 - Campione di litantrace

A seconda del basso o dell'elevato contenuto di sostanze volatili si distinguono le litantraci *a corta fiamma* e quelle *a lunga fiamma* (questi nomi derivano dalle caratteristiche della fiamma prodotta dalla combustione dei due tipi di litantrace). Normalmente non vengono usate direttamente come combustibili, ma impiegate per la produzione di **carbon coke** mediante riscaldamento, in ambiente privo di ossigeno, 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.



Fig. 39 - Campione di antracite

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 soprattutto nel 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.

Nella combustione all'interno dei motori è particolarmente importante il miscelamento con l'aria, che prende il nome di **carburazione**. Il combustibile miscelato con l'aria può essere sotto forma di minuscole goccioline di liquido oppure sotto forma di vapore.

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**.

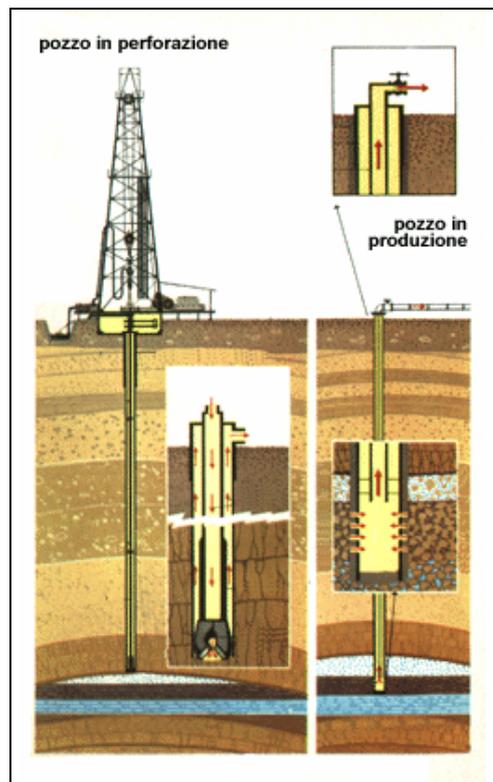


Fig.40 - Pozzo di petrolio

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 fatto che una miscela liquida possa contenere sostanze solide e gassose non deve stupire, basta pensare che l'acqua di mare è una miscela di acqua e di diversi sali tutti solidi).

APPROFONDIMENTO

Tenore di zolfo

Lo **zolfo** pur essendo un combustibile, è un elemento nocivo e indesiderato nei combustibili. Esso infatti ne riduce il potere calorifico perché libera molto meno calore del carbonio e dell'idrogeno. Inoltre favorisce la corrosione e contribuisce in misura cospicua al fenomeno dell'inquinamento atmosferico.

Lo zolfo è contenuto nel petrolio greggio e lo si ritrova dopo la raffinazione soprattutto negli oli combustibili (per legge gli oli non dovrebbero contenere un tenore di zolfo superiore al 3%). E' opportuno osservare che lo zolfo, bruciando, forma SO_2 (anidride solforosa) ed SO_3 (anidride solforica) i quali, combinandosi con il vapor d'acqua presente nei prodotti di combustione, danno luogo ad effetti dannosi dovuti alla formazione di vapori di acido solforico altamente corrosivi. La temperatura a cui avviene la suddetta condensazione è chiamata **temperatura di rugiada acida**.

Il petrolio viene estratto in diverse regioni del mondo mediante l'uso di pozzi e piattaforme marine. La sua origine è stata lungamente discussa ed oggi è certo che 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 viene chiamato **greggio** e non viene usato come tale, ma trasportato in diversi modi (oleodotti, navi cisterna o camion) fino a particolari impianti, chiamati **raffinerie**, nei quali viene lavorato per ottenere i suoi derivati più importanti.

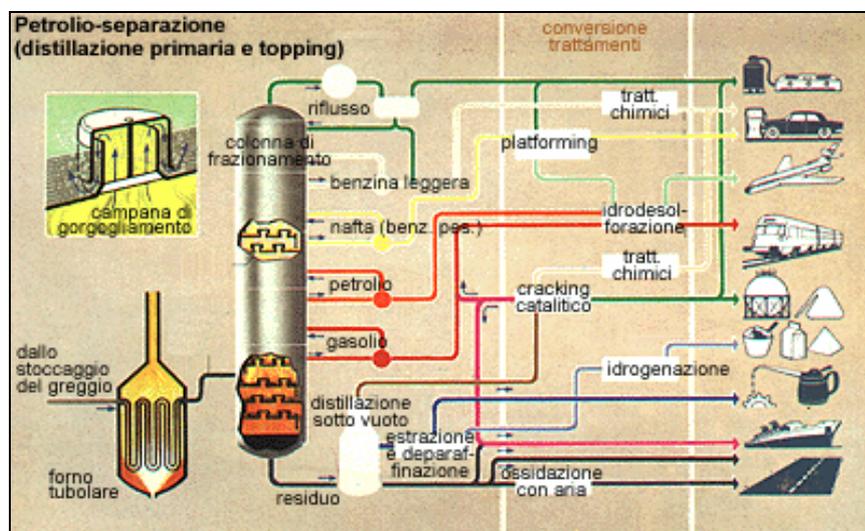


Fig. 41

La principale lavorazione a cui viene sottoposto il petrolio greggio è una **distillazione**². 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, ed il gasolio quella che distilla fra 250° e 340°C, che trova l'impiego più importante nei 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.

Una particolare lavorazione è il **cracking**, usata per ottenere le benzine da idrocarburi ad alto peso molecolare.

APPROFONDIMENTO

Durante il **cracking** (temperature elevate 400-500°C) le molecole ad alto peso si scindono in molecole più piccole; per esempio, da una molecola a dieci atomi di carbonio è possibile ricavarne una ad otto (ottano) e una a due (etilene).

In pratica per una maggiore efficienza si opera in presenza di catalizzatori.

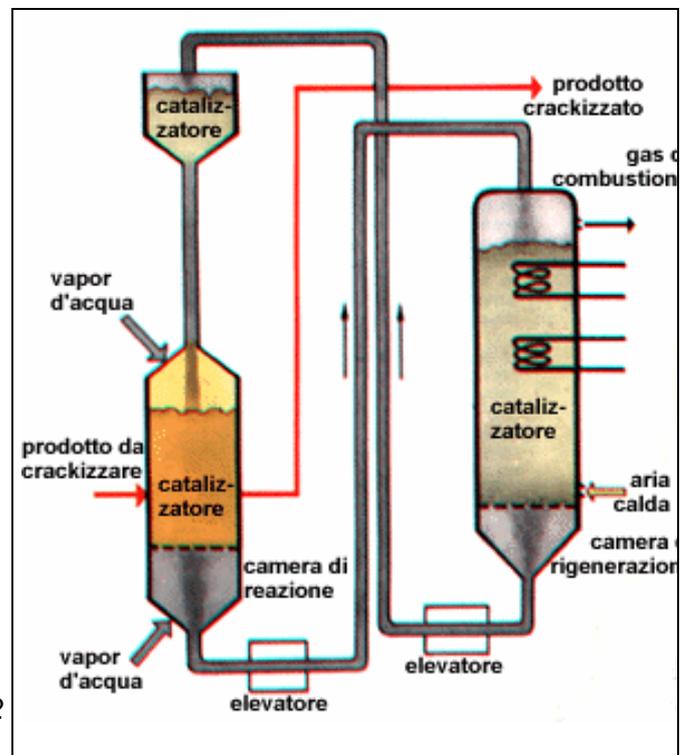


Fig. 42

² La distillazione 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.

In generale tutti i combustibili liquidi sono in equilibrio con i propri vapori, che si sviluppano in misura differente a seconda delle condizioni di pressione e di temperatura, sulla superficie di separazione tra liquido e mezzo che lo sovrasta.

