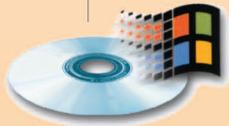


MECCANICA DELL'INCENDIO e VALUTAZIONE DEL RISCHIO

In allegato il software



per Windows 95/98/NT/ME/2000

**CURVA
REALE**

- Aspetti tecnici
- Chimica e fisica della combustione
- Comportamento al fuoco dei materiali
- Cause dell'incendio
- Effetti dell'incendio
- Analisi del rischio ai fini antincendio
- Analisi costi benefici
- Calcolo della curva reale dell'incendio
- Rappresentazione delle curve parametriche

Alfredo Amico Giacomo Amico Giovanni Bellomia

MECCANICA DELL'INCENDIO E VALUTAZIONE DEL RISCHIO

A. Amico - G. Amico - G. Bellomia
MECCANICA DELL'INCENDIO E VALUTAZIONE DEL RISCHIO
ISBN 88-7758-428-9

Prima edizione: gennaio 2002

© 2002 by Dario Flaccovio Editore s.r.l. - tel. 091202533 - fax 091227702

www.darioflaccovio.it e-mail info@darioflaccovio.it

*Tutti i diritti riservati. È vietata la riproduzione al di fuori dei termini di legge.
I testi sono stati curati con la più scrupolosa attenzione. Gli autori e l'editore
declinano ogni responsabilità per eventuali involontari errori o inesattezze,
ed invitano l'utente a controllare l'esattezza del materiale utilizzato.*

Amico, Alfredo <1967>

Meccanica dell'incendio e valutazione del rischio / Alfredo Amico, Giacomo Amico,
Giovanni Bellomia. - Palermo : D. Flaccovio, 2002.
ISBN 88-7758-428-9.

1. Incendi - Prevenzione. I. Amico, Giacomo <1933>. II. Bellomia, Giovanni <1961>.
628.922 CDD-20

CIP - Biblioteca centrale della Regione siciliana

Ogni sforzo è stato fatto nella creazione, realizzazione, verifica e documentazione dei programmi contenuti in questo libro: essi sono forniti in versione compilata ed il loro acquisto non comprende la facoltà di ottenere la codifica sorgente degli stessi né di disporre della documentazione logica e di progetto. L'utente ha il diritto di utilizzare una sola copia dei programmi su un terminale singolo collegato ad un computer con singola CPU; l'utente non può installare i programmi in network o su più computer o terminali nello stesso tempo. L'utente può fare una sola copia dei programmi esclusivamente per esigenze di archivio ed installarlo su un singolo disco fisso. L'utente non potrà rimuovere né alterare alcun marchio, nome commerciale, numero di serie, indicazione di copyright o altra notifica di riserva di diritti o inseriti nei programmi e/o nel supporto. La verifica dell'idoneità dei programmi per ottenere certi risultati, l'installazione, l'uso e la gestione sono onere e responsabilità esclusiva dell'utente; l'autore non garantisce che le funzioni contenute nel programma soddisfino in tutto o in parte le esigenze dell'utente o funzionino in tutte le combinazioni che possono essere scelte per l'uso, non potendo fornire alcuna garanzia sulle prestazioni e sui risultati ottenibili dal loro uso, né essere ritenuto responsabile dei danni o dei benefici risultanti dall'utilizzazione degli stessi.

Nomi e marchi citati sono generalmente depositati o registrati dalle rispettive case produttrici

SOMMARIO

Prefazione	Pag.	7
Introduzione	»	9

CAPITOLO I - CHIMICA-FISICA DELLA COMBUSTIONE

1.1. Fenomeno fisico-chimico	»	13
1.2. Combustibili	»	13
1.2.1. Classificazione dei combustibili	»	13
1.3. Combustione	»	13
1.3.1. Condizioni necessarie per la combustione	»	14
1.3.2. Calore di combustione - Potere calorifico	»	14
1.3.3. Aria necessaria alla combustione	»	15
1.3.4. Velocità di combustione	»	16
1.3.5. Prodotti della combustione.....	»	16
1.4. Comportamento dei combustibili solidi, liquidi e gassosi.....	»	18
1.4.1. Combustibili solidi	»	18
1.4.2. Combustibili liquidi	»	18
1.4.3. Combustibili gassosi	»	19
1.5. Autocombustione - Combustioni lente (ossidazioni) e combustioni vive	»	21

CAPITOLO II - L'INCENDIO

2.1. L'incendio	»	25
2.1.1. Classi degli incendi	»	25
2.1.2. Fasi dell'incendio	»	25
2.1.3. Danni prodotti dall'incendio in funzione del tempo d'intervento.....	»	27
2.2. Incendio reale e incendio convenzionale (curva reale e curva standard dell'incendio).....	»	27
2.3. Fattori da cui dipende l'incendio	»	28
2.3.1. Carico d'incendio	»	29
2.3.2. Ventilazione	»	29
2.3.3. Velocità di combustione	»	29
2.4. Durata convenzionale prevista di sviluppo dell'incendio	»	29
2.5. Durata di un incendio	»	30
2.6. Cause dell'incendio	»	30
2.7. Effetti dell'incendio sull'organismo umano e sulle cose	»	31
2.7.1. Calore.....	»	31
2.7.2. Fiamma	»	31
2.7.3. Fumo	»	31
2.7.4. Gas di combustione	»	32
2.8. Effetti degli incendi sui materiali da costruzione	»	33
2.8.1. Effetti dell'incendio sul legno	»	33
2.8.2. Effetti dell'incendio sull'acciaio.....	»	33
2.8.3. Effetti dell'incendio sul cemento armato	»	33
2.8.4. Effetti dell'incendio sui laterizi	»	34

CAPITOLO III - PREVENZIONE INCENDI

3.1. La sicurezza o prevenzione primaria	»	39
3.2. La sicurezza o prevenzione secondaria.....	»	39

CAPITOLO IV - ANALISI DI RISCHIO AI FINI ANTINCENDIO

4.1. Analisi di rischio ai fini antincendio (con esclusione dei rischi di incidenti rilevanti connessi con determinate attività industriali)	»	43
4.2. Primo metodo di valutazione del rischio incendio (metodo n. 1)	»	45
4.2.1. Esempio schede per valutazione rischi antincendio	»	47
4.3. Secondo metodo di valutazione del rischio incendio (metodo n. 2)	»	56
4.4. Terzo criterio di valutazione del rischio incendio e scelta delle protezioni antincendio (metodo n. 3).....	»	60
4.4.1. Valutazione del rischio per il fabbricato (RF)	»	61
4.4.2. Rischio per le persone e per il contenuto del fabbricato	»	62
4.5. Elenchi di attività a rischio incendio elevato, medio e basso di cui all'allegato IX del D.M. 10 marzo 1998.....	»	63

CAPITOLO V - ANALISI COSTI-BENEFICI ANTINCENDIO

5.1. Analisi costi-benefici antincendio	»	67
---	---	----

CAPITOLO VI - SOLUZIONI TECNICHE PER ESTINGUERE L'INCENDIO E CONTENERE I DANNI

6.1. Soluzioni tecniche per estinguere l'incendio e contenere i danni	»	71
6.1.1. Sistema di rimozione del combustibile.....	»	71

6.1.2. Sistema di rimozione del comburente	»	71
6.1.3. Sistema di rimozione del calore	»	71
6.1.4. Sistema di estinzione chimica o anticatalitico	»	71
6.1.5. Sistema di estinzione meccanica.....	»	72

CAPITOLO VII - COMPORTAMENTO ALL'INCENDIO DEI MATERIALI

7.1. Comportamento all'incendio dei materiali	»	75
7.1.1. Terminologia	»	75
7.1.2. La resistenza al fuoco	»	75
7.1.3. La reazione al fuoco.....	»	76
7.1.3.1. Tende e materiali sospesi in genere	»	76
7.1.3.2. Poltrone e altri mobili imbottiti in genere.....	»	76
7.1.3.3. Rivestimenti dei soffitti, delle pareti e dei pavimenti	»	77
7.1.3.4. La classe di reazione al fuoco	»	77
7.1.3.5. Prove e certificati di prova	»	77
7.1.3.6. Reazione al fuoco dei materiali legnosi trattati con prodotti vernicianti ignifughi	»	78
7.1.4. L'analisi degli effluenti	»	78
7.1.4.1. L'analisi dei fumi	»	78
7.1.4.2. L'analisi dei gas.....	»	79
7.1.4.3. Interpretazione dei dati di analisi di gas	»	79
7.2. Parametri del comportamento al fuoco dei materiali ed effluenti dell'incendio	»	79
7.3. Transizione dal sistema determinista-prescrittivo al sistema autocertificativo.....	»	79
7.4. Direttiva CEE per i materiali da costruzione	»	80

