

Come è noto, in tutta Italia si stanno svolgendo corsi di prevenzione incendi, secondo un ben preciso programma ministeriale.

Per ora questi corsi vengono curati dagli Ordini degli Ingegneri, ma si prevede che le associazioni degli architetti, dei periti industriali e dei geometri vareranno anch'essi iniziative analoghe.

Il testo qui riportato rappresenta la dispensa per la parte "Fisica e chimica dell'incendio" relativo alle lezioni che l'Autore ha svolto nell'ambito del corso svoltosi ad Udine.

(Foto d'apertura tratta da Phototeca n. 5, anno II)

# FISICA E CHIMICA DELL'INCENDIO

Gianni Comini

## 1. GENERALITÀ SULLA COMBUSTIONE

*Combustione* è qualunque reazione chimica nella quale un *combustibile*, sostanza ossidabile, reagisca con un *comburente*, sostanza ossidante, liberando energia, in genere sotto forma di calore.

Per ben comprendere questa definizione, è il caso di ricordare che, in chimica, *ossidazione* vuol dire semplicemente perdita di elettroni. Se più atomi entrano in competizione per gli stessi elettroni, i più elettronegativi hanno il sopravvento e riescono ad attirare verso di sé gli elettroni contesi. In tal modo i combustibili perdono elettroni, cioè *si ossidano*, entrando in contatto con i comburenti che, nella reazione, *si riducono*, cioè acquistano elettroni.

Il nome di ossidazione deriva dalla combinazione degli elementi con l'ossigeno, forse la reazione chimica più frequente in natura. 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'ossidazione con fluoro produce più energia della reazione corrispondente con l'ossigeno.

Cosa succede, ad esempio, nella combustione più semplice, quella che coinvolge idrogeno ed ossigeno?

All'inizio, nelle molecole di idrogeno e di ossigeno gli elettroni di legame sono ugualmente condivisi tra gli atomi, come è logico avvenga tra atomi identici. Nel prodotto di reazione, invece, gli elettroni di legame sono, di fatto, completamente spostati verso l'ossigeno, più elettronegativo (fig. 1). 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 (fig. 2).

Combustione però, attese le definizioni, è anche, ad esempio, la reazione tra combustibile idrogeno e comburente fluoro (fig. 3).

Come si spiega, in base a questa teoria, la

l'installatore italiano  
anno 37  
n. 8 agosto 1986

pagina 1407

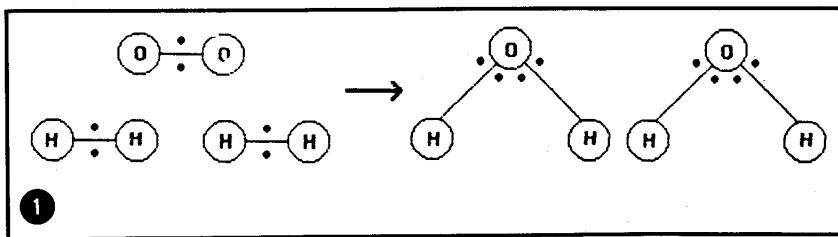
liberazione di calore e quindi l'esotermicità delle reazioni di combustione?

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

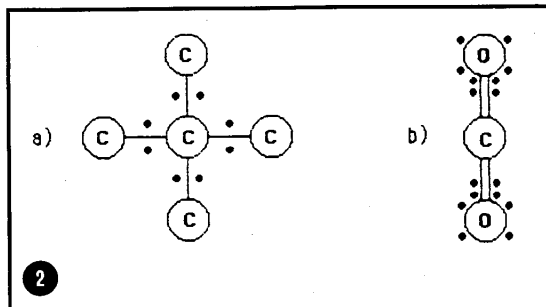
**Figura 1**

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



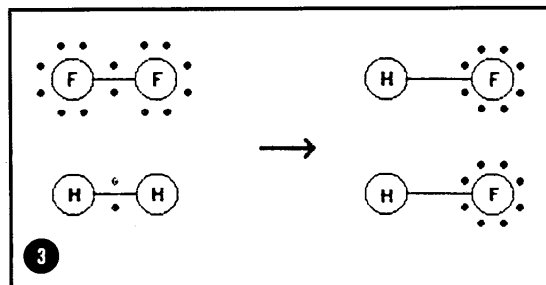
**Figura 2**

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



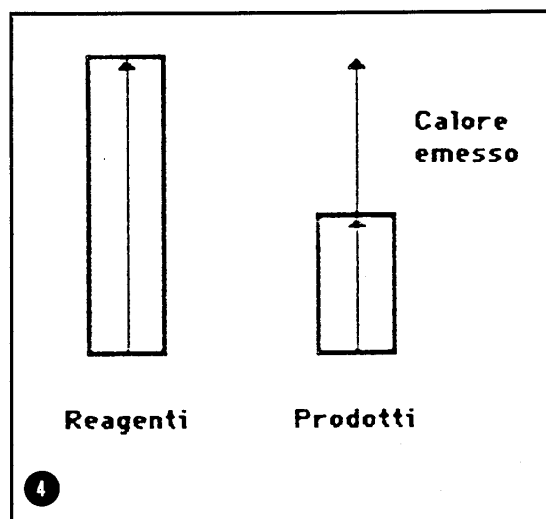
**Figura 3**

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



**Figura 4**

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



**Tabella I** - Combustione di alcune sostanze in ambiente di ossigeno, fluoro o cloro ed energia liberata nelle reazioni

| Reazione   | Energia liberata (MJ/kg combus.) |
|--|----------------------------------|
| Idrogeno in ossigeno<br>$H_2 + 0,5 O_2 \rightarrow H_2O$                         | 142,0                            |
| Metano in ossigeno<br>$CH_4 + O_2 \rightarrow CO_2 + 2H_2O$                      | 55,5                             |
| Benzina (ottano) in ossigeno<br>$C_8H_{18} + 12,5 O_2 \rightarrow 8CO_2 + 9H_2O$ | 48,0                             |
| Magnesio in ossigeno<br>$Mg + 0,5 O_2 \rightarrow MgO$                           | 24,5                             |
| Idrogeno in fluoro<br>$H_2 + F_2 \rightarrow 2HF$                                | 268,0                            |
| Metano in fluoro<br>$CH_4 + 4F_2 \rightarrow CF_4 + 4HF$                         | 104,5                            |
| Metano in fluoro<br>$CH_4 + 4Cl_2 \rightarrow CCl_4 + 4HCl$                      | 27,0                             |

quindi più energia dei *prodotti di reazione* e la differenza di energia tra reagenti e prodotti è pari al *calore emesso* (fig. 4).

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 ed 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*.