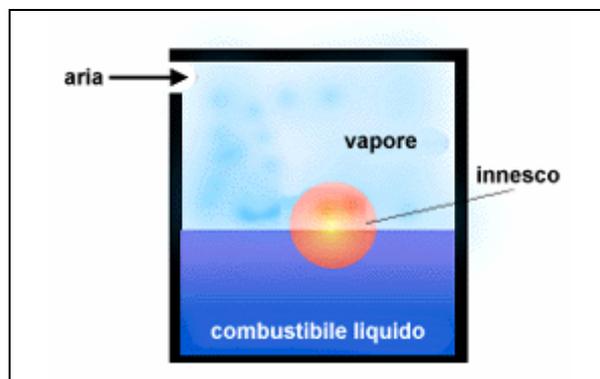


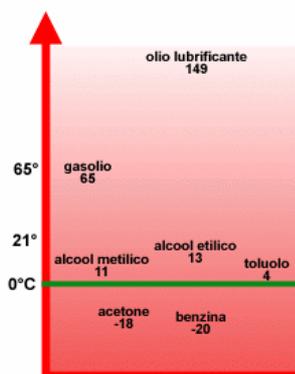
Fig. 43

Nei liquidi infiammabili la combustione avviene quando, in corrispondenza della suddetta superficie, i vapori dei liquidi, miscelandosi con l'ossigeno dell'aria in concentrazioni comprese nel campo di infiammabilità, sono opportunamente innescati. Pertanto per bruciare in presenza di innesco, un liquido infiammabile deve passare dallo stato liquido allo stato vapore.

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 catalogati:

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

Combustibili liquidi



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. 44

Altri parametri che caratterizzano i combustibili liquidi sono la **temperatura di accensione e di infiammabilità**, i **limiti di infiammabilità**, la **viscosità** e la **densità dei vapori**.

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.

Fra due liquidi infiammabili entrambi con temperatura di infiammabilità inferiore alla temperatura ambiente è comunque **da preferire** quello a **più alta temperatura di infiammabilità** in quanto a temperatura ambiente emetterà una minore quantità di vapori infiammabili, diminuendo così le possibilità che si formi una miscela aria - vapori nel campo d'infiammabilità.

Ulteriori elementi negativi per quanto riguarda il pericolo di incendio sono rappresentati da:

- bassa temperatura di accensione del combustibile, che comporta una minore energia di attivazione per dare inizio alla combustione;
- ampio campo di infiammabilità, in quanto risulta più esteso l'intervallo di miscelazione vapore - aria per il quale è possibile l'innesco e la propagazione dell'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 combustibili più pericolosi quelli **più pesanti dell'aria**, in quanto in assenza o scarsità di ventilazione tendono ad accumularsi e a ristagnare nelle zone basse dell'ambiente formando più facilmente miscele infiammabili.

APPROFONDIMENTO

Viscosità

La viscosità è definita come il rapporto tra il tempo impiegato nell'efflusso di una definita quantità di combustibile attraverso un ugello calibrato ed il tempo impiegato da una pari quantità di acqua distillata a 20°C.

La viscosità così misurata dipende notevolmente dalla temperatura del combustibile.

Combustibile	Viscosità
Benzina auto	0,75 a 20°C
Gasolio	1,2 - 3 a 20° C
Olio vegetale	12,5 - 14 a 20° C

La misurazione avviene normalmente con il viscosimetro di Engler.

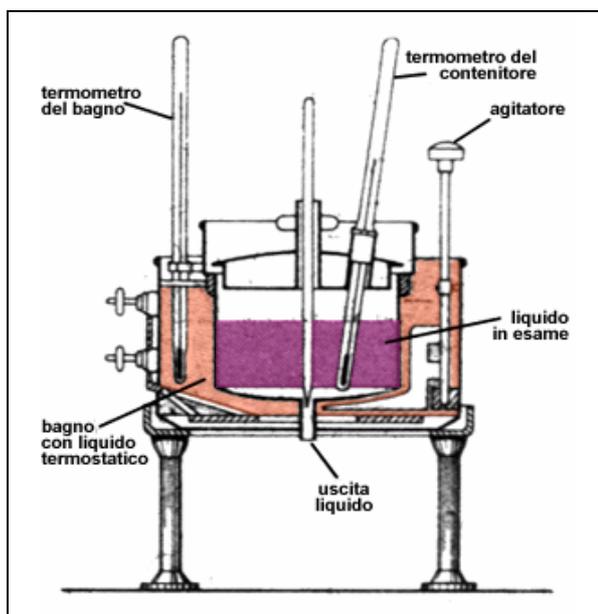


Fig.45

4.4. Combustibili gassosi

Fra i combustibili gassosi naturali, i più importanti sono senza dubbio gli idrocarburi gassosi: **metano, etano, propano e butano** (il primo è il comune gas da cucina usato nelle grandi città, l'ultimo il gas contenuto, ad esempio, nelle bombole dei fornelli da campeggio).

Questi combustibili sono migliori dei combustibili liquidi naturali perché sono generalmente molto puri, possono essere miscelati facilmente con l'aria (e quindi con l'ossigeno) per avere un'ottima combustione e bruciano senza dare origine a sostanze incombuste e a fumi. L'unico rischio, comune peraltro a quasi tutti i combustibili naturali, consiste nella possibile **formazione di monossido di carbonio** se la disponibilità di ossigeno è limitata.

Inoltre, possono essere **trasportati** e **distribuiti con facilità** allacciando le abitazioni direttamente alla rete delle società del gas, evitando pericolosi e costosi depositi ed immagazzinamenti. Altro vantaggio è la **facilità di regolazione** del flusso di gas e quindi della quantità di calore prodotta.

Il **metano** è molto diffuso nel sottosuolo di un gran numero di paesi, inclusa l'Italia, e spesso si trova associato ai giacimenti petroliferi. In questi ultimi casi a volte la sua raccolta può addirittura risultare economicamente sconveniente e per questo motivo si preferisce distruggerlo incendiandolo prima di iniziare l'estrazione del petrolio. Come si può facilmente intuire 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 l'acqua e non c'è il rischio della possibile formazione di monossido di carbonio).



Fig. 46

Come per i liquidi infiammabili, anche per l'idrogeno risultano fondamentali alcuni parametri quali:

- temperatura di accensione
- limiti di infiammabilità
- densità rispetto all'aria.

I **gas** in base alle loro caratteristiche fisiche vengono divisi in:

- gas leggeri
- gas pesanti.

Si definisce **gas leggero** un gas avente densità rispetto all'aria inferiore a 0,8 (idrogeno, metano, ecc.).

Si definisce **gas pesante** un gas avente densità rispetto all'aria superiore a 0,8 (GPL, acetilene, ecc.) Un gas pesante quando liberato dal proprio contenitore tende a stratificare e a permanere nella parte bassa dell'ambiente.

APPROFONDIMENTO

Gas

E' noto che tutte le sostanze possono esistere allo stato gassoso in particolari condizioni di pressione e di temperatura. Sono però definiti gas solo quelli che si trovano allo stato gassoso nelle condizioni normali di pressione e di temperatura (pressione atmosferica, 15°C).

4.5. Conservazione dei gas

I gas vengono conservati all'interno di **contenitori** (grandi serbatoi , bombole, bottiglie ecc.), in genere **sotto pressione** oppure **liquefatti** in maniera da consentire una più semplice stoccaggio.

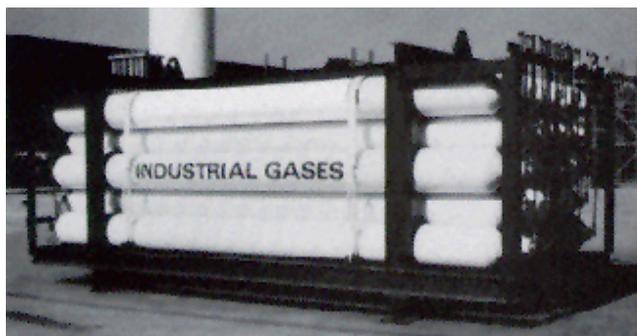


Fig.47 - Contenitori di gas sotto pressione.

La modalità con cui lo stoccaggio viene eseguito, è rilevante al fine di prevenire eventuali cause d'incendio.

Gas compressi - Sono quelli conservati allo stato gassoso sotto pressione alla temperatura ambiente in appositi recipienti. 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
Anidride carbonica	20

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. La pressione all'interno del recipiente, fin tanto che sono presenti le due fasi, dipende esclusivamente dalla temperatura. 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 provoca 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/dm ³)
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 particolare contenitori, ma a **temperature e pressioni molto basse**. Questi gas non possono essere conservati indefinitamente in un contenitore, poiché anche la temperatura dell'ambiente circostante può generare delle condizioni di pressioni non sostenibili per qualunque recipiente. E' necessario quindi rendere possibile una minima evaporazione, che consenta di restituire, 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).