CAPITOLO VIII - ASPETTI TEORICI PER LA DETERMINAZIONE DELLA CURVA REALE DI INCENDIO

8.1. Generalità.....	»	83
8.2. Il software allegato	»	85
8.2.1. Installazione	»	85
8.2.2. Descrizione del programma	»	87
8.2.3. Parametri per la determinazione della curva reale	»	88
8.2.3.1. La sezione dati incendio reale	»	88
8.2.3.2. La sezione temperature	»	92
8.2.3.3. Comandi della toolbar	»	92
Appendice: Stampe di <i>Curva Reale</i>	»	95

APPENDICE LEGISLATIVA

• D.P.R. 26 maggio 1959, n. 689 - <i>Determinazione delle aziende e lavorazioni soggette, ai fini della prevenzione degli incendi, al controllo del comando del Corpo dei Vigili del Fuoco</i>	»	109
• D.M. 16 febbraio 1982 - <i>Modificazioni del decreto ministeriale 27 settembre 1965, concernente la determinazione delle attività soggette alle visite di prevenzione incendi</i>	»	111
• D.M. 27 marzo 1985 - <i>Modificazioni al decreto ministeriale 16 febbraio 1982, contenente l'elenco dei depositi e industrie pericolosi soggetti alle visite e controlli di prevenzione incendi</i>	»	114
• D.M. 30 ottobre 1986 - <i>Modificazione al decreto ministeriale 27 marzo 1985 recante modifiche al decreto ministeriale 16 febbraio 1982 contenente l'elenco dei depositi e industrie pericolosi soggetti alle visite e controlli di prevenzione incendi</i>	»	114
• Circolare n. 25 del 2 giugno 1982 - <i>Decreto Ministeriale 16 febbraio 1982 "Modificazioni del decreto ministeriale 27 settembre 1965, concernente la determinazione delle attività soggette alle visite di prevenzione incendi" - Chiarimenti e criteri applicativi</i>	»	114
• Circolare n. 52 del 20 novembre 1982 - <i>Decreto Ministeriale 16 febbraio 1982 e D.P.R. 29 luglio 1982, n. 577. Chiarimenti</i>	»	115
• D.M. 30 novembre 1983 - <i>Termini, definizioni generali e simboli grafici di prevenzione incendi</i>	»	117
Gli autori	»	121
Bibliografia.....	»	123

Prefazione

L'uomo nel tempo ha constatato che negli incendi si manifestano sempre i medesimi fattori determinanti. Si è, quindi, reso conto che è molto più efficace uno studio per prevenire l'originarsi dell'incendio e limitarne gli effetti ove verificatosi.

Da ciò è nata la "prevenzione incendi", branca della sicurezza nel cui merito vengono promossi, studiati, predisposti e sperimentati provvedimenti, misure e interventi tesi ad evitare l'insorgere dell'incendio ed a limitare le conseguenze nel caso si verifichi.

Il volume comprende: la chimica-fisica della combustione; l'incendio: classi, fasi, effetti su persone, cose e materiali da costruzione; l'analisi rischio ai fini antincendio - riduzione della frequenza del magnitudo dell'incendio; le soluzioni tecniche per l'estinzione dell'incendio; il comportamento all'incendio dei materiali.

L'appendice, oltre l'elenco delle attività soggette al controllo e visite di prevenzione incendi, riporta i termini, definizioni e simboli grafici di prevenzione incendi.

L'opera è dotata di un software che permette di ottenere:

- la curva di incendio reale per la valutazione del rischio incendio;*
- la realizzazione tecnica relativa (curve tempo-temperatura, curva incendio reale per la valutazione del rischio incendio).*

Gli Autori

Introduzione

Il fuoco da quando è stato scoperto si è dimostrato molto utile all'uomo, ma le sue manifestazioni distruttive sono sempre state contrastate e si sono cercati, nel tempo, metodi sempre più efficaci per spegnerlo al fine di limitare i danni.

Si ricorda che:

- dopo l'incendio di Roma nel 64 d.C., l'imperatore Nerone promulgò delle leggi per la migliore distribuzione e piena efficienza delle bocche d'acqua e per intervenire con efficienza negli incendi che si verificavano continuamente;
- nel medioevo, con il declino della potenza romana si ha una decadenza dell'organizzazione contro gli incendi. La chiesa si trovò ad essere l'unica struttura organizzata per proteggere la popolazione a cui, successivamente, si aggiunsero delle associazioni private locali, a carattere religioso o laico, per il reciproco aiuto contro gli incendi;
- con la nascita dei Comuni e fino al XX secolo, sono stati emanati dei comuni stessi editti per prevenire, segnalare ed estinguere gli incendi. Con l'unificazione e la creazione del nuovo Stato italiano, le amministrazioni comunali costituiscono dei propri servizi antincendi con propri organismi e propri regolamenti (Civici Pompieri);
- nel 1935 con il R.D.L. n. 2472 viene istituito il Corpo dei pompieri (i servizi comunali vengono unificati su base provinciale con unica direzione del Ministero dell'Interno), un'organizzazione unitaria su tutto il territorio nazionale che si interessava di prevenzione incendi e repressione degli incendi, venendo così meno la disomogeneità esistente prima;
- successivamente si è avuta una migliore organizzazione dei pompieri che vengono denominati Vigili del Fuoco.

Con le esperienze acquisite e l'evoluzione delle tecnologie ci si è resi conto che è molto più efficace uno studio diretto a prevenire ed a limitare gli effetti del fuoco.

Dall'analisi di eventi, studiati accuratamente, e dalle ricerche fatte sono stati individuati alcuni fattori che quasi sempre sono determinanti nel verificarsi di un incendio:

- rapido propagarsi delle fiamme;
- sviluppo di calore e fumo con conseguenze gravi per le persone che si trovano nell'ambiente per la difficoltà di respirazione, la scarsa visibilità ed il disorientamento che si subisce;
- sviluppo di gas tossici e soffocanti con conseguenze letali per le persone;
- l'andata fuori servizio degli impianti tecnologici (illuminazione, ascensori, ventilazione, ecc.).

Nel progettare un'opera occorre studiare il problema sicurezza nel suo complesso scegliendo bene con analisi i sistemi di prevenzione e protezione, tenendo presente che la sicurezza assoluta è solo ipotetica.

Quindi in fase di progettazione bisogna predisporre quelle misure atte a:

- ridurre le probabilità di innesco, ossia ridurre la probabilità che si verifichi l'incendio;
- ridurre al minimo i pericoli degli impianti a rischio specifico, ubicandoli idoneamente;
- adeguare le vie di esodo e le uscite per le persone, tenendo presente gli handicappati, realizzare sistemi di scarico per fumi, calore e sovrappressioni;
- rendere difficile la propagazione del fuoco;
- realizzare sistemi di intercettazione di focolai;
- realizzare e predisporre sistemi di intervento per ridurre i danni nel caso si verifichi l'incendio.

I danni provocati dagli incendi sono molto elevati e si registra che ogni dieci minuti circa, in qualche angolo della terra, si sviluppa un incendio.

Il tema sicurezza antincendio assume, non solo in Europa ma in tutto il mondo, sempre più rilevanza.

In fase di progettazione, la determinazione della curva dell'incendio reale (che illustra come si sviluppa in realtà un possibile incendio) permette di valutare il rischio incendio e trarre le soluzioni ai fini antincendio.

CAPITOLO I

Chimica-fisica della combustione

1.1. FENOMENO FISICO-CHIMICO

Fenomeno fisico è quello che, appena cessato, consente al materiale interessato di ritornare allo stato iniziale. Ad esempio, una lampada ad incandescenza accesa dà luogo a luce e calore (si è riscaldato il filo interno della lampada), mentre spegnendola cessa di sviluppare luce e calore (si è raffreddato il filo interno della lampada che è ritornato allo stato iniziale).