## 2. LA VELOCITÀ DI COMBUSTIONE

Come si è detto, 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 apparente di "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"

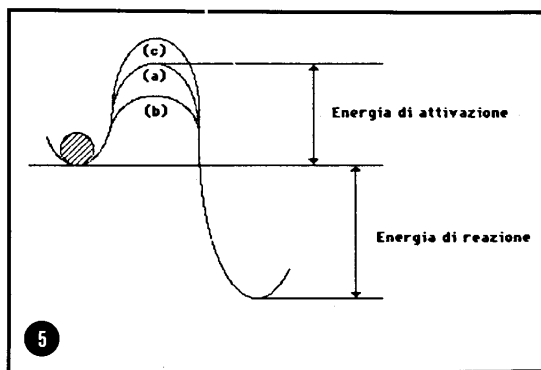
**Tabella II** - Caratteristiche di infiammabilità delle principali sostanze combustibili

| Combustibile       | Punto di infiammabilità (°C) | Densità relativa all'aria di gas e vapori | Limiti di infiammabilità |                  | Temperatura di accensione (°C) |
|--------------------|------------------------------|---|--------------------------|------------------|--------------------------------|
|                    |                              |   | Inferiore % vol.         | Superiore % vol. |                                |
| Acetilene          | Gas                          | 0,90                                      | 1,5                      | 82               | 300                            |
| Alcool etilico     | 12                           | 1,59                                      | 3,5                      | 15               | 423                            |
| Benzina            | < 0                          | > 2,5                                     | 0,9                      | 7,5              | 245                            |
| Butano             | Gas                          | 2,05                                      | 1,5                      | 8,5              | 365                            |
| Coke               | Solido                       | —   | —                        | —                | 550                            |
| Gas naturale       | Gas                          | 0,65                                      | 3                        | 15               | 480                            |
| Gasolio            | 65                           | > 3,5                                     | 1                        | 6                | 330                            |
| Idrogeno           | Gas                          | 0,07                                      | 4                        | 75               | 560                            |
| Kerosene           | > 21                         | > 3                                       | 1                        | 6                | 350                            |
| Legna secca        | Solido                       | —   | —                        | —                | 250                            |
| Olio combustibile  | > 65                         | > 3,5                                     | 1                        | 6                | 250                            |
| Ossido di carbonio | Gas                          | 0,97                                      | 12,5                     | 74,2             | 610                            |
| Propano            | Gas                          | 1,56                                      | 2,1                      | 9,5              | 466                            |

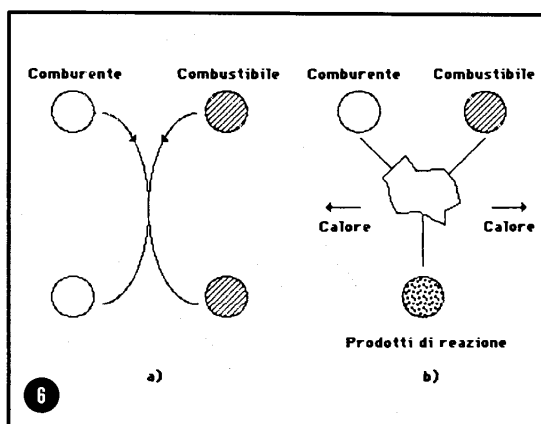
devono infatti scontrarsi tra loro e riarrangiare opportunamente i loro atomi prima di riuscire a formare le molecole "prodotti". L'arrangiamento degli atomi può richiedere una elevata energia, detta appunto *energia di attivazione* e non tutte le molecole che si scontrano hanno energia sufficiente a superare la barriera di attivazione. Il concetto di energia di attivazione è illustrato in figura 5: la sfera non può precipitare liberando l'energia potenziale se prima non supera la barriera di attivazione. 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. 6). Questa è la ragione per cui, in un'atmosfera piena di ossigeno, non tutto ciò che è potenzialmente 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



**Figura 5**  
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.



**Figura 6**  
a) Rimbombo senza reazione tra molecole a bassa temperatura e quindi "lente"  
b) Reazione tra molecole ad alta temperatura e quindi "veloci"

iniziale. Per esempio, la combustione tra idrogeno e 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.

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.

### 3. LA PROPAGAZIONE DELLA COMBUSTIONE

Nei paragrafi precedenti ci si è occupati di termodinamica e termocinetica delle combustioni facendo riferimento alle reazioni "in provetta". A questo punto, però, dai laboratori, con i piccoli volumi di reagenti mantenuti in condizioni controllate e uniformi, occorre passare ai grandi ambienti, chiusi od aperti, ma comunque non impervi all'aria atmosferica, dove le sostanze combustibili solide, liquide o gassose presenti in mucchi, serbatoi, recipienti in pressione si mescolano con l'aria in maniera più o meno casuale. È questo infatti lo "scenario" degli incendi e delle esplosioni e quindi l'oggetto principale della trattazione.

A tal proposito è conveniente partire dall'osservazione che la maggioranza delle combustioni avviene o, perlomeno, inizia in *fase gassosa*. Ciò è ovvio se il combustibile è un gas, ma anche quando la sostanza combustibile è un liquido all'aumentare della temperatura si ha dapprima evaporazione e solo successivamente i vapori possono reagire con l'aria bruciando. Analogamente, nel caso dei combustibili solidi, l'aumento di temperatura provoca inizialmente una distillazione di vapori combustibili (pirolisi) che bruciano subito, mentre solo in un secondo tempo si ha la combustione del carbonio nel residuo.

Nella maggior parte degli incendi, in corrispondenza al fronte di reazione, si ha la manifestazione di fiamme cioè, come si è detto, l'emissione di onde elettromagnetiche visibili. Le fiamme si possono classificare secondo il tipo di miscelazione combustibile-comburente che accompagna la reazione. Negli incendi è improbabile che comburente e combustibile vengano miscelati come nei bruciatori, mentre è ipotizzabile che il comburente diffonda verso la zona di reazione. La situazione risultante nella maggior parte dei casi è quindi quella della *fiamma di diffusione*, con separazione tra la zona del combustibile e la zona dell'aria. È ciò che si verifica, ad esempio, nel becco Bun-

sen quando si chiudono i fori dell'aria, od in una candela dove la cera fonde, risale lo stoppino e vaporizza mentre l'aria diffonde dall'esterno verso la fiamma. Esattamente come nel caso della candela poi, la fiamma negli incendi risulterà tanto più "fumosa", cioè ricca di incombusti, quanto più difficile è la diffusione dell'aria verso il fronte di reazione.

Come si è già osservato, affinché una combustione possa iniziare è necessario il raggiungimento, in qualche punto, della temperatura di accensione. La successiva propagazione della fiamma è invece, di solito, la conseguenza del trasferimento del calore generato dalla combustione in zone sempre più vaste. Per fissare le idee si faccia riferimento ad una miscela combustibile-comburente in fase gassosa nella quale un punto venga portato, da un "innesco", alla temperatura di accensione. La propagazione della fiamma da quel punto può aver luogo con la velocità a cui il calore sviluppato dalla combustione riesce a portare alla temperatura di accensione le zone vicine. Così, se nella miscela vi è poco o troppo combustibile, il calore generato non è sufficiente a far raggiungere la temperatura di accensione alle zone circostanti, anche perché le collisioni tra comburente e combustibile, le sole che continuo ai fini energetici, divengono poco probabili. La fiamma quindi può propagarsi solo entro un ben determinato intervallo di rapporti di miscela: gli estremi di questo intervallo si definiscono appunto *limite inferiore* e *limite superiore di infiammabilità*.