4.6. Inquinamento da combustibili

Qualunque sistema energetico provoca alterazioni all'ambiente. Per quanto riguarda i combustibili essi sono fonte di inquinamento alla produzione, alla lavorazione e durante l'uso (inquinamento da combustione). La fase di maggior inquinamento avviene durante l'uso del combustibile. Le maggiori quantità di inquinanti scaricati nell'atmosfera in seguito all'impiego di combustibili derivano dalla combustione di carbone ed oli combustibili.

I combustibili solidi portano inquinamento atmosferico a causa del loro contenuto di zolfo e sostanze minerali.

Lo zolfo viene immesso nell'aria come **SO₂** o **SO₃** (anidride solforosa e solforica), mentre i minerali come **ceneri**.

Anche il petrolio grezzo contiene zolfo mentre è quasi privo di sostanze minerali. E' possibile un processo di desolforazione che è però molto costoso.

Pressoché non inquinanti in seguito alla combustione sono i gas naturali, che vengono distribuiti agli utenti già depurati.

La presenza nei prodotti della combustione di sostanze **carboniose (CO)** e di **ossidi di azoto (NOx)** non dipende tanto dalla qualità del combustibile, quanto dalle condizioni in cui si realizza la combustione.

La formazione di monossido di carbonio è determinata dalla combustione incompleta.

Gli ossidi di azoto si producono in tutti i processi di combustione con aria. La loro formazione è favorita dagli eccessi d'aria .

La quantità di ossidi di zolfo dipende invece soltanto dal tenore di zolfo del combustibile quindi per limitarli è necessario agire sul combustibile stesso.

Esiste una relazione tra la quantità di combustibile bruciato e la quantità di inquinanti emessa (**emissione specifica media**, definita come la quantità in kg di inquinante emessa per ogni tonnellata di combustibile bruciato).

Emissioni specifiche medie per diversi combustibili (*)

Combustibili	Polveri	SOx	NOx	CO	Pb
Benzina per auto	2	0.2	18	430	14
Gasolio per motori	16	20	32	9	-
Olio combustibile	12-25	48-52	2-13	-	-
Gas naturale	-	-	19-62	-	-
Litantrace	100	17	4-9	-	-

(*) In kg di inquinante emesso per ogni tonnellate di combustibile bruciato

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 anche bruciare tranquillamente.

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**.

Negli esplosivi da impiegare in sotterraneo è prescritto che il bilancio di ossigeno sia positivo, per ridurre al minimo e possibilmente evitare la formazione di CO o di altre sostanze ancora combustibili, e come tali pericolose, nei prodotti gassosi dell'esplosione.

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.

La sensibilità si distingue in:

- **sensibilità all'urto**: viene espressa indicando il peso in kg del grave impiegato e l'altezza di caduta in centimetri necessaria a provocare lo scoppio dell'esplosivo;
- **sensibilità allo sfregamento**: viene determinata da uno strumento, costituito da una placchetta di porcellana ruvida su cui viene disposta una piccola quantità di sostanza in prova (10mm^3) e da un piccolo cilindro di porcellana ruvida che viene premuto su di essa con una forza misurabile;
- **sensibilità all'innescò**: si misura sottoponendo l'esplosivo, confezionato in cartucce, all'azione di capsule di potenza progressiva fino a determinare qual è quella che ne provoca l'esplosione completa.

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 ($T = \text{quantità di calore} / \text{calore specifico}$); 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**.

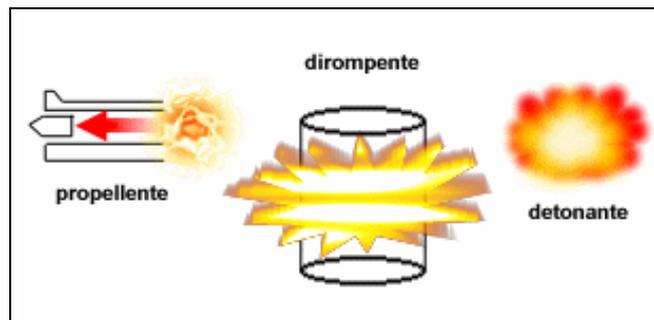


Fig.48 - Tipi di esplosivi.

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.

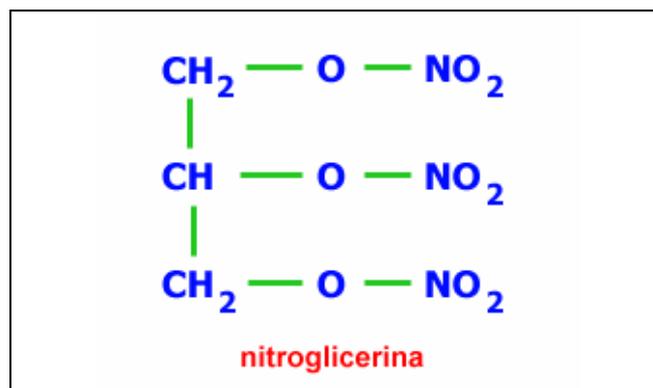


Fig.49 - Struttura della nitroglicerina

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

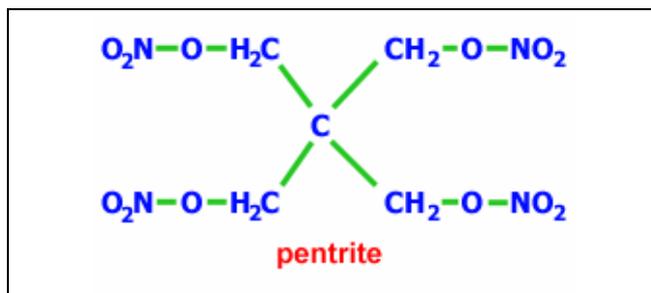


Fig.50 - Struttura della pentrite

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 bianca 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 sviluppatasi 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 in forte concentrazione provoca una accelerazione del ritmo respiratorio, con la conseguenza che, se sono presenti gas tossici, aumenta la quantità di sostanze tossiche immesse nell'organismo. Inoltre 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 approfonditamente 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.

Negli incendi l'eccesso d'aria non è mai assicurato, quindi vi è una notevole possibilità che all'interno dei fumi siano presenti gas tossici.



Fig.51

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 scottature.

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 dannose.

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:

- ❖ $\sum_{(1 \rightarrow n)}$ = somma estesa a tutti gli n materiali combustibili presenti
- ❖ Q = carico d'incendio
- ❖ 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 delle finestre 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 **carenza 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 in edifici è determinato frequentemente da una modesta sorgente di energia che viene a contatto più o meno stretto 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.

L'energia assorbita e la temperatura per la quale la combustione prosegue da sé, vengono dette **energia di ignizione e temperatura di ignizione**. 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 ai vari elementi combustibili e quindi, per gradi, a tutto il locale.

APPROFONDIMENTO

Si consideri ad esempio un materiale organico, per esempio cellulosico. In presenza di una sorgente di calore, se esso raggiunge una temperatura di 200 °C o superiore, incomincia a decomporsi per effetto del calore ricevuto e a svolgere vapori e gas infiammabile. Questi si accendono per effetto della sorgente di calore, o anche spontaneamente se la temperatura è uguale o superiore alla temperatura di autoignizione, dando luogo a reazioni esotermiche per effetto delle quali la temperatura cresce.

Se il calore che perviene alla parte adiacente di materiale combustibile riesce ad elevarne sufficientemente la temperatura e a far gassificare una parte del materiale, l'incendio si estende.

Nella fase iniziale, l'ossigeno disponibile è largamente sufficiente per le poche reazioni in atto e si possono verificare le condizioni di ignizione.

Spesso però la temperatura degli elementi combustibili non riesce a raggiungere il valore critico (dipendente dal materiale) su un volume sufficiente e la combustione dopo un po' cessa, poiché il calore svolto è minore di quello dissipato e la temperatura scende al di sotto di quella che mantiene la combustione (temperatura di infiammabilità).

La continuazione o meno del processo di combustione dipende dal **bilancio termico** che si instaura. Infatti il calore generato in parte è disperso nell'atmosfera circostante ed in parte serve per riscaldare le parti adiacenti di materiale non coinvolto nella combustione, fino alla temperatura di decomposizione.

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.

Il procedere o l'arresto del processo di combustione è governato da bilanci energetici istantanei. Infatti con l'aumento della temperatura aumentano sia la produzione che le perdite di calore. Se l'apporto di calore supera le perdite, allora la temperatura aumenta ed il processo prosegue; se, ad un certo istante, le perdite superano l'apporto di calore, la temperatura diminuisce e può verificarsi l'autoestinzione.