Fenomeno chimico è quello che, appena cessato, non consente al materiale interessato di ritornare allo stato iniziale, avendo subito delle trasformazioni. Ad esempio, un pezzo di legno che brucia dà luogo a luce e calore, ma appena spento ha subito trasformazioni (il legno si è consumato, la parte restante è carbonizzata, si è ottenuta brace e cenere).

1.2. COMBUSTIBILI

Si definiscono combustibili le sostanze che bruciano. Gli elementi fondamentali che li compongono sono il carbonio e l'idrogeno combinati fra loro e con altri elementi.

1.2.1. Classificazione dei combustibili

Una grossolana distinzione delle sostanze combustibili potrebbe farsi in base alla minore o maggiore facilità con cui bruciano all'aria, tenendo presente i fattori quali temperatura di combustione, temperatura di ignizione, calore di combustione, velocità di combustione, ecc..

Poiché le caratteristiche di combustione e le modalità d'uso sono connesse allo stato fisico delle sostanze combustibili, queste vengono classificate in:

- solide {
 - in natura: legno, torba, lignite, litantrace, antracite
 - derivati: carbone di legna, coke, ecc.
- liquide {
 - in natura: olii minerali grezzi
 - derivati: benzine, petroli, raffinati, kerosene, olii combustibili, g.p.l., ecc.
- gassose {
 - in natura: gas naturale
 - derivati: gas illuminante, gas d'aria, idrogeno, ecc.

A queste sono da aggiungere le sostanze esplosive (da non confondere con le miscele esplosive) che sono quelle sostanze che contengono nella lo-

ro molecola sufficiente ossigeno per bruciare anche in assenza di aria.

1.3. COMBUSTIONE

La combustione è una reazione chimica.

si hanno: {

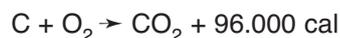
- reazioni endotermiche, cioè reazioni che avvengono con assorbimento di calore
- reazioni esotermiche, ossia reazioni che avvengono con sviluppo di calore.

La combustione è un caso particolare della reazione esotermica e con il termine *combustione* si indicano quelle reazioni chimiche che avvengono con l'intervento dell'ossigeno dell'aria e che sono accompagnate da uno sviluppo di calore e da una produzione di radiazioni luminose (fiamma). Il processo chimico della combustione (ossidazione del combustibile) sviluppa calore il quale dipende dalla composizione della sostanza.

Considerando che i combustibili tradizionali sono costituiti principalmente da carbonio e idrogeno, questi combinandosi con l'ossigeno danno:

- 1) $C + 1/2 O_2 \rightarrow CO + 29.000 \text{ cal}$
- 2) $CO + 1/2 O_2 \rightarrow CO_2 + 67.000 \text{ cal}$
- 3) $H_2 + 1/2 O_2 \rightarrow H_2O + 57.000 \text{ cal}$

Si fa osservare che, per la legge di Hess, sommando l'energia termica delle reazioni 1) e 2) si ottiene lo stesso risultato termico della seguente reazione



Si noti che combustioni sono anche quelle reazioni che avvengono:

- con l'intervento dell'ossigeno dell'aria senza produzione di radiazioni luminose (es.: i processi di respirazione degli animali);
- senza l'intervento dell'ossigeno dell'aria ma accompagnate da emissione di calore ed a volte anche da radiazioni luminose (es.: i processi di respirazione delle piante);
- in assenza di aria (ossigeno) in quanto la molecola della sostanza contiene sufficiente ossigeno per bruciare (celluloide, polvere da sparo, esplosivi);
- nelle sostanze cosiddette «spontaneamente infiammabili» (fosforo giallo, idrogeno fosforato, alcuni metalli e composti metallici);

- in presenza di agenti diversi dall'ossigeno (es.: l'idrogeno e molti metalli che bruciano in atmosfera di azoto e di anidride carbonica, ossido di sodio e bario che bruciano in atmosfera di anidride carbonica).

Le combustioni si distinguono in:

- *combustione omogenea*: combustione tra combustibile gassoso e comburente gassoso (gas + gas);
- *combustione eterogenea*: combustione tra combustibile solido e comburente gassoso (solido + gas), combustione tra combustibile liquido e comburente gassoso (liquido + gas);
- *combustione degli esplosivi*.

1.3.1. Condizioni necessarie per la combustione

Perché possa determinarsi combustione necessita la commistione di tre grandezze fisiche (fig. 1):

- massa combustibile;



Fig. 1 - Triangolo del fuoco

- massa comburente;
- energia di attivazione.

Il combustibile è la sostanza in grado di combinarsi chimicamente con l'ossigeno.

Il comburente è l'ossigeno, sia esso puro o contenuto nell'aria ovvero contenuto in composti quali clorati, nitrati, perossidi, ecc. - (l'ossigeno è il più noto e diffuso comburente - altri comburenti sono il protossido di azoto N_2O , il biossido di azoto NO_2 , l'ossido di azoto NO , ecc.).

L'energia di attivazione è il calore necessario a portare almeno una piccola parte della miscela infiammabile (combustibile + comburente) alla temperatura di ignizione.

Si noti che la reazione delle unità elementari delle miscele infiammabili non avviene in una unica fase di trasformazione chimico-fisica bensì attraverso un susseguirsi di stadi (vedi teoria «Three body collision» in Glasstone text box of Physical chemistry).

Per esempio si consideri il cerino che si accende e quindi brucia. Abbiamo presenti combustibile, comburente ed energia di attivazione. Avuta la scintilla (energia di attivazione) questa riscalda la parte di sostanza adiacente la capocchia del cerino che, a contatto con l'ossigeno dell'aria (miscela comburente + combustibile) brucia, si riscalda ancora la parte di sostanze adiacente la fiamma che a contatto con il comburente (ossigeno dell'a-

ria) brucia e così via (autoalimentazione della combustione) fino al consumarsi di tutto il cerino.

Quindi, affinché possa avere luogo una combustione e questa possa continuare occorre il verificarsi congiunto di quattro condizioni;

- presenza del combustibile;
- presenza del comburente;
- temperatura di accensione;
- autocatalisi (autoalimentazione della combustione, nonostante viene a cessare l'innesco esterno il combustibile continua a reagire con il comburente).

Il triangolo del fuoco di Kinsley viene dunque sostituito dalla *croce del fuoco* che si compone di quattro elementi di cui uno non è una grandezza fisica ma un fenomeno chimico-fisico (fig. 2).

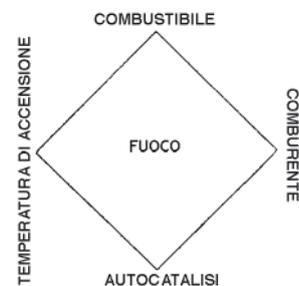


Fig. 2 - Croce del fuoco

Il fuoco pertanto potrà generarsi e permanere unicamente se si ritrovano operanti le quattro condizioni. Non appena una di essa viene a mancare, il fuoco si estingue ovvero non può essere generato.

1.3.2. Calore di combustione - Potere calorifico

Per calore di combustione si intende il calore liberato in ogni reazione di ossidazione. In tutte le applicazioni pratiche di combustibile si ha interesse che la combustione avvenga la più completa possibile al fine di ottenere la massima quantità possibile di calore. Infatti l'utilizzazione massima di un combustibile si ha quando questo brucia completamente dando luogo esclusivamente a formazione di acqua ed anidride carbonica, cosa che può ottenersi con una sufficiente quantità di aria e l'utilizzazione completa dell'ossigeno contenuto nella stessa aria.

Nella pratica utilizzazione dei combustibili si ha la necessità di conoscere la quantità di calore prodotta da un dato peso di sostanza (per es. da 1 kg di sostanza combustibile solida o liquida o da 1 cm di sostanza combustibile gassosa) che viene chiamata potere calorifico.

Le unità di misura della quantità di calore sono:

- la piccola caloria - quantità di calore necessaria per riscaldare da $14,5^{\circ}C$ a $15,5^{\circ}C$ 1 grammo di acqua;
- la grande caloria - quantità di calore necessaria per riscaldare da $14,5^{\circ}C$ a $15,5^{\circ}C$ un chilogrammo di acqua.