L'ampiezza del campo di infiammabilità dei combustibili dipende dalla loro reattività e risulta funzione della pressione e della temperatura, oltre che dalla concentrazione di ossigeno. Di solito, nelle tabelle, si fa riferimento alle condizioni normali, cioè aria alla pressione di 1 atm ed alla temperatura di 0 °C. All'aumentare della pressione cresce il numero di molecole per unità di volume e quindi aumentano le probabilità di urto mentre, all'aumentare della temperatura gli urti si fanno più violenti. All'aumentare della concentrazione di ossigeno diminuisce il numero di molecole inerti e, quindi, aumentano ancora le probabilità di urto. Così aumenti di pressione, di temperatura e di concentrazione di ossigeno, rispetto ai valori normali, allargano il campo di infiammabilità.

All'interno del campo di infiammabilità è importante la velocità con cui la fiamma può propagarsi. Questa velocità è zero, per definizione, ai limiti inferiore e superiore di infiammabilità e raggiunge il massimo per concentrazioni di combustibile un po' inferiori alla concentrazione stechiometrica. Al di là di queste considerazioni qualitative è però molto difficile andare: la velocità di propagazione va determinata, caso per caso, sperimentalmente perché troppi e troppo variabili sono i para-

metri che la influenzano. Al variare di qualcuno di questi parametri la combustione in fase gassosa negli incendi potrebbe propagarsi lentamente, oppure avere l'andamento più rapido della *deflagrazione* o, al limite, evolversi secondo il meccanismo della *detonazione*, con velocità di propagazione supersoniche.

Qualitativamente si può solo affermare che:

- le probabilità di esplosione (deflagrazione o detonazione) crescono nell'intorno della composizione stechiometrica;
- un intervallo ampio di infiammabilità, come ad esempio quello dell'idrogeno che va dal 4 al 74% 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 comburente in fase gassosa come *potenzialmente esplosiva* se la sua composizione è compresa entro i limiti di infiammabilità.

Da questo punto di vista, particolarmente pericolosi appaiono i combustibili che, in fase gassosa ed in condizioni normali, presentano una *densità maggiore dell'aria*, come ad esempio i gas di petrolio. Essi infatti, in assenza di una adeguata ventilazione, tendono a ristagnare nelle zone basse degli ambienti, soprattutto se seminterrati, dove spesso si ricavano centrali termiche ed autorimesse. In tali condizioni non è difficile che si formino miscele infiammabili od esplosive, come la cronaca recente dimostra.

Oltre ai limiti di infiammabilità, per i combustibili liquidi interessa anche il *punto di infiammabilità*. Il punto di infiammabilità, o flash point, è la più bassa temperatura alla quale il combustibile emette vapori in quantità sufficiente a formare con l'aria una miscela infiammabile. Talvolta si fa riferimento, in alternativa, al *punto di accensione*, intendendo con ciò la minima temperatura alla quale i vapori sono prodotti in quantità tale da instaurare una combustione continua. La differenza tra i due punti risiede nel metodo sperimentale seguito nella loro determinazione: il punto di infiammabilità si ottiene con apparecchiature a vaso chiuso, mentre per il punto di accensione si usano apparecchiature a vaso aperto.

Ai punti di infiammabilità e di accensione sono evidentemente correlati gli andamenti delle pressioni di saturazione in funzione della temperatura: quindi valori bassi indicano forte tensione di vapore in condizioni normali e sono indici di forte pericolosità.

Così i liquidi con punto di infiammabilità inferiore a 21 °C sono considerati esplosivi, mentre i liquidi con punto di infiammabilità compreso tra 21 e 65 °C possono dar luogo ad esplosioni

solo se riscaldati. I liquidi, infine, con punto di infiammabilità superiore ai 65 °C si comportano praticamente come semplici sostanze combustibili, almeno in condizioni normali.

A questo proposito occorre notare che benzina ed alcool, ad esempio, hanno punto di infiammabilità inferiore a 21 °C, mentre olio combustibile e lubrificanti hanno punto di infiammabilità certamente superiore a 65 °C. Il punto di infiammabilità del gasolio può variare invece, con la composizione, proprio a cavallo dei 65 °C. Il gasolio commerciale dovrebbe sempre avere punto di infiammabilità di 65 °C almeno, ma è bene non fidarsi troppo ed infatti la normativa non consente di preriscaldare il gasolio prima di inviarlo ai bruciatori, come si fa normalmente con l'olio combustibile.

La normativa consente invece, per i serbatoi di benzina e di liquidi facilmente infiammabili, l'adozione di sistemi di sicurezza a gas inerte, cioè con sostituzione dell'aria nel serbatoio con un gas inerte, ed a "sovrasaturazione", cioè con combustibile miscelato all'aria con concentrazione maggiore del limite superiore di infiammabilità. Questi ultimi sistemi sono particolarmente semplici ed interessanti in quanto si fondano sul principio di non mettere mai in diretta comunicazione con l'esterno il cuscino di gas nel serbatoio. Così, quando viene prelevato combustibile con una pompa, si fa in modo che la depressione venga equilibrata da aria che gorgoglia attraverso il combustibile "sovrasaturandosi". Analogamente, durante il rifornimento, si fa il travaso "a ciclo chiuso" collegando la botte e il serbatoio con due tubazioni, una per il liquido che passa dalla botte al serbatoio ed una per l'aria che può così andare dal serbatoio alla botte.

In base allo stesso principio, sarebbe possibile immettere, senza pericoli, una discreta frazione di aria nei metanodotti ma... sbaglia chi, a questo proposito, pensi male!

Per concludere si può rilevare che invece i combustibili solidi non sono pericolosi quanto i gas ed i liquidi dal punto di vista delle esplosioni: fanno naturalmente eccezione gli esplosivi veri e propri e, come si vedrà meglio in seguito, anche le particelle solide di piccole dimensioni, cioè le polveri.

#### 4. I PARAMETRI DELLA COMBUSTIONE

Come si è detto, è difficile formulare un modello matematico per prevedere lo sviluppo e la propagazione della combustione, ma è possibile tuttavia individuare con sicurezza alcuni parametri fondamentali che influenzano la combustione e forniscono ai tecnici elementi guida per la predisposizione delle difese contro gli incendi.

I fattori che più influenzano le combustioni sono:

**Tabella III** - Poteri calorifici dei principali combustibili, espressi con riferimento alle unità di misura di quantità più usate

| Combustibile  | Potere Calorifico Inferiore (P.C.I.) |                    |                    | Potere Calorifico Superiore (P.C.S.) |                    |                    |
|---------------|--------------------------------------|--------------------|--------------------|--------------------------------------|--------------------|--------------------|
|               | MJ/kg                                | MJ/Nm <sup>3</sup> | MJ/dm <sup>3</sup> | MJ/kg                                | MJ/Nm <sup>3</sup> | MJ/dm <sup>3</sup> |
| 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 combust. | 41,0                                 | —                  | —                  | 43,8                                 | —                  | —                  |

- il potere calorifico dei combustibili;
- l'aria teorica (o stechiometrica) necessaria alla combustione;
- la temperatura teorica di combustione.