7.3. Fasi di un incendio

L'incendio viene di solito distinto in tre 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 massima fino all'estinzione totale. La fase di estinzione si ritiene completata quando la temperatura media raggiunge circa i 300°C.

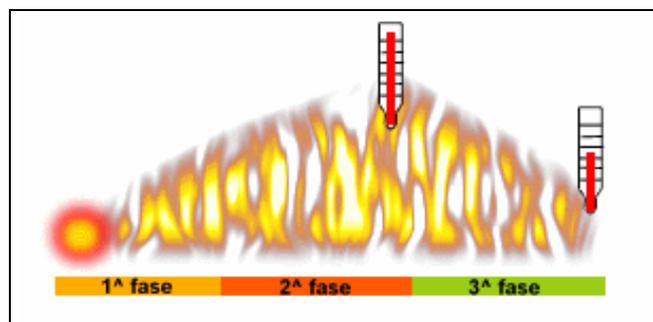


Fig.52 - Schema delle fasi di un incendio

7.4. Fase iniziale o di accensione

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 mobile 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 abbastanza rapidamente e le differenze di temperature da punto a punto tendono a divenire sempre più piccole.

La prima fase è molto importante per l'ulteriore sviluppo del fuoco o per la sua eventuale autoestinzione e 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 nel combustibile
- 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).

Un fattore importante risulta essere il **grado di infiammabilità** dei materiali combustibili. Perché l'oggetto combustibile si accenda è necessario che, oltre ad essere molto vicino alla sorgente, sia in grado di svolgere un notevole volume di gas e vapori infiammabili in tempi relativamente brevi. Se tutto ciò non avviene la sorgente termica si esaurisce prima che si verifichi l'ignizione.

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. In questa fase l'incendio può essere evidenziato solo da sensori a ionizzazione.



Fig.53 - Sensori a ionizzazione

2° Stadio (di propagazione)

Tale stadio è caratterizzato da:

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

In questo stadio vengono coinvolti altri oggetti combustibili (mobili, rivestimenti di pareti ecc.).

Il progredire dell'incendio dipende dalle caratteristiche di infiammabilità 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.

Inoltre 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.

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:

- brusco incremento della temperatura
- crescita esponenziale 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.

Questo terzo stadio viene ulteriormente suddiviso in **due parti**.

Stadio 3a - All'inizio l'incendio si propaga ad un oggetto adiacente, 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 delle superfici combustibili. Con una adeguata ventilazione, l'incendio prosegue da oggetto a oggetto, mentre le fiamme e i gas caldi irradiano in tutte le direzioni energia termica che colpisce il pavimento e gli oggetti contenuti nel locale. In questo stadio la temperatura ha raggiunto un valore tale per cui risulta molto improbabile l'autoestinzione.

Stadio 3b - Si ha una propagazione rapida dell'incendio, la temperatura media supera i 500°C, 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. La temperatura aumenta oltre i 600°C e tutti i materiali combustibili esposti emettono gas infiammabili. L'incendio si sviluppa con pieno vigore e le temperature crescono rapidissimamente. E' questo lo stadio chiamato **flashover** o di **infiammazione generalizzata**.

Successivamente 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 di altro ossigeno dell'aria, bruciano sulla facciata dell'edificio.

L'incendio vero e proprio inizia nel punto chiamato **flashover**. Esso 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.

E' possibile dare almeno 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 inferiore di infiammabilità dei materiali cellulosici.

Il **flashover** è caratterizzato dall'apparizione quasi simultanea di una serie di fenomeni:

- i fuochi determinati dalla combustione dei gas di distillazione o di combustione aumentano di numero e di intensità
- le temperature nei diversi punti del locale tendono a diventare uniformi
- la combustione al verificarsi del flashover accelera notevolmente e richiede considerevoli volumi di ossigeno
- il tenore di ossidi di carbonio all'interno del locale 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 si verifica dopo un tempo che va da 3 ai 30 minuti dall'inizio dell'ignizione e la temperatura media raggiunge i 600°C.

7.5. Fase dell'incendio vero e proprio

Dopo il flashover inizia la fase a **combustione costante**.

La temperatura media è abbastanza elevata, la quantità di calore in gioco è notevole e i materiali combustibili sviluppano grandi quantità di gas infiammabili.

La **temperatura** nel locale non è uniforme, i pavimenti e le parti inferiori dei muri raggiungono temperature minori di quelle raggiunte dalle parti superiori dei muri o dai soffitti; tuttavia le differenze non sono eccessive e il fenomeno si può ritenere che avvenga alla temperatura di combustione media dei gas.

La **potenza termica** generata dipende dalla velocità di combustione che, a sua volta, dipende dalla portata d'aria entrante e dalla quantità di calore sviluppata dal combustibile nelle condizioni in cui avviene la combustione.

Della potenza termica generata, mediamente, oltre il 60% viene asportata con i gas di scarico, circa il 10% viene irradiato attraverso le finestre verso l'esterno e circa il 30% va ad accumularsi nelle 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 (in generale combustione senza fiamma) e quella residua delle strutture che delimitano il locale.

Il **calore** accumulatosi permane per tempi abbastanza lunghi e la sua restituzione avviene in relazione al salto termico fra la temperatura superficiale e quella dei gas all'interno del locale, alle caratteristiche termiche e, infine, alla ventilazione del locale.

Questa terza fase non dovrebbe essere trascurata: il suo effetto è particolarmente importante nella distribuzione della temperatura della facciata compresa tra il piano incendiato e quello soprastante; una notevole potenza termica continua ad essere asportata coi fumi, a disperdersi per irradiazione attraverso le finestre, mentre l'afflusso di aria fresca abbassa notevolmente la temperatura media.

Questa fase termina quando la temperatura raggiunge i 300°C circa.

7.7. Propagazione degli incendi

Prendiamo ora in esame alcuni dei meccanismi attraverso i quali si propaga un incendio.

Le **correnti di fumo** nella zona di combustione contribuiscono alla propagazione attraverso:

- **termoespansione dell'aria causata dall'aumento di temperatura:** un aumento della temperatura provoca infatti un proporzionale aumento del volume occupato dal gas. Durante un incendio questo fenomeno provoca la rottura delle finestre e delle porte;
- **effetti camino:** quando la temperatura negli ambienti si è stabilizzata il principale meccanismo di movimento dei fumi diventa il tiraggio. Il tiraggio per manifestarsi ha bisogno di *camini* quali scale, vani ascensore, cave di impianti e così via. Di qui la pericolosità negli edifici di tutti gli attraversamenti di piano non protetti adeguatamente;

- **eventuali azioni del vento:** il vento può far muovere verticalmente il fumo, ma il suo 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 nell'edificio 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 tuttavia essere progettati anche per l'estrazione dei fumi in caso di incendi e venire così integrati nel sistema di protezione dell'edificio.

La propagazione a distanza degli incendi, oltre che per effetto della convezione dei fumi caldi, 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 le pareti e solette può portare alla temperatura di accensione anche sostanze combustibili contenute in locali non direttamente investiti dalle fiamme.

Un altro meccanismo importante per la propagazione degli incendi è **l'irraggiamento termico**. Il calore per irraggiamento può essere trasmesso direttamente dalla sorgente al ricevitore 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 interne irradia poi in uguale misura: meno pericolose sono le pareti, soprattutto se dotate di buona resistenza al fuoco e quindi capaci di non aumentare troppo la temperatura. Al contrario risultano molto pericolose le aperture e, in genere, tutte le superfici che lasciano vedere le fiamme.

7.8. Casi tipici di propagazione di incendi

Esaminiamo alcuni casi tipici di propagazione all'interno e all'esterno di un fabbricato in cui ha avuto origine l'incendio.

Estensione di un incendio all'interno di un locale - I fattori più rilevanti da cui dipende la propagazione dell'incendio sono:

- estensione del locale
- posizione della sorgente di ignizione in rapporto alla distanza dai muri e dalle finestre
- stato delle porte e delle finestre (chiuso o aperto)
- natura e distanza reciproca degli oggetti contenuti soggetti a calore radiante
- natura dei rivestimenti delle superfici del locale (muri, pareti, soffitti).

Estensione al resto dell'appartamento - La propagazione al resto dell'appartamento avviene più o meno facilmente a seconda di come i diversi locali sono tra loro comunicanti. Nel caso i locali siano direttamente collegati, la propagazione avviene attraverso le fiamme e i vapori che attraversano le porte aperte. I materiali combustibili, già essiccati e preriscaldati dai fumi, rappresentano

una facile esca per il fuoco. Nel caso i locali siano collegati tra loro attraverso corridoi, assume molta importanza il rivestimento del soffitto e del pavimento (infatti il soffitto sarà riscaldato e il calore irraggiato verso il pavimento) nonché la geometria del corridoio e il suo stato di ventilazione.