Il *calore di combustione* è la quantità di calore prodotta dalla combustione di un grammoatomo o di una grammomolecola di un elemento o composto chimico definito in rapporto ad una definita reazione chimica; il potere calorifico è la massima quantità di calore che si può ottenere da 1 kg (nel caso di liquidi o solidi) o 1 mc (nel caso di gas) di sostanza combustibile, anche di composizione eterogenea, quando si fa bruciare in modo da ottenere l'ossidazione completa dei singoli componenti.

Per *ossidazione completa o combustione completa* si intende quella nel corso della quale tutto il carbonio, sotto qualunque forma si trovasse nel combustibile originario, viene trasformato in CO₂, tutto l'idrogeno in H₂O, tutto lo zolfo in SO₂ e tutto l'azoto in azoto elementare N₂.

Per le sostanze combustibili contenenti idrogeno e che bruciano dando luogo a formazione di acqua si distinguono:

- *potere calorifico superiore*, da cui non viene detratto il calore di evaporizzazione dell'acqua formatasi nella reazione di combustione;
- *potere calorifico inferiore*, pari al potere calorifico superiore da cui viene detratto il calore di evaporizzazione dell'acqua formatasi nella reazione della combustione - (le molecole di acqua che si formano durante la reazione evaporano immediatamente assorbendo 600 kcal/kg circa). In sostanza si ha il potere calorifico inferiore quando l'acqua si trova allo stato gassoso.

Nella pratica, il potere calorifico inferiore è quello a cui si fa riferimento e la cui unità di misura è la kcal/kg nel caso di combustibili solidi e liquidi e la kcal/Nm³ nel caso di combustibili gassosi (il Nm³ è il volume di gas che, in condizioni normali 760 mmHg, 0°C-, corrisponde al m³).

La differenza fra i due poteri calorifici è uguale al calore di evaporizzazione dell'acqua. Per passare dall'uno all'altro si ha:

$$P_{ci} = P_{cs} - m \lambda$$

ove

P_{cs} = potere calorifico superiore

P_{ci} = potere calorifico inferiore

m = peso di acqua prodotta per kg di combustibile

$\lambda \simeq 600$, è il calore latente di vaporizzazione.

Per combustibili gassosi si distinguono:

- *il potere calorifico a pressione costante*, che viene utilizzato quando si brucia un combustibile gassoso all'aria libera dove i gas di combustione si espandono liberamente alla pressione atmosferica;
- *il potere calorifico a volume costante* di un dato gas combustibile, che è più grande del potere calorifico a pressione costante dello stesso gas perché in quest'ultimo caso una parte del calore della reazione di combustione è utilizzato per la espansione dei prodotti della combustione.

Si noti che la differenza fra due poteri calorifici è così piccola da potere essere in prima approssimazione trascurata e quando non si specificano meglio si deve comunque intendere che i valori si riferiscono a una combustione a pressione costante.

1.3.3. Aria necessaria alla combustione

Il volume di aria teoricamente necessario per la combustione completa di 1 kg o di 1 mc di combustibile prende il nome di potere comburivoro ed è espresso in mc/kg per i combustibili solidi e liquidi e in mc/mc per combustibili gassosi:

$$V_{ta} = 4,76V_{to}$$

ove

V_{ta} = volume teorico di aria

V_{to} = volume teorico di ossigeno

$$V_{to} = 1,87 C + 5,6 H + 0,7 S - 0,7 O$$

C, H, S, O sono rispettivamente le quantità in peso espressi in kg dei componenti del carbonio, idrogeno, zolfo ed ossigeno contenuti in 1 kg di sostanza combustibile.

Nel caso si disponga dei poteri calorifici delle sostanze si può calcolare approssimativamente il volume di aria teorica come segue:

$$V_{ta} = 0,00101 \cdot P_{ci} + 0,5 \text{ m}^3 \text{ n/kg (combustibili solidi)}$$

$$V_{ta} = 0,00085 \cdot P_{ci} + 2 \text{ m}^3 \text{ n/kg (combustibili liquidi)}$$

$$V_{ta} = 0,00109 \cdot P_{ci} - 0,25 \text{ m}^3 \text{ n/mc (combustibili gassosi)}$$

Sostanza	Peso (gr)	Reazione di combustione			Calore svolto (kcal)
Idrogeno	2	H ²	+ 1/2 O ₂	= H ₂ O	57,8
Carbonio	12	C	+ 1/2 O ₂	= CO	29,0
Carbonio	12	C	+ O ₂	= CO ₂	96,0
Ossido di carbonio	28	CO	+ 1/2 O ₂	= CO ₂	67,0
Metano	16	CH ₄	+ 4 O ₂	= CO ₂ + 2 H ₂ O	212,0
Etano	30	C ₂ H ₆	+ 3 1/2 O ₂	= 2 CO ₂ + 3 H ₂ O	370,0
Propano	44	C ₃ H ₈	+ 5 O ₂	= 3 CO ₂ + 4 H ₂ O	529,0
Etilene	28	C ₂ H ₄	+ 3 O ₂	= 2 CO ₂ + 2 H ₂ O	333,3
Propilene	42	C ₃ H ₆	+ 4 1/2 O ₂	= 3 CO ₂ + 3 H ₂ O	492,7
Acetilene	26	C ₂ H ₂	+ 2 1/2 O ₂	= CO ₂ + H ₂ O	310,0
Cianogeno	26	CN	+ O ₂	= CO ₂ + 1/2 N ₂	259,6
Benzolo	78	C ₆ H ₆	+ 4 1/2 O ₂	= 3 CO ₂ + 3 H ₂ O	799,0
Toluolo	92	C ₇ H ₈	+ 8 O ₂	= 6 CO ₂ + 4 H ₂ O	955,0
Alcoole metilico	32	CH ₃ OH	+ 1 1/2 O ₂	= CO ₂ + 2 H ₂ O	182,0
Alcoole etilico	46	C ₂ H ₅ OH	+ 3 O ₂	= CO ₂ + 3 H ₂ O	340,0

1.000 cal = Kcal = 1 Cal = 427 kgm = 4,186 Joul = 4,2 · 10⁻¹⁰ erg

Si è visto che l'utilizzazione massima di un combustibile si può avere quando brucia completamente. Ciò si può ottenere solo fornendo al combustibile una giusta e sufficiente quantità di aria e cercando che questa venga a contatto con il combustibile nel modo migliore affinché l'ossigeno in essa contenuto venga utilizzato. Con il volume di aria teorica per avere una combustione completa sarebbe necessario che il combustibile ed il comburente venissero miscelati intimamente, cosa impossibile per tutte le sostanze ed in particolare per le sostanze solide e liquide e teoricamente possibile per il gas.

Con il volume di aria teorica si verrebbe ad avere una combustione incompleta (reazione con difetto di aria) e quindi, in pratica, per avere una combustione completa, si usa maggior aria (reazione con eccesso di aria) nelle seguenti percentuali:

- da 30% ÷ 100% aria in eccesso per combustibili solidi;
- da 15% ÷ 30% aria in eccesso per combustibili liquidi;
- da 5% ÷ 20% aria in eccesso per combustibili gassosi;

quindi, si usa la seguente relazione

$$V_{ea} = EV_{ta}$$

ove:

V_{ea} = volume effettivo di aria

V_{ta} = volume teorico di aria

E = coefficiente: 1,5 ÷ 2 per combustibili solidi, 1,15 ÷ 1,3 per combustibili liquidi, 1,05 ÷ 1,2 per combustibili gassosi.

Si fa rilevare che in un ambiente chiuso, quando il tenore di ossigeno scende al di sotto di 12% ÷ 14% la combustione cessa (limite non uguale per tutti i combustibili).

1.3.4. Velocità di combustione

Nelle reazioni di combustione occorre considerare anche la rapidità con la quale le reazioni stesse si sviluppano e procedono.

Questo fattore cinetico delle reazioni di combustione è importante, in quanto la capacità alla combustione delle varie sostanze combustibili può essere caso per caso molto differente, non soltanto in rapporto alla reazione che prende luogo, ma più particolarmente in rapporto a situazioni spesso occasionali e fra le quali, prima fra tutte, quelle dell'ambiente.