L'andamento della combustione e la composizione chimica dei partecipanti alla reazione determinano poi:

- la composizione dei fumi

e, di conseguenza, la loro più o meno elevata pericolosità.

#### 4.1. Potere calorifico

La quantità di calore sviluppata dalla combustione completa dell'unità di massa o di volume di combustibile si definisce potere calorifico. In generale si fa riferimento all'unità di massa per i combustibili solidi mentre si fa riferimento all'unità di volume per i combustibili gassosi. Il potere calorifico si esprime allora nei due casi, rispettivamente, come MJ/kg, cioè milioni di Joule per chilogrammo di combustibile e MJ/Nm<sup>3</sup>, cioè milioni di Joule per metro cubo "normale" di gas alla pressione atmosferica ed alla temperatura di 0°C.

Con i combustibili liquidi l'unità di misura può essere sia la massa che il volume e quindi il potere calorifico si esprime con riferimento sia all'unità di massa che a quella di volume. Si preferisce così il "chilogrammo" per l'olio combustibile, mentre si utilizza il decimetro cubo (litro) per la benzina, il gasolio ed i gas di petrolio liquefatti (GPL).

I prodotti della combustione contengono quasi sempre vapor d'acqua che deriva vuoi dalla presenza di umidità nel combustibile, vuoi dalla presenza di idrogeno nelle molecole. Se nella misura del potere calorifico si fa condensare questo vapore, si libera anche il calore latente di condensazione, pari a circa 2,5 MJ/kg. Si parla allora di *potere calorifico superiore* H<sub>s</sub>. Se invece il calore di condensazione non viene utilizzato e, nei fumi, l'acqua è presente in fase vapore, si parla di *potere calorifico inferiore* H<sub>i</sub>.

La differenza tra potere calorifico superiore e potere calorifico inferiore è dell'ordine del 3-4% con i combustibili solidi, del 6-7% con i combustibili liquidi e dell'8-11% con i combustibili gassosi. Per i combustibili che non contengano idrogeno od umidità, non vi è diffe-

renza tra potere calorifico superiore ed inferiore.

Nelle applicazioni tecnologiche della combustione di solito interessa il potere calorifico inferiore in quanto, nei fumi, si preferisce avere la fase vapore al fine di evitare corrosioni, con l'unica, sia pur importante, eccezione delle caldaie speciali "a condensazione".

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 di 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 giungere ad una stima più prudente.

#### 4.2. Aria occorrente per la combustione

In base alle equazioni chimiche della combustione è possibile determinare la quantità di ossigeno, e quindi di aria, che deve esser combinata con il carbonio, l'idrogeno e lo zolfo contenuti nei combustibili.

Nei calcoli si fa riferimento all'aria normale con:

- 23% di ossigeno e 77% di azoto ed altri gas, in massa;
- 21% di ossigeno e 79% di azoto ed altri gas, in volume;
- densità normale di 1,293 kg/m<sup>3</sup>.

Occorre poi considerare che:

- per la combustione di 1 kg di carbonio sono necessari  $32/12 = 2,67$  kg di ossigeno, cioè 11,6 kg, ovvero 9 Nm<sup>3</sup> d'aria;
- per la combustione di 1 kg di idrogeno sono necessari  $16/2 = 8$  kg di ossigeno, cioè 34,9 kg, ovvero 27 Nm<sup>3</sup> d'aria;
- per la combustione di 1 kg di zolfo sono necessari  $32/32 = 1$  kg di ossigeno, cioè 4,34 kg, ovvero 3,3 Nm<sup>3</sup> d'aria;
- ogni chilogrammo di ossigeno, eventualmente presente nel combustibile fa risparmiare  $1/0,23 = 4,34$  kg, ovvero 3,3 Nm<sup>3</sup> d'aria.

Perciò, per un combustibile generico, composto di carbonio, idrogeno, zolfo ed eventualmente ossigeno, le quantità d'aria teoriche, o

| Combustibile  | Aria teorica o stechiometrica |   | Temperatura di combustione teorica (°C) |
|---------------|-------------------------------|---|---|
|               | Nm <sup>3</sup> /kg combust.  | Nm <sup>3</sup> /Nm <sup>3</sup> combust. |   |
| Coke          | 8,2                           | —   | 1500                                    |
| Gas naturale  | —                             | 9,5                                       | 1850                                    |
| Gasolio       | 11,8                          | —   | 1900                                    |
| Legna secca   | 5,7                           | —   | 1500                                    |
| Olio combust. | 11,2                          | —   | 1800                                    |

stechiometriche, occorrenti per la combustione completa risultano:

$$m_{\text{aria}} = 11,6 [C] + 34,9 [H] + 4,3 [S] - 4,3 [O]$$

$$v_{\text{aria}} = 9 [C] + 27 [H] + 3,3 [S] - 3,3 [O]$$

dove  $m_{\text{aria}}$  è la massa d'aria teorica, espressa in chilogrammi d'aria per chilogrammo di combustibile,  $v_{\text{aria}}$  è il volume d'aria teorico, espresso in metri cubi normali d'aria per chilogrammo di combustibile, mentre [C], [H], [S] ed [O] sono le frazioni massiche, espresse in chilogrammi per chilogrammo di combustibile, rispettivamente di carbonio, idrogeno, zolfo ed ossigeno.

Note le densità dei combustibili si possono infine determinare immediatamente, se d'interesse, i fabbisogni d'aria teorica per metro cubo normale di combustibile gassoso o per decimetro cubo (litro) di combustibile liquido.

### 4.3. Temperatura di combustione

Può essere utile talvolta determinare la temperatura massima teorica dei prodotti della combustione in condizioni adiabatiche, cioè trascurando gli scambi di calore con l'esterno. A tal fine basta conoscere l'energia liberata nella combustione e determinare la temperatura alla quale l'aumento del contenuto termico (entalpia) dei prodotti della combustione eguaglia il calore liberato. Un semplice bilancio termico fornisce così, per le combustioni in aria, temperature teoriche di combustione comprese tra i 1000 ed i 2000 °C per la maggior parte delle sostanze combustibili in condizioni di apporto d'aria stechiometrico. In pratica, però, la combustione non avviene adiabaticamente, perché vi sono dispersioni di calore per irraggiamento e convezione. Inoltre, ad alta temperatura, i prodotti della combustione tendono a decomporsi assorbendo calore ed, infine, l'apporto d'aria è difficilmente quello stechiometrico. Le temperature effettive sono quindi sempre inferiori a quelle teoriche: ciò nonostante, le temperature teoriche possono fornire ugualmente indicazioni utili sulla pericolosità e sull'evolversi delle combustioni.