Propagazione fuori dall'appartamento (all'interno del fabbricato) - La propagazione di un incendio all'interno di un edificio si può verificare ad uno stesso piano o ai piani superiori e dipende:

- dalla disposizione dei locali
- dalle vie di comunicazione (corridoi, scale, ecc.)
- dalla natura delle superfici esposte e dagli eventuali rivestimenti
- dallo stato delle porte (chiuso o aperto)
- dalle condizioni aerodinamiche.

Nel caso di propagazione a piani superiori, questa può avvenire:

- per distruzione della porta d'ingresso da parte della fiamma o dei fumi
- per passaggio attraverso le cavità non chiuse o fessure (solai, canalizzazioni collettive)
- per passaggio delle fiamme che, fuoriuscite dalle finestre, penetrano in quelle soprastanti.

Propagazione attraverso nuclei tecnici - Per nuclei tecnici si intendono tutte le canalizzazioni, verticali o orizzontali, o cavità esistenti negli edifici e destinate ad alloggiare mezzi e servizi tecnici (scale, ascensori, montacarichi). Se il fuoco riesce a pervenire ad un nucleo tecnico verticale le fiamme ed i gas caldi, sotto la spinta ascensionale, salgono rapidamente e sono scaricati all'aperto se gli edifici sono muniti di una apertura di sfogo. Se l'edificio in sommità è chiuso, i gas accumulatisi nella parte alta tenderanno in seguito a propagarsi verso il basso e lateralmente. Nell'ascesa i gas caldi possono provocare l'incendio di eventuali materiali combustibili presenti lungo il percorso.

Propagazione all'esterno del fabbricato - La propagazione all'esterno del fabbricato può avvenire:

- per irraggiamento delle fiamme
- per convezione
- per trasporto di materia
- per contatto diretto.

Analizziamo innanzitutto la propagazione **per irraggiamento delle fiamme**.

La quantità di calore irradiato dalle fiamme attraverso le finestre è dell'ordine del 10% di quella prodotta. Essa, come è noto, dipende dalla superficie delle finestre, dalla quarta potenza della temperatura assoluta, dal tempo di esposizione e dal coefficiente di emissione. L'intensità di radiazione, ottenuta riferendo la quantità di calore irradiato alla superficie e al tempo, aumenta con il carico d'incendio.

Un edificio esposto può incendiarsi per effetto del flusso di calore radiante incidente se supera certi valori critici (**irradianza critica**), determinabili sperimentalmente, e se si prolunga per un periodo di tempo sufficiente.

In base all'intensità del calore irradiato dall'incendio, è possibile valutare l'intensità del calore incidente che perviene alle facciate degli edifici circostanti.

Si osservi che la propagazione per irraggiamento può avvenire anche per accensione di oggetti prossimi alle finestre, specie se sottili e facilmente infiammabili (tende, tendine, ecc.) ed anche di altri oggetti combustibili, contenuti nell'interno ma raggiunti dal calore radiante attraverso la finestra.

La propagazione **per convezione** avviene solo se la temperatura della corrente gassosa è di parecchie centinaia di gradi, come può verificarsi in vicinanza della fiamme uscenti dalle aperture.

La propagazione **per trasporto di materia** si basa sul fatto che le correnti ascensionali di gas caldi e fumi, per effetto della notevole temperatura raggiunta, possono pervenire fino ad altezze considerevoli trascinando fumi e faville e anche tizzoni accesi, che, trasportati dal vento, possono ricadere anche a distanze notevoli (500 metri e più).

L'incendio può propagarsi **per contatto diretto** quando strutture combustibili di un edificio siano in prosecuzione o a stretto contatto con le analoghe del fabbricato confinante (solai, tetti).

8. PREVENZIONE DEGLI INCENDI

8.1. Cause degli incendi

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 il 9% del totale, al secondo posto dopo le cause elettriche.

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



Fig. 55

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 sia il materiale che 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.

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

Tenendo presente quanto detto, sarà opportuno immagazzinare una sostanza soggetta a combustione spontanea in zone di dimensioni modeste sistemate vicino agli ingressi.

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 accesi, 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.



Fig. 56

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



Fig. 57

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.

Inoltre è opportuno prendere delle misure di sicurezza aggiuntive per evitare la propagazione dell'incendio.



Fig. 58

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

- impiego e detenzione delle bombole di gas utilizzate negli apparecchi di riscaldamento (anche quelle vuote)
- 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. Classificazione degli incendi

Gli incendi si dividono in cinque classi.

Classe A: incendi di materiali solidi, combustibili, infiammabili e incandescenti come legname, carboni, carta, tessuti, trucioli, pelli, gomma e derivati, rifiuti che fanno brace e il cui spegnimento presenta particolari difficoltà. Su questi incendi l'acqua o la schiuma hanno notevole efficacia.

Classe B: incendi di materiali e liquidi per i quali è necessario un effetto di copertura e soffocamento come alcoli, solventi, oli minerali, grassi, eteri, benzine, ecc.

Classe C: incendi di materiali gassosi infiammabili come idrogeno, metano, acetilene, etilene, propilene ecc.

Classe D: incendi di sostanze chimiche spontaneamente combustibili in presenza d'aria e reattivi in presenza d'acqua.

8.3. Specifiche misure di prevenzione incendi

Con il termine **prevenzione** si intende l'insieme delle azioni che devono essere affrontate per impedire il verificarsi 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
- b) in fase di esercizio
- c) in fase di addestramento del personale o degli utenti di una particolare attività.

Fase di progettazione - 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 degli uomini e degli impianti.

Riportiamo per sommi capi alcuni elementi che determinano una valida progettazione:

- scelta, sul piano tecnologico, dei procedimenti e delle soluzioni che presentano i minori pericoli, come ad esempio l'adozione dei solventi meno infiammabili;
- scelta, sul piano impiantistico, dell'area su cui far sorgere l'impianto considerando le esigenze e gli eventuali pericoli (inquinamenti, incendi, perdite, rumori, ecc.);
- distanza tra i singoli impianti di una stessa attività produttiva (per evitare l'eventuale propagazione dell'incendio);
- creazione di una rete viaria indispensabile per garantire facilità di accesso a mezzi di pronto intervento ed evacuazione rapida;
- suddivisione dell'impianto in aree omogenee per pericolosità, onde riservare a ciascuna di esse i sistemi di protezione e difesa più adatti;
- protezione delle aree pericolose (attraverso bacini di contenimento, impianti fissi antincendio, ecc.);
- suddivisione dei grandi ambienti chiusi in locali di dimensioni minori per evitare il propagarsi degli incendi;
- protezione contro gli incendi delle strutture metalliche per garantirne la stabilità (tale tipo di protezione è fondamentale per garantire in caso di incendio la stabilità delle strutture);
- adozione di installazioni atte a captare, neutralizzare ed allontanare ogni gas, vapore o polvere che possa svilupparsi di regola o occasionalmente durante le fasi di lavorazione;
- scelta adeguata dei materiali per ogni applicazione (molti incidenti derivano infatti dal cedimento delle strutture o degli apparecchi per una valutazione errata delle limitazioni presentate dai materiali);
- installazione delle necessarie valvole di sicurezza, dischi di rottura e scarichi rapidi;
- adozione di impianti elettrici adeguati al tipo di impianto progettato;
- adozione di efficienti impianti elettrici di messa a terra e di protezione contro le scariche atmosferiche;
- installazione di ogni necessario sistema di rivelazione di presenza di gas nell'ambiente;
- installazione di sistemi di rilevazione di fumi o di incendi che potranno essere collegati ad allarmi e/o agli impianti antincendio;
- installazione di tutta la segnaletica necessaria per mettere a conoscenza il personale o qualunque utente dei pericoli attuali o potenziali esistenti.

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 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).

9. SPEGNIMENTO DEGLI INCENDI

9.1. Protezione dagli incendi

Con il termine **protezione** o **difesa attiva** si intende l'insieme degli interventi da effettuare per estinguere un incendio qualora si verifichi.

Tale obiettivo primario della protezione si raggiunge applicando precise tecniche ed utilizzando le sostanze e le apparecchiature fisse o mobili appositamente predisposte.