¹ I prodotti della combustione disorientano la persona che si trova nell'ambiente in cui si è verificata (ambiente in cui si è verificato l'incendio).

² L'ossido di carbonio si ha quando la combustione avviene con una bassa concentrazione di ossigeno.

³ L'anidride carbonica si ha quando la combustione avviene con alta concentrazione di ossigeno.

Molte sostanze ordinariamente stabili all'aria possono rapidamente bruciare in un'atmosfera di ossigeno e viceversa. Modificando l'ambiente ove avviene o può avvenire una combustione con l'introduzione di azoto o altri gas o vapori non contenenti ossigeno, si può contrastare o impedire lo sviluppo della combustione. In altri casi invece semplicemente modificando le condizioni dell'ambiente, come ad esempio suddividendo meccanicamente un combustibile solido o introducendo nel sistema combustibile un catalizzatore, si può modificare la rapidità della combustione.

La velocità di combustione dipende da molti fattori fra i quali la natura delle sostanze, lo stato di suddivisione delle sostanze, la quantità e la concentrazione delle sostanze, le caratteristiche dell'ambiente che contiene le sostanze, ecc..

La velocità di combustione o della reazione si fa coincidere con la velocità di propagazione della fiamma che nel caso di combustibile solido è la velocità di propagazione della base della fiamma sulla superficie del combustibile, mentre nel caso di un gas è la velocità di propagazione del fronte della fiamma ed ossia della zona di confine tra il gas combusto e quello incombusto.

Si noti che:

- la fiamma è combustibile in fase gassosa;
- il fronte di fiamma è lo stato di separazione tra la miscela combusta e la miscela incombusta;
- la velocità di combustione è la velocità con cui il fronte di fiamma avanza dal punto di ignizione e generalmente è misurata come la quantità di combustibile che brucia nell'unità di tempo ricavabile con le formule sperimentali, valide per incendio di legno già sviluppato, (Kawagoe e Sekine, Thomas)

$$V_p = KA_p H \text{ (Kg/h)}$$

$$V_m = K_1 A_p H \text{ (Kg/min)}$$

K = coefficiente = 330 (kgm^{-5/2} h⁻¹)

K₁ = coefficiente = 5,5 (kgm^{-5/2} h⁻¹)

A_F = area finestre dell'ambiente in mq

H = altezza finestre dell'ambiente in m.

1.3.5. Prodotti della combustione¹

A seguito di una combustione si ottiene calore e trasformazione della materia trattata. I prodotti della combustione sono:

- *energia* - sotto forma di calore, rumore e luce;
- *gas di combustione* - le sostanze combustibili raramente sono formate da composti o miscele di composti puri ma contengono impurezze - a seconda della concentrazione dell'ossigeno può ottenersi ossido di carbonio², anidride carbonica³, anidride solforosa, idrogeno solforato, am-

moniacca, ossidi di azoto, acido cianidrico, aldeide acrilica, cloro, acido cloridrico, fosgene, acido fluoridrico, ecc.;

- *fumi* - particelle solide e liquidi di dimensioni microscopiche e submicroscopiche sospese nell'aria (sono particelle imcombuste di carbonio, catrame e di altre sostanze)⁴;
- *residui della combustione* - ceneri allo stato solido e prodotti di fusione allo stato liquido.

Si ricorda che:

- il volume teorico dei fumi è dato da:

$$V_{\text{tf}} = 1,87 \frac{112 H + 124 U}{\text{vapore}} + 0,75 S + 0,8 N + 3,76 V_{\text{to}} \quad (\text{n mc/kg})$$

- il volume dei fumi completamente secchi è dato da

$$V_{\text{tfs}} = 1,87 C + 0,75 S + 0,8 N + 3,76 V_{\text{to}} \quad (\text{n mc/kg})$$

- il volume effettivo dei fumi è dato da:

$$V_{\text{ef}} = V_{\text{tf}} + V_{\text{ta}}(E-1) \quad (\text{n mc/kg})$$

ove:

C = carbonio; S = zolfo; N = azoto; U = umidità;
 V_{to} = volume teorico ossigeno; E = coefficiente già definito in precedenza; V_{ta} = volume teorico aria.

Nel caso si disponga dei poteri calorifici delle sostanze si può calcolare approssimativamente il volume teorico dei fumi come segue:

$$V_{\text{tf}} = 0,89 \cdot 10^{-3} P_{\text{ci}} + 1,65 \quad (\text{m}^3 \text{ n/kg}) \quad (\text{combustibili solidi})$$

$$V_{\text{tf}} = 1,11 \cdot 10^{-3} P_{\text{ci}} \quad (\text{m}^3 \text{ n/kg}) \quad (\text{combustibili liquidi})$$

$$V_{\text{tf}} = 0,725 \cdot 10^{-3} P_{\text{ci}} + 1 \quad (\text{m}^3 \text{ n/m}^3\text{n}) \quad (\text{combustibili gassosi, gas poveri})$$

$$V_{\text{tf}} = 1,14 \cdot 10^{-3} P_{\text{ci}} + 0,25 \quad (\text{m}^3 \text{ n/m}^3) \quad (\text{combustibili gassosi, gas ricchi}).$$

Potere calorifico inferiore di alcuni combustibili

(a pressione costante)

Idrogeno	Kcal/Kg	34.300	Torba	Kcal/kg	3.460
Carbonio	"	7.860	Lignite	"	4.870
Metano	"	13.340	Litantrace da gas	"	7.170
Etano	"	10.659	Antracite	"	8.100
Cicloesano	"	10.438	Carbone di legna	"	7.910
Benzolo	"	9.545	Coke	"	7.280
Alcole etilico	"	6.376	Semicoke	"	7.310
Legno	"	3.420	Petrolio	"	8.950
Idrogeno	Kcal/m ³	2.611	Acetilene	Kcal/m ³	13.554
Ossido di carbonio	"	3.037	Benzolo (vapore)	"	34.631
Metano	"	8.500	Gas domestico	"	3.000 ÷ 4.500
Etano	"	15.576	Gas d'acqua	"	2.500
Propano	"	21.837			

Si noti che:

$$1 \text{ MJ} = 238,9 \text{ Kcal} \quad 1 \text{ Kcal} = \frac{1 \text{ MJ}}{238,9} \quad 1 \text{ Kcal/h} = 1,163 \text{ Watt} \quad 1 \text{ Watt} = 859,84 \text{ cal/h.}$$

Temperatura di combustione di alcuni combustibili

Valori teorici per una completa combustione¹

Idrogeno	2.205°C	Acetilene	2.635°C
Carbone amorfo ²	2.040°C	Benzolo (vapore)	2.200°C
Ossido di carbonio	2.430°C	Carbon fossile	1.980°C
Metano	2.050°C	Petrolio	1.800°C
Eptano	2.085°C		

Valori corretti per una combustione a pressione costante dell'idrogeno e dell'ossido di carbonio tenendo conto del grado di dissociazione del vapore d'acqua e dell'anidride carbonica (secondo Pier e Bjerrum)

Idrogeno	2.145°C	invece di 2.205°C
Ossido di carbonio	2.095°C	invece di 2.430°C

Confronto fra la temperatura di combustione calcolata ed il valore sperimentale (misurato direttamente)

Metano: calcolato³ 2.050°C; misurato 1.875°C.

¹ Secondo Bertelmann e Schuster

² Secondo Le Chatelier

³ Secondo Pier e Bjerrum

Grado centigrado: temperatura Celsius, centesimale o centigrada con 0 al punto di fusione del ghiaccio e 100 al punto di ebollizione dell'acqua.

⁴ Il fumo riduce di molto la visibilità nell'ambiente in cui si forma e prolunga il tempo di permanenza della persona in quel-

l'ambiente pericoloso (difficoltà allo sfollamento di persone dell'ambiente interessato dal fumo).

1.4. COMPORTAMENTO DEI COMBUSTIBILI SOLIDI, LIQUIDI E GASSOSI

1.4.1. Combustibili solidi

La combustione dei combustibili avviene per stadi. I combustibili solidi a certa temperatura emettono sostanze volatili infiammabili (processo di distillazione detto *pirolisi*) che a contatto con l'aria (esistendo la temperatura di accensione) bruciano con fiamma. Una parte del calore prodotto riscalda la massa adiacente del combustibile con emissione di ulteriori sostanze volatili infiammabili (altra *pirolisi*) che alimenteranno e manterranno la fiamma. La combustione continua in questo modo fino all'esaurirsi di tutti i vapori infiammabili per poi proseguire, sotto forma di brace.