### 4.4. La composizione dei fumi

Le quantità d'aria stechiometriche sono appena sufficienti ad assicurare una combustione completa se tutto l'ossigeno viene utilizzato. Nei focolari dei generatori di calore si opera

quindi sempre con, più o meno forti, eccessi d'aria ed anche così non sempre le combustioni risultano complete. Negli incendi l'eccesso d'aria non è assicurato, la miscelazione del combustibile con il comburente è affidata alla diffusione soltanto e quindi, ben difficilmente, le combustioni risultano complete. Conseguenza importante è che nei fumi degli incendi c'è sempre da aspettarsi la presenza di ossido di carbonio, in quanto la formazione di ossido di carbonio richiede un solo atomo di ossigeno per ogni atomo di carbonio, contro i due atomi per atomo dell'anidride carbonica. L'ossido di carbonio è un gas inodore ed incolore ma estremamente tossico già sopra le 50 parti per milione (0,005%).

L'altro prodotto della combustione del carbonio, l'anidride carbonica, non è nocivo di per sé, ma risulta ugualmente pericoloso perché costringe le persone non equipaggiate con un respiratore ad aumentare la ventilazione polmonare e perciò favorisce l'inalazione di una gran quantità di fumi.

Numerosi sono poi i gas tossici potenzialmente presenti nei fumi degli incendi che coinvolgono sostanze di uso comune come, ad esempio:

- anidride solforosa derivante dalla combustione, in eccesso d'aria, dello zolfo contenuto nei combustibili, nelle gomme e nelle plastiche;
- idrogeno solforato derivante dalla combustione, in difetto d'aria, di materiali contenenti zolfo;
- acido cianidrico derivante dalla decomposizione termica di lana, seta, fibre tessili in genere, poliuretano e così via;
- acido cloridrico derivante dalla combustione di quasi tutte le plastiche;
- fosgene, fenolo ed altri composti aromatici derivanti dalla decomposizione termica di molte plastiche;
- aldeide acrilica derivante dalla combustione di prodotti petroliferi, oli e grassi;
- ossidi di azoto ed ammoniaca derivanti dalla combustione, in eccesso ed in difetto d'aria rispettivamente, di composti organici contenenti azoto come, ad esempio, lana e fibre tessili;

e l'elenco potrebbe probabilmente continuare!

Nei fumi, soprattutto in difetto d'aria, sono infine contenute moltissime particelle solide in sospensione che riducono notevolmente la vi-

sibilità, causano panico ed ostacolano le operazioni di soccorso.

Per tutti questi motivi non fa quindi meraviglia che i fumi, negli incendi moderni, siano considerati forse ancora più pericolosi delle fiamme.

## 5. DINAMICA DEGLI INCENDI

Nella maggior parte degli incendi si possono riconoscere quattro fasi successive di crescente pericolosità:

- la fase iniziale,
- la fase del fumo,
- la fase di fiamma,
- la fase di massima emissione termica.

Nella *fase iniziale* si ha la formazione di aerosol e di gas di distillazione, senza però fumo o fiamme visibili e senza apprezzabili aumenti di temperatura nell'ambiente. In questa fase l'incendio può venire evidenziato solo dai *sensori a ionizzazione*.

Nella *fase del fumo* i prodotti della combustione diventano visibili e possono venir riconosciuti come tali, mentre la temperatura comincia ad aumentare nell'ambiente ma in modo contenuto. In questa fase l'incendio può venir evidenziato dai *rivelatori fotoelettrici* o dai *rivelatori termovelocimetrici* (cioè sensibili alla velocità di aumento della temperatura).

Nella *fase di fiamma* si è in presenza di un vero e proprio fuoco e la temperatura nell'ambiente raggiunge ben presto valori elevati. In questa fase l'incendio può essere evidenziato, oltre che dai rivelatori fotoelettrici e termovelocimetrici, anche dai *rivelatori di radiazione*, sensibili alle radiazioni infrarosse emesse dai corpi caldi, e dai *rivelatori termici o termostatici*, che entrano in funzione al raggiungimento di una temperatura prefissata.

La *fase di emissione termica* è quella finale, quando l'aumento di temperatura è incontrollabile, il fumo tende a diffondersi a causa dell'espansione termica e del formarsi di correnti convettive, la trasmissione del calore raggiunge il massimo di intensità. Questa fase si verifica dopo qualche minuto dalla comparsa delle fiamme e può esaurirsi spontaneamente solo a causa della cessata disponibilità di sostanze combustibili.

In conseguenza dell'incendio, le temperature nell'ambiente possono anche superare i 1000 °C in ottime condizioni di alimentazione. Aumenta quindi considerevolmente, per effetto della trasmissione termica, anche la temperatura dei materiali combustibili eventualmente presenti nelle zone vicine. Se questi materiali raggiungono la temperatura di accensione prendono fuoco a loro volta, iniziando a produrre altro calore. In tal modo si riproduce, su vasta scala, il meccanismo di propagazione della combustione già descritto in precedenza. Nella

zona di combustione hanno origine, come si è già rilevato, forti correnti di fumo dovute a:

- termoespansione dell'aria;
- effetti camino;
- eventuali azioni del vento;
- funzionamento improprio della ventilazione meccanica.

L'espansione dell'aria è causata dall'aumento di temperatura. Ad esempio, nell'ipotesi di validità dell'equazione di stato dei gas ideali, un aumento di temperatura da 0 a 546 °C a pressione costante, fa aumentare il volume specifico di tre volte o, a volume costante, fa aumentare la pressione ambiente di tre volte. In quest'ultimo caso quindi, non desta sorpresa che porte e finestre saltino con facilità.

Quando la temperatura negli ambienti si è stabilizzata, il principale meccanismo di movimento dei fumi diventa il tiraggio. Il tiraggio però, per manifestarsi, ha bisogno di "camini" quali scale, vani ascensore, cavedi di impianti e così via. Di qui la pericolosità, negli edifici, di tutti gli attraversamenti di piano non protetti adeguatamente.

Il vento, a sua volta, può far muovere verticalmente il fumo ma il suo effetto principale è la propagazione orizzontale del fumo stesso e quindi dell'incendio.

Gli impianti di ventilazione, se non progettati correttamente, 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, tuttavia, possono venir progettati anche per l'estrazione dei fumi in caso di incendi e venir così integrati nel sistema di protezione dell'edificio.

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

Un altro meccanismo, molto importante per la propagazione degli incendi tra corpi separati ma vicini, è l'irraggiamento termico. A causa dell'irraggiamento il calore può venir trasmesso direttamente dalla sorgente al ricevitore per via elettromagnetica. La potenza irradiata intercettabile per unità di superficie del ricevitore, diminuisce però 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 ugual misura: meno pericolose sono le pare-



ti, soprattutto se dotate di buona resistenza al fuoco e quindi capaci di non aumentare troppo di temperatura. Al contrario molto pericolose sono le aperture e, in genere, tutte le superfici che lasciano vedere le fiamme e che, ai fini pratici, vanno prudenzialmente considerate dei radiatori ideali (corpi neri).