Parallelamente all'estinzione, deve essere messo in atto, se necessario, il processo di **contenimento** dell'incendio facendo ricorso non solo ai mezzi di protezione disponibili, ma anche ai sistemi di prevenzione predisposti da una corretta progettazione.

Gli interventi di estinzione e/o contenimento devono essere condotti avendo come riferimento la **natura del prodotto che ha preso fuoco**, in modo da scegliere le sostanze più adatte a spegnere o contenere l'incendio, ricordando che alcune di esse potrebbero non solo essere inefficaci ma addirittura controproducenti, come ad esempio l'acqua nello spegnimento dell'incendio di un serbatoio contenente prodotti petroliferi o di una apparecchiatura elettrica sotto tensione.

Gli interventi devono essere adeguati anche al **tipo di incendio**, distinguendo tra gli incendi **di superficie** e quelli **di volume**.

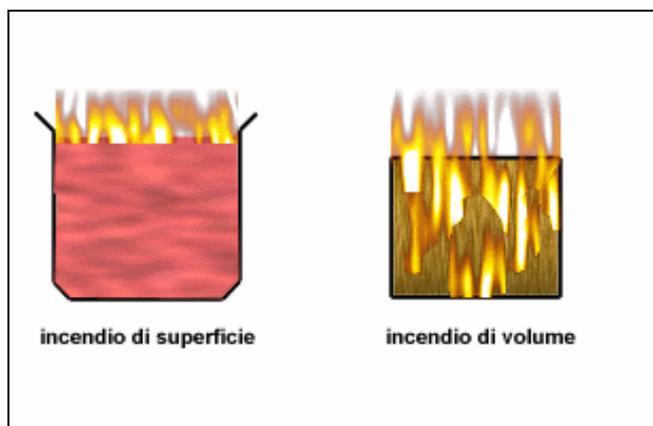


Fig.59 - Incendio di superficie e di volume.

Gli incendi vengono definiti **di superficie** quando interessano soltanto uno strato superficiale, in genere di limitato spessore, di masse solide, liquide o gassose. In questo caso il fuoco può essere estinto realizzando una concentrazione di ossigeno inferiore al 15% in volume nell'atmosfera che circonda la superficie incendiata, impedendo così il mantenimento della combustione. Un risultato del genere si può ottenere, ad esempio, saturando l'aria con gas inerti o altri mezzi soffocanti, quali polveri o schiuma, capaci di agire in maniera rapida e definitiva.

Gli incendi vengono definiti **di volume** quando interessano la massa combustibile in profondità, formando braci che persistono a lungo. Questo tipo di incendio può essere affrontato positivamente realizzando e mantenendo una saturazione inertizzante nell'atmosfera che circonda la massa incendiata per un tempo adeguato e raffreddando i materiali al di sotto della temperatura di accensione.

9.2. Modalità di estinzione

Con riferimento alle **tipologie di azione degli interventi estinguenti**, possono essere individuate cinque modalità.

- 1) **Separazione o soffocamento**: consiste nell'eliminare il contatto tra combustibile e comburente, oppure, nel rimuovere il combustibile dalla zona di combustione. Ciò può essere ottenuto utilizzando schiuma antincendio, teli d'amianto, acqua, pareti divisorie, chiusure di saracinesche, oppure operando lo scarico dai serbatoi dei liquidi infiammabili.
- 2) **Diluizione**: consiste nel diminuire la concentrazione del combustibile o del comburente, oppure nel saturare l'ambiente con combustibile (uso di azoto, anidride carbonica, acqua, idrocarburi alogenati, chiusura delle aspirazioni e delle aperture di areazione, ecc.).
- 3) **Disgregazione**: consiste nel rimuovere gli inneschi e nella rottura del contatto tra combustibile ed inneschi (reti spostafiamme, getti tagliafiamme, azione meccanica di mezzi estinguenti).
- 4) **Raffreddamento**: ovvero diminuzione della temperatura sino a portarla al di sotto della temperatura di infiammabilità (mediante l'impiego di acqua, refrigerazione).
- 5) **Inibizione**: alcune sostanze inibitrici, aumentando l'energia di attivazione, ostacolano il propagarsi della reazione chimica (polveri, idrocarburi alogenati).

9.3. Sostanze estinguenti

La protezione contro gli incendi si basa essenzialmente sull'impiego di una serie di sostanze capaci di far cessare la combustione. La sostanza usata, il tipo di intervento e le modalità di impiego sono commisurate alla natura dei prodotti che hanno preso fuoco e all'entità dell'incendio.

Occorre pertanto conoscere limiti, pregi e difetti delle sostanze estinguenti per ottenere dalla difesa attiva risultati sempre e comunque positivi, ricordando che scelte sbagliate possono portare ad amplificare enormemente l'entità dell'incidente.

Alcune delle sostanze oggi usate sono da sempre nelle mani dell'uomo, altre sono molto recenti e rappresentano il risultato delle continue ricerche effettuate per disporre di mezzi e sistemi sempre più efficaci nella lotta contro gli incendi.

Analizziamo di seguito le principali sostanze estinguenti.

9.3.1. Sabbia

La **sabbia** agisce **per separazione** del combustibile dal comburente; infatti, disposta a strato sul combustibile incendiato, lo isola dal contatto con l'aria e **soffoca** quindi il fuoco.

Salvo casi particolari (incendi di sostanze chimiche reattive in presenza di acqua) è consigliabile impiegare sabbia umida.

E' da osservare che tale metodo è poco efficace nel caso di incendi di sostanze liquide poiché la sabbia, tendendo a depositarsi sul fondo del recipiente contenente il liquido, lascia libera la superficie che continua a bruciare.

La sabbia è utile anche come mezzo di prevenzione in caso di lavori nei quali si utilizzano fiamme libere su impianti operativi; in tal caso essa servirà a sigillare le aperture dalle quali potrebbero provenire vapori o gas combustibili.

9.3.2. Acqua

L'**acqua** è il più diffuso ed in genere il più economico dei mezzi antincendio.



Fig.60

L'acqua agisce per:

- **raffreddamento** del materiale che brucia, in virtù dell'assorbimento da parte dell'acqua del calore svolto dalla combustione, sia come calore sensibile sia come calore latente di vaporizzazione (l'acqua proprio per le proprietà del legame chimico che la caratterizza è in grado di sottrarre una quantità molto elevata di calore pari a 2,5 Mj/kg);
- **separazione** tra combustibile e comburente, mediante l'allontanamento dell'ossigeno dell'aria per sua sostituzione col vapore generato, il cui volume è circa 1700 volte superiore a quello delle gocce d'acqua da cui proviene;
- **diluizione** delle sostanze infiammabili solubili in modo da renderle inadatte alla combustione. In alcuni casi interviene anche la formazione di emulsioni (oli che possono essere resi temporaneamente incombustibili);
- **disgregazione**, per azione di rottura del contatto tra combustibile e comburente che può essere generato ad esempio da un forte getto d'acqua.

L'impiego d'acqua deve essere evitato in presenza di:

- conduttori di energia elettrica sotto tensione;
- serbatoi con liquidi non miscibili, infiammabili e più leggeri dell'acqua;
- sostanze reagenti in modo pericoloso con l'acqua, sodio e potassio che liberano idrogeno, carbonio, magnesio, zinco, alluminio che ad alte temperature sviluppano con l'acqua gas infiammabili;
- sostanze tipo cloro, fluoro, ecc., che con l'acqua reagiscono formando sostanze corrosive;
- sostanze come l'acido solforico, l'anidride acetica, ecc., che a contatto con l'acqua sviluppano calore emettendo spruzzi corrosivi;
- incendi di sostanze tossiche tipo cianuri alcalini per il pericolo che si genera dalla loro dispersione;
- gas liquefatti nocivi e infiammabili che l'acqua farebbe evaporare;
- parti di apparecchi che spezzati dal getto d'acqua potrebbero liberare sostanze nocive;
- apparecchiature o documenti importanti che verrebbero danneggiati.

L'acqua deve essere erogata sugli incendi in modo da raffreddarne la più ampia superficie possibile.

Quindi anziché getti d'acqua pieni, è meglio utilizzare **getti d'acqua frazionata** (divisa in parti) o **nebulizzata** (acqua ridotta in piccolissime gocce disperse nell'aria), in modo da poter ripartire l'acqua impiegata su una superficie maggiore. In questo modo aumenta sia il potere di raffreddamento sia quello di soffocamento, in quanto l'acqua suddivisa in goccioline avrà una maggiore superficie e di conseguenza avrà una maggiore possibilità di assorbire calore passando allo stato vapore.