La combustione dei solidi è influenzata dalla loro natura, dalla pezzatura e dall'umidità contenuta.

Si consideri un pezzo di legno di grandi dimensioni. Un fiammifero, nonostante la fiamma raggiunga 1000°C, non riesce ad accenderlo, per via dello scarso contatto che la grande massa che deve essere portata alla temperatura di ignizione ha con l'ossigeno dell'aria. Se il legno viene ridotto in piccole masse vi è maggior contatto tra le parti del legno con l'aria e quindi è più facile che avvenga l'accensione con il fiammifero. Se ancora si riduce la dimensione del legno (trucioli) si ha abbastanza contatto tra questo e l'ossigeno dell'aria e certamente con il calore prodotto dal fiammifero si ha il fuoco. Se si continua a ridurre la dimensione della pezzatura del legno fino ad arrivare alla polvere è sufficiente una scintilla perché avvenga una combustione pericolosa. Non va quindi confusa la temperatura di combustione e la temperatura di ignizione o di accensione.

Temperature di accensione minime di alcune sostanze in aria
A temperatura e pressione ambiente ordinarie

Antracene	540°C
Asfalto	485
Canfora	460
Carta e cellulosa	230
Celluloide (film)	137
Cotone idrofilo	265
Cotone (stoffe)	238
Fenolo	605
Fosforo giallo	280
Fosforo rosso (in aria)	260
Glicerina	400
Gomma sintetica	300
Lana (stoffe)	205
Legno secco	215 ÷ 270
Magnesio	540 ÷ 620
Naftalina	632
Nylon	475
Paraffina	245
Seta naturale (stoffa)	570
Sodio (in aria secca)	115
Titanio (in polvere)	250
Zolfo	232

Per quasi tutti i solidi, in genere, la temperatura di accensione può subire notevoli escursioni al variare della pezzatura del materiale e dal tempo di cimento termico.

La temperatura di combustione è la massima temperatura che si può raggiungere nella combustione del materiale quando sia evitata ogni perdita di calore. La temperatura di ignizione o di accensione è la temperatura minima alla quale deve essere portata una sostanza combustibile perché la sua combustione si inneschi e da quel momento in poi possa mantenersi da se stessa, senza ulteriori apporti di calore. La temperatura di ignizione o di accensione si chiama anche «temperatura di autoignizione» per ricordare appunto la circostanza che quando una sostanza combustibile è portata in aria alla sua temperatura di ignizione, comincia a bruciare e la sua combustione procede soltanto con l'apporto del calore da essa stessa prodotto.

Si noti che incombustibili solidi sono le sostanze che non bruciano e che i combustibili solidi vengono distinti in:

- *difficilmente combustibili* (le sostanze che prendono fuoco a contatto con la sorgente d'ignizione e che non sono capaci di continuare a bruciare appena si allontana la sorgente d'ignizione);
- *combustibili* (le sostanze che prendono fuoco a contatto con la sorgente d'ignizione e che sono capaci di continuare a bruciare da soli);
- *facilmente accendibili* (le sostanze che iniziano a bruciare rapidamente per effetto di una sorgente d'ignizione debole quale la scintilla, il fiammifero, il corto circuito di un impianto elettrico, ecc.);
- *difficilmente accendibili* (le sostanze che prendono fuoco per effetto di una elevata sorgente d'ignizione).

1.4.2. Combustibili liquidi

I combustibili liquidi non bruciano come tali ma come vapori, originati al di sopra della superficie del liquido, che si comportano come i gas combustibili. Al raggiungimento di una certa temperatura (temperatura di *infiammabilità*, diversa per ciascuna sostanza) la superficie del liquido emette vapori in quantità tali che, mescolati con l'aria, danno luogo ad una combustione in presenza di innesco. Il calore sviluppato provoca l'evaporazione di ulteriore liquido che, combinandosi con l'ossigeno dell'aria, mantiene la combustione (fig. 3). Poiché più bassa è la temperatura di infiammabilità di un liquido più grave è il pericolo d'incendio, in tutte le legislazioni di sicurezza contro gli incendi, gli stessi liquidi sono divisi in più classi, ognuna delle quali è definita da una temperatura o *punto di infiammabilità*.

Per temperatura o punto di infiammabilità di un combustibile liquido si intende la più bassa temperatura alla quale il liquido emette immediatamente, sopra la sua superficie libera, vapori che mescolati all'aria possono dare, con questa, miscele infiammabili mediante una fiamma esterna.

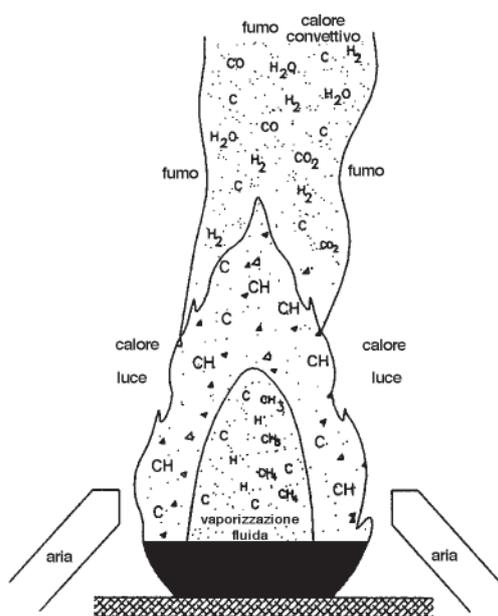


Fig. 3 - Schematizzazione della fiamma

Categoria «A» - Liquidi i cui vapori possono dar luogo ad esplosioni. Liquidi aventi un punto di infiammabilità inferiore a 21°C (petroli greggi, etere di petrolio, benzine, ecc.).

Categoria «B» - Liquidi infiammabili. Liquidi aventi un punto di infiammabilità compreso fra 21°C e

65°C (petrolio raffinato, acqua regia minerale, alcool etilico, metilico, ecc.).

Categoria «C» - Liquidi combustibili. Liquidi aventi punto di infiammabilità compreso fra 65°C e 125°C (oli minerali, lubrificanti, nafta Mazut, gasoil, nafta per diesel, ecc.).

Si noti che per i liquidi infiammabili esiste un campo di infiammabilità al di fuori del quale la combustione non avviene. Il campo di infiammabilità è compreso fra due limiti di infiammabilità, il limite superiore (limite al di sopra del quale l'aria è insufficiente per innescare e mantenere la combustione) ed il limite inferiore (limite al di sotto del quale i vapori prodotti dal liquido sono insufficienti ad innescare e mantenere la combustione).

Si noti che fra i combustibili liquidi fanno eccezione alcuni oli vegetali che, a contatto con l'aria, possono ossidarsi direttamente in fase liquida emettendo calore.