## 6. PREVENZIONE E SPEGNIMENTO

Per quanto si è detto, l'incendio può iniziare soltanto quando combustibile e comburente vengono a contatto ed una sorgente esterna di energia funge da innesco.

L'incendio può poi propagarsi soltanto se opportuni meccanismi di trasmissione termica per convezione, naturale e forzata, conduzione o irraggiamento riescono a portare sempre nuove zone alla temperatura di accensione delle sostanze combustibili presenti.

Quindi la prevenzione dell'insorgere degli incendi comporta prescrizioni circa:

- lo stoccaggio di sostanze combustibili, con particolare riguardo ai gas ed ai liquidi a temperatura superiore al punto di infiammabilità;
- la ventilazione, naturale o meccanica, intesa come mezzo per prevenire il formarsi di miscele infiammabili in fase gassosa;
- il divieto di fumare e di usare fiamme libere;
- la prevenzione di inneschi elettrici, come sovratemperature nei cavi, cortocircuiti e scintille da elettricità statica;
- la protezione da scariche atmosferiche;
- la prevenzione di inneschi chimici, come ossidazioni latenti ma capaci ugualmente di dar luogo a temperature pericolose nel lungo termine;
- la prevenzione di inneschi meccanici, come attriti e urti;
- la prevenzione di inneschi termici, come sorgenti di calore ad alta temperatura di qualunque genere.

La prevenzione del propagarsi degli incendi comporta invece prescrizioni circa:

- la compartimentazione degli edifici e la chiusura dei potenziali "camini" al fine di ostacolare quanto possibile l'insorgere di movimenti convettivi non voluti;
- la realizzazione di sfoghi del fumo e del calore;
- i valori di resistenza al fuoco da assegnare agli elementi separatori per ostacolare la conduzione ed impedire il collasso delle strutture;
- la protezione di strutture, infissi e arredi combustibili, se in vista, con sostanze ignifughe;
- le distanze di sicurezza dai locali pericolosi per proteggere gli altri ambienti dell'irraggiamento termico e/o dagli effetti di eventuali esplosioni.

Se l'incendio non viene impedito deve venir spento, con molto maggior rischio per uomini

e cose. I principi attivi dei mezzi di estinzione più comunemente usati agiscono su uno dei quattro bracci della così detta *croce del fuoco* (fig. 7):

- combustibile;
- comburente;
- propagazione termica;
- barriera di attivazione.

### 6.1. Combustibile - comburente

Il metodo più ovvio è la separazione del combustibile dal comburente, ma si tratta di un sistema non certo facile da attuare durante un incendio!

È possibile tuttavia impedire all'ossigeno dell'aria di venire a contatto col combustibile impiegando:

- *schiume* che ricoprono le zone incandescen-

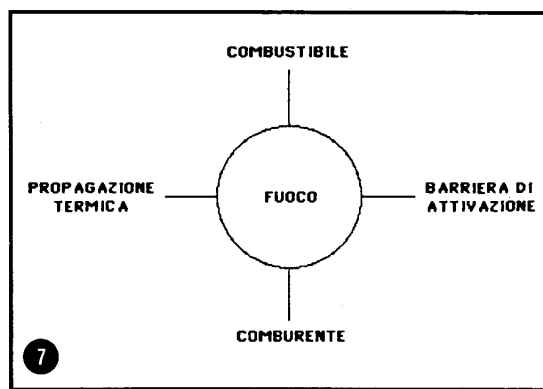


Figura 7  
La "croce del fuoco".

ti, impedendo la diffusione dell'ossigeno ed esercitando anche una certa azione raffreddante;

- *anidride carbonica* che satura la zona interessata scacciandovi l'ossigeno ed esercitando anche una certa azione raffreddante se impiegata come "ghiaccio secco".

### 6.2. Propagazione termica

Il metodo più usato, a memoria d'uomo, è quello di ostacolare la trasmissione del calore mediante apporti, più o meno consistenti, d'acqua. L'acqua evaporando sottrae calore in ragione di circa 2,5 MJ/kg ed è quindi un mezzo di raffreddamento molto efficace. Inoltre il vapore d'acqua scaccia l'aria e cortine d'acqua possono servire anche da "schermi" per l'irraggiamento ed impedire la propagazione diretta a distanza.

L'acqua tuttavia non può essere considerata un mezzo estinguente di impiego universale: si pensi agli incendi elettrici od a tutte quelle situazioni (musei, archivi e così via) dove l'impiego massiccio di acqua potrebbe risultare altrettanto dannoso delle fiamme.

### 6.3. Barriera di attivazione

Alcune sostanze chimiche inibitrici, aumentando l'energia di attivazione, ostacolano il propa-

**Tabella V** - Caratteristiche di infiammabilità di alcune polveri pericolose

| Polveri di               | Limite inferiore di infiammabilità (g/m <sup>3</sup> ) | Temperatura di accensione (°C) | Energia minima di accensione (mJ) |
|--------------------------|--|--------------------------------|-----------------------------------|
| <b>Metalli</b>           |  |                                |                                   |
| Alluminio                | 40   | 700                            | 50                                |
| Ferro                    | 120  | 315                            | 80                                |
| Magnesio                 | 30   | 600                            | 120                               |
| Manganese                | 210  | 450                            | 120                               |
| Zinco                    | 480  | 680                            | 650                               |
| <b>Materie plastiche</b> |  |                                |                                   |
| Gomma sintetica          | 30   | 320                            | 30                                |
| Polietilene              | 25   | 450                            | 80                                |
| Polistirolo              | 20   | 475                            | 120                               |
| Resine poliviniliche     | 40   | 450                            | 100                               |
| <b>Prodotti agricoli</b> |  |                                |                                   |
| Amido                    | 45   | 470                            | 40                                |
| Grano                    | 100  | 470                            | 60                                |
| Legno                    | 40   | 440                            | 20                                |
| Riso                     | 45   | 490                            | 80                                |
| Zucchero                 | 35   | 350                            | 30                                |

garsi della reazione chimica. Su questo principio si fonda l'impiego di:

- *polveri*, in genere bicarbonati di sodio e di potassio, che vengono scaricate direttamente sulle fiamme in grande quantità;

- *idrocarburi alogenati*, derivati dal metano per sostituzione totale o parziale degli atomi di idrogeno con alogeni (cloro, bromo, fluoro).

Gli agenti alogenati meritano un cenno a parte, dato il grande sviluppo del loro impiego registrato negli ultimi tempi. Essi sono noti con i nomi commerciali di Halon 1301, Halon 1211 e Halon 2402 (o Fluobrene). Essi devono venir scaricati in tempi brevissimi, onde evitare la decomposizione termica delle loro molecole e la formazione di composti tossici. Le concentrazioni di impiego sono elevate, dal 4 al 7%, inferiori comunque, ad esempio, a quelle dell'anidride carbonica, che giungono anche al 30% e oltre. Il loro costo è elevato e ciò, aggiunto alla potenziale pericolosità per le persone, costringe ad una progettazione molto accurata degli impianti che li impiegano.