I getti d'acqua pieni, avendo una massa maggiore e quindi una violenza d'urto notevole, risultano dannosi se impiegati su impianti con parti delicate.

Anche nel caso di incendi di liquidi infiammabili l'uso dell'acqua a getto pieno va considerata con particolare attenzione, sia per gli eventuali schizzi di liquido combustibile, sia - nel caso di recipienti aperti con un fluido combustibile con peso specifico inferiore a quello dell'acqua - per il pericolo di traboccamento con il conseguente allargamento dell'incendio alle zone adiacenti.

Va inoltre ricordato che grandi masse d'acqua lanciate sugli impianti o sui prodotti in fiamme, dovranno trovare un punto di raccolta in una rete di fognature per non causare allagamenti che spesso provocano più danni dell'incendio.

9.3.3. Schiuma

La **schiuma** può essere definita un aggregato complesso ed instabile di bollicine di gas racchiuse in pellicole liquide soggette a tensione superficiale che si distruggono per evaporazione del liquido, ma dotate di una resistenza sufficiente da poter essere utilizzate per estinguere un incendio.



Fig.61

L'estinzione avviene attraverso le seguenti azioni:

- **separazione** tra combustibile e comburente
- **diluizione** per effetto dell'anidride carbonica e del vapor d'acqua che riducono la concentrazione dell'ossigeno
- **raffreddamento** per l'assorbimento del calore di evaporazione dell'acqua contenuta nella schiuma.

La schiume possono esser **di tipo chimico, di tipo meccanico o bagnanti**.

La schiuma di tipo **chimico** è formata da anidride carbonica che si sviluppa per reazione chimica tra soluzione alcaline (in genere bicarbonato di sodio) e soluzioni acide (ad esempio solfato di alluminio) in presenza di un agente schiumogeno (come la polvere di liquirizia).

La schiuma di tipo **meccanico** è formata da bollicine d'aria inglobate dall'acqua in presenza di liquidi schiumogeni disponibili in vari tipi. Si tratta di schiume poco costose e facilmente preparabili.

Le schiume **bagnanti** sono ottenute aggiungendo sostanze tensioattive. Le schiume risultano così con elevati poteri di resistenza, di assorbimento, di aderenza e di raffreddamento.

Una limitazione delle schiume è l'instabilità alle alte temperature. In base al rapporto tra il volume della schiuma prodotta e la soluzione acqua schiumogeno d'origine, le schiume si distinguono in:

- **alta espansione** 1:500, 1:1000
- **media espansione** 1:30, 1:200
- **bassa espansione** 1:6, 1:12

APPROFONDIMENTO

Tipi fondamentali di liquidi schiumogeni:

- **liquidi proteïnici** (a bassa espansione, adatti ad incendi di prodotti petroliferi)
- **liquidi a base proteïnica piú una frazione attiva a base metallorganica** (a bassa espansione, adatti ad incendi di prodotti polari quali alcoli eteri, fenoli, ecc.)
- **liquidi fluoroproteïnici** (a bassa espansione, adatti ad incendi di idrocarburi a difficile estinzione)
- **liquidi film-forming fluorosintetici AFFF** (Acqueous Film Forming Foam, a bassa e media espansione, adatti ad incendi di prodotti petroliferi)
- **liquidi sintetici** (formano schiuma a bassa, media ed alta espansione. Sono adatti per la copertura di grandi superfici o il riempimento totale di volumi)

Una **buona schiuma** dovrebbe presentare le seguenti proprietà:

- peso specifico inferiore a quello dei liquidi in cui viene versata
- insolubilità in questi liquidi
- peso tale da non essere portata verso l'alto dai gas di combustione
- assenza di tossicità e corrosività
- buona omogeneità e stabilità anche alle alte temperature
- capacità di dilagare rapidamente e di aderire alle pareti verticali.

Le schiume trovano un largo impiego negli incendi di gas combustibili - come idrogeno, acetilene, butano, metano, ecc. - o di materiali e liquidi per i quali è necessario un effetto di copertura e soffocamento - come alcoli, solventi, oli minerali, grassi, eteri e benzine.

9.3.4. *Polveri*

Le **polveri estinguenti** sono miscugli di particelle solide finemente suddivise costituite da sali organici o da altre sostanze naturali o sintetiche adatte ad essere

scaricate direttamente sugli incendi mediante l'impiego di gas propellenti in pressione attraverso appositi erogatori.

Le caratteristiche fondamentali che devono possedere le polveri sono l'assenza di tossicità, corrosività ed abrasione.

Le polveri sono stabili a temperatura ambiente fino a 60°C. Per valori più grandi possono fondersi ed agglomerarsi perdendo la loro fluidità e le loro caratteristiche di impiego.

Grazie al loro potere riflettente, le polveri proteggono gli operatori dall'irraggiamento termico delle fiamme, ma possono presentare alcuni inconvenienti nell'impiego per la loro opacità e per le difficoltà di respirazione che insorgono nelle zone in cui sono scaricate.

Presentano il vantaggio di non danneggiare le strutture sulle quali sono scaricate anche se bisogna asportarne i residui.

Le polveri disponibili sono numerose, alcune **universali** e altre **specifiche**. Le più diffuse sono quelle a base di bicarbonato di sodio o di potassio, oppure quelle cosiddette "polivalenti", a base di fosfati monoamminici, utilizzabili negli incendi di materiali solidi (legname, carboni, carta, rifiuti che formano braci) ma anche di materiali liquidi per i quali è necessaria un'azione di soffocamento o di materiali gassosi infiammabili.

Per l'estinzione di incendi prodotti da sostanze chimiche è necessario usare delle **polveri speciali**.

L'azione estinguente delle polveri è prodotta dalla **decomposizione** delle stesse per effetto delle alte temperature raggiunte nell'incendio, che dà luogo ad effetti chimici sulla fiamma con azione inibente ed alla produzione di anidride carbonica ed acqua.

Si noti che la durata dell'effetto estinguente delle polveri è molto limitato: incendi apparentemente spenti possono dar origine a nuove accensioni se non vi è stato un sufficiente raffreddamento a causa di braci che possono rimanere sotto le polveri.

9.3.5. Gas inerti

I **gas inerti** sono rappresentati da sostanze incombustibili gassose capaci di **ridurre** con la loro presenza la **concentrazione dell'ossigeno** dell'aria al di sotto del limite oltre il quale non è più possibile la combustione.

I gas inerti vengono utilizzati nel caso di incendi in ambienti chiusi dove generalmente si usa anidride carbonica e in minor misura l'azoto.

L'**anidride carbonica** non risulta tossica per l'uomo, è un gas più pesante dell'aria, perfettamente dielettrico, normalmente conservato come gas liquefatto sotto pressione. E' in grado di produrre anche un'azione estinguente **per raffreddamento**, dovuta all'assorbimento di calore generato dal passaggio dalla fase liquida alla fase

gassosa. Il brusco raffreddamento può provocare la formazione di una fase solida e quindi una limitazione nella visibilità nell'ambiente.

Una volta immessa nell'aria, l'anidride carbonica si sposta verso il basso, lasciando gli strati superiori meno protetti e più esposti ad eventuali fenomeni di riaccensione.

L'anidride carbonica, agendo sul comburente, è utilizzabile in qualsiasi tipo di incendio, fatta eccezione per quelle sostanze che sono in grado, durante la combustione, di decomporla sviluppando altro ossigeno (ad esempio le nitrocellulose).

Nel caso di incendi dovuti a sostanze gassose infiammabili, l'anidride carbonica garantisce un'atmosfera inerte evitando il pericolo di esplosioni.

Nella tabella sono riportati i limiti percentuali in volume di azoto e anidride carbonica nell'atmosfera da controllare per renderla incapace di alimentare la combustione di alcune sostanze infiammabili qualunque sia la loro percentuale di presenza.

Sostanza	%in vol. di azoto	%in vol. di anidride carbonica
Acetone	45,2	32,4
Alcole etilico	49,6	38,5
Alcole metilico	54,2	43,8
Benzina	45,2	31,9
Benzolo	47,1	34,3
Eptano	45,2	32,9
Esano	43,7	31,5
Etano	48,0	36,6
Etilene	52,7	44,7
Gas naturale	43,3	31,9
Idrogeno	76,4	72,1
Metano	42,8	31,0
Propano	45,6	32,4
Propilene	45,6	32,9
Solfuro di carbonio	74,5	64,1

9.3.6. Idrocarburi alogenati

Gli idrocarburi alogenati, chiamati anche HALON (HALogenated-hydrocarbON) sono degli idrocarburi saturi in cui alcuni atomi di idrogeno sono stati parzialmente o totalmente sostituiti con atomi di cloro, bromo, fluoro (chiamati alogenati).