1.4.3. Combustibili gassosi

Il comportamento dei combustibili gassosi nella combustione è analogo a quello dei vapori dei liquidi infiammabili, tenendo presente però che il sistema gassoso (combustibile-comburente) può essere (fig. 4):

Campo di infiammabilità di alcuni vapori di liquidi con aria

Nome	Peso specifico (acqua = 1)	Densità vapori (aria = 1)	Punto infiammabilità °C	Temperatura di ebollizione °C	Temperatura di accensione °C	Limiti infiammabilità in aria % in volume	
						inferiore	superiore
Acetone	0,79	2,00	-18	56	538	2,5	12,8
Acido acetico	1,1	2,1	39	118	463	4,0	19,9
Acido ciantrico	0,7	0,9	-18	25*	538	5,6	41,0
Alcool etilico	0,8	1,6	13	78	363	3,3	19,0
Anilina	1,0	3,2	70	184	615	1,3	11,0
Benzolo	0,9	2,8	-12	80	498	1,3	7,1
Bromuro di etile	1,4	3,8	=	38	511	6,8	80,0
Cicloesano	0,8	2,9	-20	82	245	1,3	8,0
Comune	0,9	4,1	36	152	424	0,9	6,5
Dicloroetano	1,3	3,4	13	84	413	6,2	16,0
Dicloro etilene	1,3	3,4	6	61	460	9,7	12,8
Diethylamina	0,7	2,5	-23	57	312	1,8	10,1
Eptano	0,7	3,5	-4	98	204	1,0	6,7
Esano	0,7	3,0	-22	69	223	1,1	7,5
Etere etilico	0,7	2,6	-45	35	160	1,9	36,0
Etilamina	0,8	1,6	-18	17*	385	3,5	14,0
Etilmercaptano	0,8	2,1	-18	35	300	2,8	18,0
Idrazina	1,0	1,1	38	113	270	2,9	98,0
Isopentano	0,6	=	-51	28*	420	1,4	7,6
Metiletilchetone	0,8	2,5	-9	80	404	1,7	11,4
Metililcianato	1,0	1,9	-7	39	534	5,3	26,0
Metilmercaptano	0,9	1,7	-18	60	=	3,9	21,8
Nitrobenzolo	1,2	4,3	88	211	482	1,8	=
Ossido di etilene	0,9	1,5	-18	11*	429	3,0	100
Ottano n	0,7	3,9	12	126	206	0,8	6,5
Pentano n	0,6	2,5	-40	36	260	1,3	7,8
Sofuro di carbonio	1,3	2,6	-30	46	90	1,0	60,0
Stirolo	0,9	3,6	32	145	490	1,1	6,1
Toluolo	0,9	3,2	4	111	480	1,2	7,1
Tricloroetilene	1,5	4,5	32	87	410	7,9	90,0
Trementina	0,8	4,8	35	160	240	0,8	=
Xilolo	0,9	3,7	30	140	463	1,0	6,4

Alcuni composti indicati con (*) possono essere considerati anche come gas in quanto hanno bassa temperatura di ebollizione (quasi ambiente).

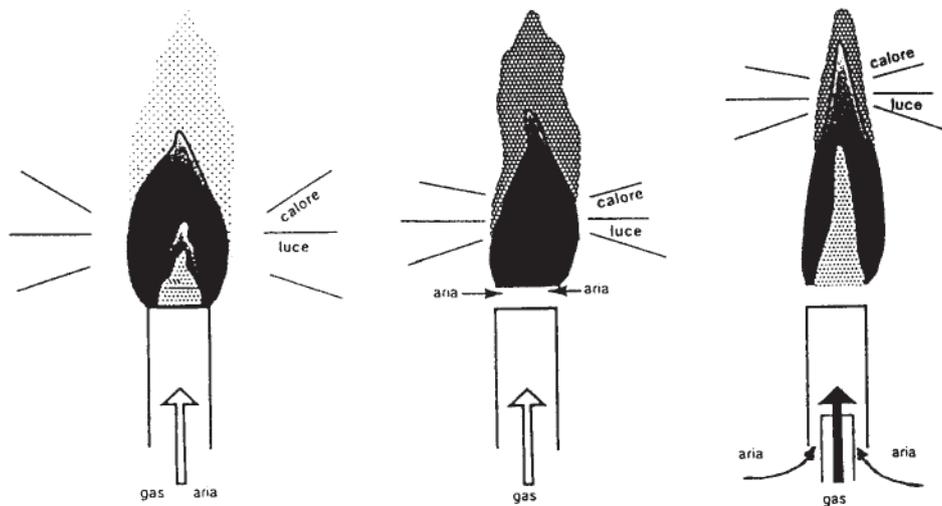


Fig. 4 - Combustione omogenea - miscela gas e aria

Campo di infiammabilità di alcuni vapori di liquidi con aria

	Peso specifico liquido (acqua = 1)	Densità vapori (aria = 1)	Temperatura infiamm. °C	Temperatura ebollizione °C	Temperatura accensione °C	Limiti di infiammabilità % in volume		Limiti di infiamm. gr/mc	Potere calorifico inferiore Kcal/Kg
						inferiore	superiore		
Benzine Cx Hz	0,63	2,77	-40	30/75	245	1,2	7,5	45/268	10.100 ÷ 10.600
	0,66	3,11	-30	40/75	245	1,2	7,0	50/281	
	0,69	3,28	-24	50/90	280	1,2	6,0	51/255	
	0,72	3,63	-10	80/110	280	1,1	5,0	52/235	
	0,74	3,98	-5	100/115	280	1,0	4,5	51/231	
	0,75	4,15	5	100/140	280	0,9	4,0	48/215	
Benzina C8 H17									10.500
Benzolo C6 H6									9.585
Isottano C8 H18									10.680
Diesel Oil C12 H26									10.100
Benzina Avio (100/130)	0,72	-	-43	60/115	440	1,3	7,1	-	10.564
Benzina Avio JP4	0,78	-	-18	99/199	229	1,3	8,0	-	10.403
Benzina Avio JP1	0,81	-	-46	177/210	227	-	-	-	10.275
Benzina Avio JP5	0,83	-	66	193/238	224	0,6	45	-	10.253
Kerosene Avio	0,80	-	52	193/254	249	0,7	4,8	-	10.342
Gasoli	0,82/0,86		55	155	220	0,6	6,5	-	10.000
Keroseni	0,80/1,00	4,50	38/74	175/235	259	1,1	6,0	-	9.500
Nafta (etere di petrolio)	0,63/0,66	2,50	-18	40/80	288	1,1	5,9	-	10.200
Nafta (da catrame)	0,86/0,89		37	149/216	480/510	-	-	-	9.000

- *chimicamente uniforme*, caso in cui il combustibile ed il comburente sono miscelati prima dell'ignizione (per esempio becco Bunsen, cannello da saldatura o taglio, bruciatori per gas di città);
- *chimicamente non uniforme*, caso in cui l'ignizione e la combustione avvengono simultaneamente al mescolamento del gas e del comburente.

Anche per i combustibili gassosi vale quanto già detto per i liquidi infiammabili relativamente ai limiti di infiammabilità.

Infatti per questi sistemi, oltre alla presenza del materiale combustibile, alla presenza del comburente e alla presenza di un punto d'ignizione a tem-

peratura uguale o superiore a quella di ignizione del materiale combustibile, deve sussistere una quarta e fondamentale condizione e cioè che la proporzione relativa del combustibile gassoso rispetto a quella del comburente gassoso (ossigeno o aria) deve essere compresa entro due limiti determinati. Questi limiti si riferiscono a percentuali in volumi del gas combustibile rispetto alla sua miscela con aria; infatti il limite inferiore ed il superiore di infiammabilità, rispettivamente, corrispondono alla più bassa e alta concentrazione in volume del gas combustibile della miscela al di sotto o al di sopra della quale non è possibile che l'ignizione iniziata in un punto di essa possa propagarsi a tutta la miscela presente.

Campo di infiammabilità di alcuni gas

Nome	Peso specifico (aria = 1)	Temperatura minima accensione in aria °C	Limiti di infiammabilità in aria % in volume	
			inferiore	superiore
Acetilene (Etino)	0,91	304	2,5	80 (100)
Acido solfidrico	1,20	260	4,0	44,0
Ammoniaca Anidra	0,60	651	15,0	28,0
Butadiene	1,90	420	2,0	12,0
Butano	2,07	287	1,7	8,5
Butilene	1,90	385	1,6	10,0
Ciclopropano	1,50	498	2,4	10,4
Cloroetilene	2,20	472	3,6	33,0
Cloruro di metile	1,78	632	8,1	17,4
Dimetilammina	1,60	400	2,8	14,4
Dimetiletere	1,63	350	3,4	27,0
Etano	1,05	472	3,0	12,5
Etilene	0,97	449	2,7	36,0
Idrogeno	0,13	400	4,0	75,0
Isobutano	2,00	460	1,8	8,4
Metano	0,56	537	5,0	15,0
Metilamina	1,10	430	4,9	20,7
Ossido di carbonio	0,96	609	12,5	74,0
Propano	1,60	432	2,1	9,5
Propilene	1,50	455	2,0	11,1