## 7. I PRODOTTI ESPLODENTI

Da un punto di vista quantitativo, l'industria degli esplosivi non riveste grande importanza rispetto alla produzione industriale globale: non va dimenticato tuttavia che l'impiego degli esplosivi è alla base di un gran numero di attività estrattive, edilizie ed industriali e che tale impiego è fonte di alti rischi per molte persone.

Di fronte agli effetti di un'esplosione, si ricava generalmente l'impressione erronea che la capacità distruttiva delle sostanze esplodenti sia dovuta alla liberazione di quantità di energia insolitamente elevate. In realtà non è così: la nitroglicerina libera 6,4 MJ/kg, la pentrite 6,1 MJ/kg ed il tritolo solo 4,1 MJ/kg contro, ad esempio, i 41,9 MJ/kg liberati dall'olio combustibile. Gli effetti distruttivi sono quindi dovuti essenzialmente alla rapidità con cui l'energia disponibile viene liberata cioè, in ultima analisi,

si, alla velocità di reazione estremamente elevata.

Se per le ossidazioni e le combustioni lente la durata può andare da alcuni anni ad alcune ore, per le *combustioni ordinarie* la durata è dell'ordine dei minuti o dei secondi, per le *deflagrazioni* è dell'ordine del secondo e anche meno, mentre per le *detonazioni* può scendere anche al di sotto di un decimillesimo di secondo.

I due tipi fondamentali di esplosione, deflagrazione e detonazione, suggeriscono una classificazione degli esplosivi in tre categorie:

- esplosivi deflagranti o propellenti, in cui la progressione lenta della reazione si traduce in un'azione prevalentemente di spinta, utilizzata nelle armi da fuoco, nei razzi e in pirotecnica;
- esplosivi detonanti secondari, caratterizzati dalla capacità di reagire istantaneamente solo in presenza di una elevata energia di attivazione esterna;
- esplosivi primari od innescanti che, come il fulminato di mercurio o l'azotidrato di piombo, esplodono facilmente ed innescano la detonazione degli esplosivi secondari.

Velocità di reazione così elevate come quelle che si realizzano nelle sostanze esplodenti sono rese possibili dal fatto che gli esplosivi contengono già, nelle loro molecole, ossigeno sufficiente all'ossidazione parziale o totale dei reagenti. In alcuni casi, come negli esplosivi da miniera, si fa anzi in modo che l'esplosione liberi ossigeno, al fine di prevenire la formazione di gas parzialmente ossidati e perciò pericolosi in quanto ancora combustibili.

Un parametro importante è il volume di gas che 1 kg di esplosivo riesce a sviluppare. Per la nitroglicerina tale volume è pari a 0,72 m<sup>3</sup> a 0 °C ed a 11,2 m<sup>3</sup> alla temperatura di esplosione di 4000 °C. In questo modo, 1 kg di nitroglicerina che esplode in un volume di 1 dm<sup>3</sup> genera una pressione pari a 11.200 volte (cioè 11,2/0,001) la pressione iniziale.

Un fattore importantissimo per il successo di un esplosivo è la sicurezza durante tutte le fasi che vanno dall'inizio della fabbricazione al momento dell'impiego. Un esplosivo sicuro deve avere, innanzi tutto, 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 od a temperature eccessive.

Gli esplosivi di più frequente impiego sono, in ordine di importanza:

- nitroglicerina;
- pentrite;
- tritolo;
- polvere nera;
- dinamiti.

### 7.1. Nitroglicerina

La nitroglicerina è un liquido incolore, viscoso e denso, di sapore dolciastro e bruciante. Fu Nobel che nel 1862 ne iniziò la produzione industriale nei pressi di Stoccolma, in una piccola fabbrica che due anni dopo saltò in aria. Quando la produzione riprese, Nobel stesso rese il prodotto più sicuro mescolandolo prima alla farina fossile e, successivamente, alla nitrocellulosa, cioè trasformandolo in dinamite.

### 7.2. Pentrite

La pentrite è una sostanza bianca, cristallina, insolubile in acqua, che fonde a 141 °C. Per la sua stabilità chimica, la relativamente facile manipolabilità e l'alto potere dirompente, sta incontrando sempre maggior favore negli armamenti da guerra e negli usi civili.

### 7.3. Tritolo

Il tritolo è una sostanza cristallina, di color giallo scuro, insolubile in acqua ma solubile in solventi organici, che fonde a 81 °C. Le caratteristiche esplosive sono relativamente modeste ma il costo di produzione basso, la bassa sensibilità alle sollecitazioni meccaniche e l'alta stabilità chimica lo rendono particolarmente adatto agli impieghi militari.

### 7.4. Polvere nera

La polvere nera è il primo esplosivo impiegato nella storia. È costituita da un miscuglio di carbone di legna, zolfo e nitrato di potassio. Viene ancora impiegata nella fabbricazione di micce a lenta combustione ed in pirotecnica.

### 7.5. Dinamiti

Le dinamiti sono gli esplosivi da mina per eccellenza. Le prime prodotte furono appunto quelle ottenute da Nobel mescolando la nitroglicerina alla farina fossile ed alla nitrocellulosa.

Al giorno d'oggi hanno larga diffusione le così

dette dinamiti plastiche, dalla consistenza gelatinosa, che si ottengono aggiungendo nella fabbricazione tutta una serie di ingredienti come nitrati, clorati, farina di legno e paraffina. L'esplosivo risultante, pur mantenendo un'elevata potenzialità è facilmente plasmabile ed è relativamente poco sensibile alle sollecitazioni meccaniche.