Gli idrocarburi alogenati sono conservati allo **stato liquido** e sono facilmente **vaporizzabili**, non lasciano residui, sono dielettrici, non corrosivi, inalterabili e allo stato vapore sono più pesanti dell'aria.

La loro azione estinguente si esplica attraverso l'inibizione delle reazioni a catena che hanno luogo nelle reazioni di combustione con fiamma (inibizione).

I primi HALON utilizzati furono il bromuro di metile (CH₃Br) ed il tetracloruro di carbonio (CCl₄), sostituiti attualmente con altri con un grado minore di tossicità:

- bromotrifluorometano (CBrF₃ – HALON 1301)
- bromodifluorometano (CHBrF₂- HALON 1211)
- dibromotetrafluoroetano (CBrF₂CBrF₂- HALON 2402)

APPROFONDIMENTO

La nomenclatura ed il relativo sistema di numerazione degli idrocarburi alogenati sono stati proposti nel 1948 dai Corpi Armati Statunitensi di Ingegneria. Il sistema identifica la composizione di un idrocarburo alogenato mediante un numero di cinque cifre che rappresenta, nell'ordine, il numero di atomi di carbonio, fluoro, cloro, bromo e iodio contenuti nella molecola. Gli eventuali zeri finali vengono eliminati.

Così ad esempio l'HALON 1301 contempla 1 atomo di carbonio, 3 di fluoro, 0 di cloro, 1 di bromo, e 0 di iodio, si ottiene così la sigla 1301.

Per quanto riguarda la tossicità degli HALON, la tabella di seguito riportata indica alcuni dei **rischi** degli agenti estinguenti.

Gruppo	Definizione	Esempio
6 (meno tossico)	Gas o vapori che in concentrazioni fino ad almeno il 20% in volume, per durata di esposizione dell'ordine di 2 ore non producono danni	HALON 1301
5	Gas o vapori molto meno tossici del gruppo 4, ma più tossici del gruppo 6	CO ₂ HALON 1211 HALON 2402
4	Gas o vapori che in concentrazione dell'ordine dal 2 al 2,5% per durata di esposizione dell'ordine di 2 ore sono letali e producono seri danni	Dibromo-difluorometano
3	Gas o vapori che in concentrazione dell'ordine dal 2 al 2,5% per durata di esposizione dell'ordine di 1 ora sono letali e producono seri danni	Tetracloruro di carbonio Bromoclorometano
2	Gas o vapori che in concentrazione dell'ordine dallo 0,5 all'1% per durata di esposizione dell'ordine di mezz'ora sono letali e producono seri danni	Bromuro di metile

L'applicazione degli HALON ha avuto e conserva tuttora larga diffusione per i seguenti motivi:

- grande capacità estinguente su fuochi di ogni classe
- modeste percentuali in aria per ottenere la pratica inertizzazione di ambienti confinati
- possibilità di utilizzo su apparecchiature elettriche in tensione
- modesta tossicità e conseguente possibilità di impiego in ambienti con presenza di persone

- scarso danneggiamento di apparecchiature, anche delicate, a seguito di scariche
- assenza di residui dopo l'intervento
- disponibilità di standard internazionali di progettazione e collaudo.

Nonostante gli HALON abbiano ancora oggi larga diffusione, tuttavia già dal 1985 venne accertato dalla Comunità scientifica internazionale che quelli contenenti il Bromo contribuiscono fortemente alla **distruzione dell'ozono** stratosferico, in maniera ancora più marcata rispetto ai clorofluorocarburi utilizzati nell'industria del freddo.

Per questo motivo la legge italiana, recependo il regolamento CEE 594/92, stabilisce che **dal 1° gennaio 1994** non è più possibile autorizzare impianti ad HALON con scopi antincendio, mentre per gli impianti esistenti spetterà al Ministero dell'Ambiente fissare le scadenze del loro utilizzo attraverso appositi decreti.

In campo mondiale l'industria si sta adoperando molto nella ricerca di agenti estinguenti "puliti" alternativi agli HALON. La tabella che segue riporta alcuni **prodotti sostitutivi** attualmente presenti sul mercato identificati dalla National Fire Protection Association (NFPA) e pubblicati nello standard n. 2001 (1994). Tali prodotti agiscono per azione anticatalitica.

Esempi di agenti estinguenti "puliti" alternativi agli HALON

SIGLA	Nome della molecola	Formula	Nome commerciale
FC-3-1-10	Perfluorobutano	C ₄ F ₁₀	CEA-410
HBFC-22-B1	Bromodifluorometano	CHF ₂ Br	Halon 1201
HCFC Blend A	Diclorotrifluoroetano (4,75%) Clorodifluorometano (82%) Clorotetrafluoroetano (9,5%)	CHCl ₂ CF ₃ CHClF ₂ CHClF ₂ CF ₃	NAF S-III
HCFC-124	Clorotetrafluoroetano	CHClF ₂ CF ₃	FE-241
HFC-125	Pentafluoroetano	CHF ₂ CF ₃	FE-25
HFC-227ea	Eptafluoropropano	CF ₃ CHFCF ₃	FM-200
HFC-23	Trifluorometano	CHF ₃	PF-23
IG-541	Azoto (52%) Argon (40%) Anidride carbonica (8%)	N ₂ Ar CO ₂	INERGEN

9.4. Sistemi antincendio

Nella protezione contro gli incendi è importantissimo l'intervento immediato al fine di trovarsi di fronte ad un incendio di dimensioni ancora limitate.

Pertanto risultano importanti non solo i sistemi antincendio fissi (solo poche strutture ne sono provvisti) ma soprattutto i sistemi antincendio mobili.

I sistemi antincendio mobili sono suddivisi nelle seguenti categorie:

- **estintori:** mezzi mobili portatili e carrellati che possono essere suddivisi in base al tipo di sostanza estinguente usata in:
 - idrici
 - a schiuma
 - a polvere
 - ad anidride carbonica
 - ad idrocarburi alogenati
 - a doppia sostanza estinguente.

Questi sono di volta in volta scelti a seconda dello specifico campo di impiego.

- **automezzi di pronto intervento:** autopompe ad acqua, automezzi con attrezzatura a schiuma, a polvere ecc.
- **equipaggiamenti ed attrezzature ausiliarie:** motopompe; autoprotettori; cannoni lancia schiuma; tute d'amianto.

Appendice

Tabella delle unità di misura

UNITA' DI MISURA	SIMBOLO	DEFINIZIONE
WATT	W	E' la potenza che corrisponde all'energia di 1 Joule per secondo
VOLT	V	Unità di misura del potenziale elettrico. E' la differenza di potenziale elettrico tra due sezioni di un conduttore attraverso cui passa la corrente di 1 Ampere quando la potenza dissipata tra tali sezioni vale 1 Watt
CALORIA (KILOCALORIA)	Cal (kcal)	Quantità di calore necessaria per portare 1 gr di acqua distillata da 14,5°C a 15,5°C
NEWTON	N	Unità di misura della forza. Viene definito come la forza che imprime alla massa unitaria di 1 kg l'accelerazione unitaria (1m/s^2)
JOULE (MEGAJoule)	J (MJ)	Unità di misura del lavoro pari a Newton X metro
PASCAL	Pa	Unità di misura della pressione. La pressione è una forza per unità di superficie ed è misurata in Newton x metro.
COULOMB	C	E' la quantità di elettricità trasportata in un secondo dalla corrente di 1 Ampere
BAR	bar	Unità di misura della pressione. 1 bar è pari a 10^5 Pascal

Tabella dei prefissi di divisione e moltiplicazione

Prefissi di divisione			Prefissi di moltiplicazione		
Fattore	nome	Simbolo	Fattore	nome	Simbolo
10^{-1}	Deci	d	10	Deca	Da
10^{-2}	Centi	c	10^2	Etto	H
10^{-3}	Milli	m	10^3	Chilo	K
10^{-6}	Micro	μ	10^6	Mega	M
10^{-9}	Nano	n	10^9	Giga	G
10^{-12}	Pico	p	10^{12}	Tera	T
10^{-15}	Femto	f	10^{15}	Peta	P
10^{-18}	atto	a	10^{18}	exa	E