Caratteristiche di alcuni gas industriali e domestici per produzione calore

	% CO ₂	% O ₂	% CO	% H ₂	% CH ₄	% C ₂ H ₆	% C ₃ H ₈ C ₄ H ₁₀	% N ₂	Peso specifico (aria = 1)	Limiti di infiammabilità		Temperatura di accensione	Potere calorifico Kcal/mc	
										inf.	sup.		inf.	sup.
GAS naturale	0,2	-	-	-	99,2	-	-	0,6	0,56	3,8	17,0	480	8.960	8.163
GAS da olio di raffineria	-	0,2	1,2	6,1	4,4	72,5	15,0	0,6	1,00	6,00	13,5	330	14.685	13.560
GAS di carbone (illuminate)	17,0	0,5	6,9	49,7	29,9	-	3,1	8,2	0,41	5,0	31,0	560	5.300	4.289
GAS di gasogeno o di generatore	8,0	0,1	23,2	17,7	1,0	-	-	50,0	0,90	17,0	80,0	600	1.271	1.189
GAS d'acqua carburato	3,6	0,4	21,9	49,6	10,9	2,5	6,1	5,0	0,54	6,0	72,0	550	4.770	4.102
GAS d'altoforno	-	-	-	-	-	-	-	-	1,00	30,0	75,0	600	-	-
GAS di cockeria	-	-	-	-	-	-	-	-	-	4,4	34,0	560	-	-
GAS di petrolio	-	-	-	-	-	-	-	-	-	4,8	32,5	-	10.281	9.283
METANO biologico	30,0	-	-	-	66,0	-	-	4,0	0,86	-	-	-	5.863	4.375
PROPANO commerciale	-	-	-	-	-	2,1	97,3	0,6	1,55	2,1	9,5	460	22.790	20.780

Spesso il limite di infiammabilità di miscele di gas o vapori combustibili con l'aria vengono confusi con i limiti di esplosività. Si fa rilevare che i limiti di infiammabilità sono quelli che delimitano la composizione di una miscela nella quale la fiamma si può propagare nella miscela stessa senza produrre una pressione apprezzabile sulle pareti del recipiente che la contiene, mentre i limiti di esplosività si possono considerare quelli che delimitano la composizione di quelle miscele nelle quali la fiamma si propaga attraverso l'intero volume della miscela stessa sviluppando una pressione notevole sulle pareti del recipiente che la contiene.

I gas e i vapori di liquidi infiammabili vengono classificati in:

- *pesanti* - la cui densità è maggiore dell'aria (g.p.l., benzine, ecc.);
- *medi* - la cui densità è pressoché uguale a quella dell'aria (etilene, ossido di carbonio, acetilene, ecc.);
- *leggeri* - la cui densità è minore di quella dell'aria (metano, idrogeno, ecc.).

1.5. AUTOCOMBUSTIONE - COMBUSTIONI LENTE (OSSIDAZIONI) E COMBUSTIONI VIVE

Si ha l'autocombustione o *combustione spontanea* quando una sostanza combustibile, senza l'intervento di uno specifico innesco esterno, si ossida naturalmente con progressivo incremento della velocità di reazione fino a degenerare in vera e propria combustione. Il processo può instaurarsi in tempi più o meno lunghi ed essere attivato da diversi fattori:

- *reazione chimica diretta di ossidazione all'aria* - a) ad azione rapida e talora istantanea (solfuri, fosforo, trucioli, polveri metalliche, magnesio, prodotti fotosensibili, ecc.); b) ad azione lenta (carbone, olii, fertilizzanti, stracci unti, ecc.);
- *iniziale azione di microorganismi* - fenomeno di fermentazione - (erba, fieno, farine, fertilizzanti, mangimi, semi, carta da macero, olii vegetali ed animali, ecc.);
- *reazione con l'acqua* o con l'umidità atmosferica (calde, sodio, potassio, ecc.);

- *decomposizione chimica* (nitrocellulose, perossidi, acetilene, ecc.);
- *azione dell'ossigeno puro* (grassi, olii, carbone, stracci unti, vernici, ecc.);
- *presenza di ossidanti diversi dall'ossigeno o di catalizzatori* (fluoro, ecc.).

Il fenomeno di autocombustione trae quindi origine da un processo chimico naturale che è l'ossidazione spontanea. Infatti, quando un materiale combustibile è esposto all'aria, si ossida (si ha una reazione con produzione di calore) e dà luogo ad una combustione lenta. Se il calore prodotto non viene disperso, il combustibile continua ad ossidarsi ed a riscaldarsi fino ad arrivare alla temperatura di ignizione e quindi ad aversi la trasformazione di combustione lenta in combustione viva (cioè autocombustione).



In particolare, nel processo attivato dall'azione di microorganismi, i fenomeni biochimici, quali l'azione di batteri aerobi o enzimi (attivazione dei processi di fermentazione e/o putrefazione) con sviluppo di prodotti gassosi (tra cui il metano) e con l'innalzamento di temperatura, possono sfociare in vera e propria combustione a bassa temperatura.

L'ossidazione lenta e l'azione di microorganismi si verificano quasi esclusivamente quando le sostanze vengono immagazzinate a mucchio ovvero a «cumuli». Infatti, se durante l'ossidazione il calore prodotto non riesce a disperdersi all'esterno, esso si «accumula» nella massa della sostanza e la temperatura nell'interno in cui avviene il processo aumenta sempre più. L'aumento di temperatura accelera ulteriormente la velocità della reazione in corso con ulteriore sviluppo ed accumulo di calore finché può verificarsi che una parte della massa raggiunge la temperatura di accensione. La sequenza è in genere molto lenta, può durare ore talvolta giorni se non addirittura settimane (caso del fieno) prima che la combustione dia luogo a sviluppo di fumo e di fiamme.

Si può prevenire il processo di autocombustione controllando periodicamente in diversi punti la temperatura all'interno della massa. Fino a quando vi è l'equilibrio fra il calore prodotto nella massa ed il calore ceduto dalla stessa massa all'ambiente non vi è riscaldamento, ma se il calore prodotto non viene dissipato da una sufficiente ventilazione (si rompe l'equilibrio) la temperatura della sostanza

può raggiungere valori tali da dare luogo all'incendio. Quando si accerta che il processo è in atto (rottura dell'equilibrio) occorre rimuovere la massa spargendola all'aria aperta cercando così di abbassare la temperatura.

Affinché l'autocombustione si verifichi occorre la coesistenza di molti fattori favorevoli quali, tra gli altri:

- entità del cumulo;
- stato di finissima suddivisione del combustibile ovvero particolare geometria della superficie esterna che rende il contatto tra combustibile e comburente eccezionalmente elevato;
- presenza di acqua o di umidità quando il fenomeno si innesca per trasformazione batterica;
- presenza di sufficiente quantità d'aria all'interno della massa;
- scarsa ventilazione;
- temperatura ambientale senza notevoli escursioni (non vi è dubbio che una temperatura ambiente elevata è condizione maggiormente predisponente per lo sviluppo dei processi di autocombustione).

Salvo che la conoscenza di elementi obiettivi e certi non escludono l'autocombustione, quando questa si verifica è molto improbabile che ad incendio consumato si riesca a risalire alle cause di ignizione.

Spesso si attribuiscono gli incendi dei boschi all'autocombustione. Questa causa è da escludere in quanto i materiali presenti nel bosco non sono fra quelli soggetti ad autocombustione e non si trovano ammassati oppure a «cumuli» e non si trovano nelle condizioni affinché si verifichi il fenomeno.

Si elencano alcune sostanze soggette a combustione.

Materiali ad alto rischio	Materiali a rischio moderato
Carbone di legna	Cacao in chicchi
Colori a olio	Carbone bituminoso
Erba medica	Carta da macero umida
Farina di pesce	Cuoi, cascami unti
Olio di fegato di merluzzo	Feltri e carboni bitumati o catrami
Olio di lino	Fertilizzanti organici e inorganici misti
Olio di pesce	Sintetici contenenti nitrati e materiale organico
Stracci o tessuti di seta, cotone, iuta, canapa, lino imbevuti di colori a olio	Fieno
	Olio di balena
	Olio di legna
	Olio di mais
	Olio di oliva
	Olio di semi di cotone
	Olio di soia
	Piriti di ferro
	Stracci di lana unti
	Vernici raschiate
Materiali a basso rischio	
Acqua ragia vegetale	
Olio di arachidi	
Olio di palma	
Olio di ricino	
Semi di cotone	