## 8. LE ESPLOSIONI DI POLVERI

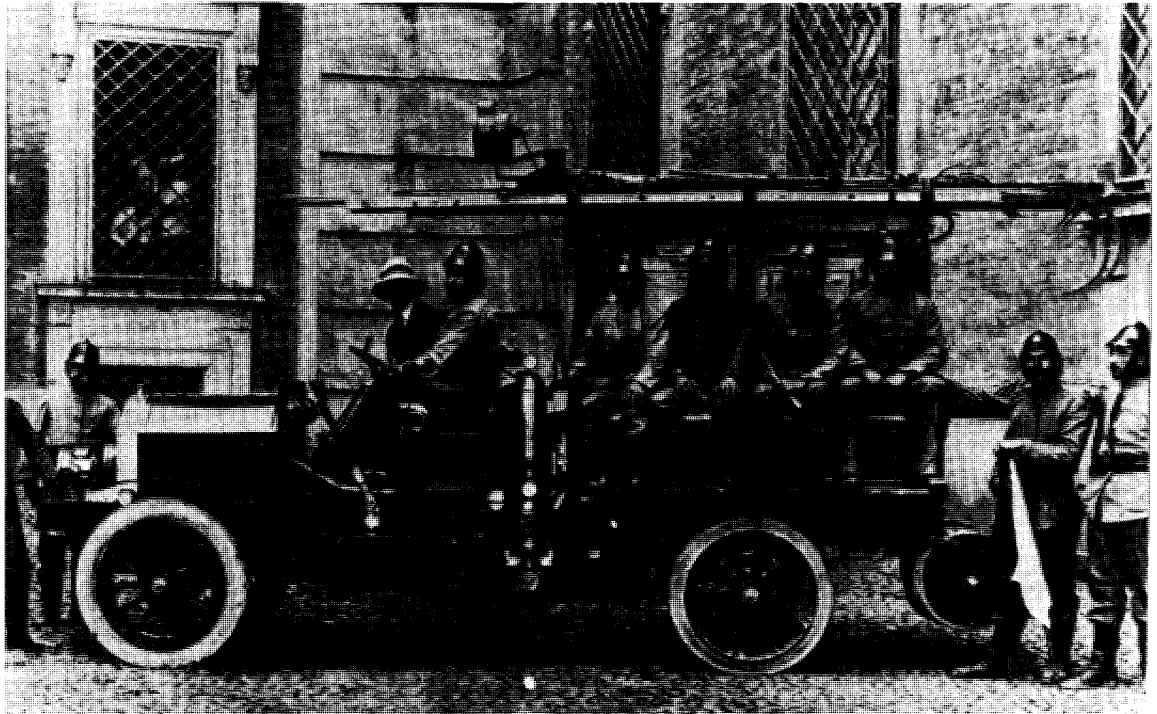
Si è visto in precedenza come i rischi di esplosione non riguardino, in genere, i combustibili solidi, a meno che non si tratti di prodotti esplodenti veri e propri. Le esplosioni si verificano infatti, di solito, in fase gassosa ed in presenza di una miscela con aria di gas o vapori combustibili, avente composizione compresa entro i limiti di infiammabilità. Vi è però una situazione particolare nella quale i solidi si comportano come i gas e tale situazione si verifica quando i solidi sono finemente polverizzati. La polverizzazione aumenta infatti 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.

In presenza di una nube di polveri in concentrazione opportuna, un innesco in un punto qualsiasi può dar luogo ad una combustione più o meno rapida. Si possono così anche verificare condizioni per cui il calore viene generato, in una zona, a velocità maggiore di quella a cui viene dissipato e quindi temperatura e pressione possono salire con rapidità esplosive.

Per *polveri* si intendono particelle più piccole di 420  $\mu\text{m}$  ed *esplosive* si definiscono quelle miscele di polveri ed aria capaci di incendiarsi in presenza di un innesco quale una scintilla, una fiamma, una serpentina di riscaldamento ad alta temperatura. Più piccole sono le dimensioni delle particelle, più grande è la loro superficie reagente per unità di massa, più facilmente e più a lungo le polveri restano in sospensione. Un decremento nelle dimensioni delle particelle comporta quindi più basse temperature di accensione, minori energie di accensione e più basse concentrazioni esplosive.

Alcuni metalli, come il cromo, danno luogo a polveri esplosive solo per dimensioni delle particelle inferiori a 3  $\mu\text{m}$  ma quasi tutti i metalli diventano piroforici per dimensioni delle polveri abbastanza superiori. La maggior parte delle polveri combustibili presenta poi una *concentrazione limite inferiore di infiammabilità* ben definita, mentre il limite superiore, di solito, non è facilmente precisabile e, in ogni caso, non risulta di grande importanza pratica.

Come tutte le reazioni, anche la combustione



delle polveri ha bisogno di una sorgente esterna di energia per iniziare. Occorre cioè che, in qualche punto, si porti la miscela polveraria ad una temperatura superiore a quella di accensione. Evidentemente, più bassa è la temperatura di accensione, più facilmente la combustione può innescarsi e più pericolosa risulta la polvere. Temperature di accensione di 190 - 210 °C, come quelle delle polveri di zolfo, significano che la combustione può venir innescata da una tubazione di vapore non isolata. Temperature di accensione di 20 °C, come quelle delle polveri di uranio e di zirconio, rendono praticamente certa la combustione a concentrazioni superiori a quella minima di infiammabilità.

Un altro parametro di grande interesse è la *energia minima di accensione* cioè la minima quantità di energia elettrica richiesta ad una scintilla per accendere una nube di polveri. Questo indice è determinato in condizioni di prova ben definite ed è sempre citato nelle tabelle riportate in letteratura.

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

L'umidità inoltre può essere utile per evitare accumuli di elettricità statica nelle nubi di polvere e, al limite, per impedire il formarsi stesso delle polveri. In quest'ultimo caso però i livelli di umidità dovrebbero essere così alti da risultare quasi sempre incompatibili con i

processi industriali.

La concentrazione di polveri può venir ridotta anche da impianti di ventilazione adeguati: concentrazioni tollerabili per la salute non sono quasi mai pericolose dal punto di vista delle esplosioni. Negli impianti di ventilazione stessi però si potrebbero verificare pericolose concentrazioni di polveri nelle condotte o nei plenum.

Durante le lavorazioni infine, si possono diluire le polveri pericolose con polveri inerti o inibitrici di reazione quali quelle usate negli estintori. A questo scopo trovano impiego i già più volte menzionati carbonati di sodio e di potassio, molto efficaci nell'elevare la soglia di attivazione.

---

### Bibliografia

- [1] P. Andreini e F. Pierini, *La Conduzione dei Generatori di Vapore*, Hoepli, Milano, 1980.
- [2] Ashrae, *Fire and Smoke Control - Cap. 41*, In "Systems Handbook", Ashrae, New York, 1980.
- [3] L. Corbo, *Manuale di Prevenzione Incendi nell'Edilizia e nell'Industria*, Pirola, Milano, 1985.
- [4] R.E. Dickerson e I. Geis, *Chimica, Materia e Universo*, Zanichelli, Bologna, 1983.
- [5] G. Elifani, *La Prevenzione Incendi nella Piccola e Media Industria*, EPC, Roma, 1984.
- [6] A. Girelli, L. Matteoli e F. Parisi, *Trattato di Chimica Industriale ed Applicata*, Zanichelli, Bologna, 1975.
- [7] V. Gottardi, *I Combustibili*, Patron, Bologna, 1978.
- [8] R. Luciani, *Sistemi Antincendio negli Impianti Industriali*, De Donato, Bari, 1976.
- [9] R. Luciani, *L'Incendio nell'Edilizia*, De Donato, Bari, 1978.
- [10] Marks, *Standard Handbook for Mechanical Engineers - Cap. 7/25-33*, Mc Graw - Hill, New York, 1980.
- [11] C. Rumor e G. Strohmenger, *Riscaldamento, Ventilazione, Condizionamento, Impianti Sanitari*, Hoepli, Milano, 1981.

---

**PROF. GIANNI COMINI**

ordinario di fisica tecnica, istituto di fisica tecnica e di tecnologie industriali università di udine