



SISTEMI DI GESTIONE DELLA SICUREZZA E DELL'IGIENE
NEGLI AMBIENTI DI LAVORO

MODULO 1 · LEZIONE 1

Il fuoco non perdona

Fondamenti della prevenzione incendi · combustione e dinamica dell'incendio

Durata 3 ore · 13 macroargomenti · 8 casi di studio reali

Prof. Claudio Pantanali, PhD

cpantanali@units.it · Università degli Studi di Trieste · Dipartimento di Ingegneria e Architettura · A.A. 2025/2026

Indice della lezione

Due parti, 13 macroargomenti, casi reali e ponti verso le lezioni successive

PARTE I · INQUADRAMENTO E FONDAMENTI

- 1. Perché parliamo di fuoco · le cifre
- 2. Definizioni e terminologia tecnica
- 3. La combustione: chimica e fisica
- 4. Triangolo e tetraedro del fuoco
- 5. Proprietà termiche dei combustibili
- 6. Le classi di incendio (UNI EN 2)

PARTE II · DINAMICA E PROGETTAZIONE

- 7. Le 4 fasi dell'incendio confinato
- 8. Velocità di crescita: curve t^2
- 9. Curve d'incendio: nominali e parametriche
- 10. Limiti di infiammabilità (LFL/UFL)
- 11. Metodi di spegnimento
- 12. Casi storici · 13. Riepilogo e ponti

OBIETTIVI FORMATIVI

Descrivere la combustione · classificare un incendio e scegliere l'estinguente idoneo · riconoscere le fasi e interpretare le curve T-t · collegare i fondamenti alla progettazione (Lezioni 2-6)

1. Perché parliamo di fuoco

Il peso reale del fenomeno nella vita di un Paese



~250.000

interventi VVF/anno in Italia

~300

decessi annui per incendi

≈ 70%

vittime per FUMI e GAS, non fiamme

8-10 min

tempo medio prima del flashover

DA QUI DERIVANO

compartimentazione (S.3) · esodo (S.4) · controllo fumi (S.8) · rivelazione precoce (S.7)

Una verità che la cronaca dimentica

La progettazione moderna nasce da un dato statistico chiarissimo

CIRCA

70%

*delle vittime negli incendi muore per inalazione di
fumi e gas tossici,
non per le fiamme.*

CO · HCN · HCl · particolato

La priorità non è solo «spegnere»

è impedire che fumi e gas tossici raggiungano gli occupanti prima che possano evacuare.

S.3 · Compartimentazione

Contenere fumi e calore al locale di origine

S.4 · Esodo

Garantire vie d'esodo tenibili fino al luogo sicuro

S.7 · Rivelazione

Allarme precoce, prima che le condizioni degradino

S.8 · Controllo fumi

Evacuatori, sovrappressione, smoke management

La storia ci ha insegnato

Un secolo di catastrofi che hanno cambiato la normativa

ANNO	EVENTO	BILANCIO	LEZIONE APPRESA
1967	Innovation, Bruxelles	323 morti	Compartimentazione e materiali ignifughi nei grandi magazzini
1983	Stardust, Dublino	48 morti	Divieto di catene alle uscite di sicurezza · maniglioni antipanico
1996	Eurotunnel	0 morti, 200 M€	Strategia di compartimentazione e ventilazione nelle gallerie
2001	Linate, Milano	118 morti	Procedure ICAO · hangar compartimentati con impianti automatici
2003	Station Nightclub, USA	100 morti	Vietati materiali ad alta produzione di calore sui soffitti pubblici
2009	Viareggio	32 morti	Revisione sicurezza ferroviaria merci pericolose (RID)
2017	Grenfell Tower, Londra	72 morti	Messa al bando rivestimenti combustibili su edifici alti
2021	Torre dei Moro, Milano	0 morti · 80 evacuati	Verifica rivestimenti facciate e controllo conformità

« La prevenzione si scrive, purtroppo, spesso col sangue »

2. Definizioni e terminologia tecnica

Il vocabolario indispensabile per parlare di incendio

Combustione

Reazione chimica esotermica fra combustibile e comburente che produce calore, fiamme e gas.

Incendio

Combustione non controllata nello spazio e nel tempo, in grado di produrre danni a persone, beni, ambiente.

Innesco

Apporto di energia (termica, elettrica, meccanica, chimica) che porta il combustibile alla T di accensione.

Comburente

Specie chimica che alimenta la combustione: tipicamente O₂ dell'aria ($\approx 21\%$ vol).

Pirolisi

Decomposizione termica di un solido in gas combustibili in (quasi) assenza di O₂. Precede l'accensione.

Flashover

Transizione brusca dalla combustione localizzata a quella generalizzata ($T \approx 500\text{--}600\text{ }^{\circ}\text{C}$).

Backdraft

Riaccensione esplosiva quando l'O₂ rientra in un ambiente saturo di gas incombusti.

HRR

Heat Release Rate [kW] · grandezza fondamentale per descrivere la potenza di un incendio.

3. La combustione: chimica e fisica

Una reazione di ossidazione esotermica con tre elementi indispensabili



COMBUSTIONE COMPLETA DEL METANO



$\Delta H \approx -890 \text{ kJ/mol}$ (energia liberata)

Combustione incompleta · in carenza di O_2 si forma CO , gas estremamente tossico e principale responsabile delle vittime negli incendi.

Solidi

bruciano dopo pirolisi · formano braci

Liquidi

bruciano i vapori (flash point)

Gas

bruciano entro il range LFL–UFL

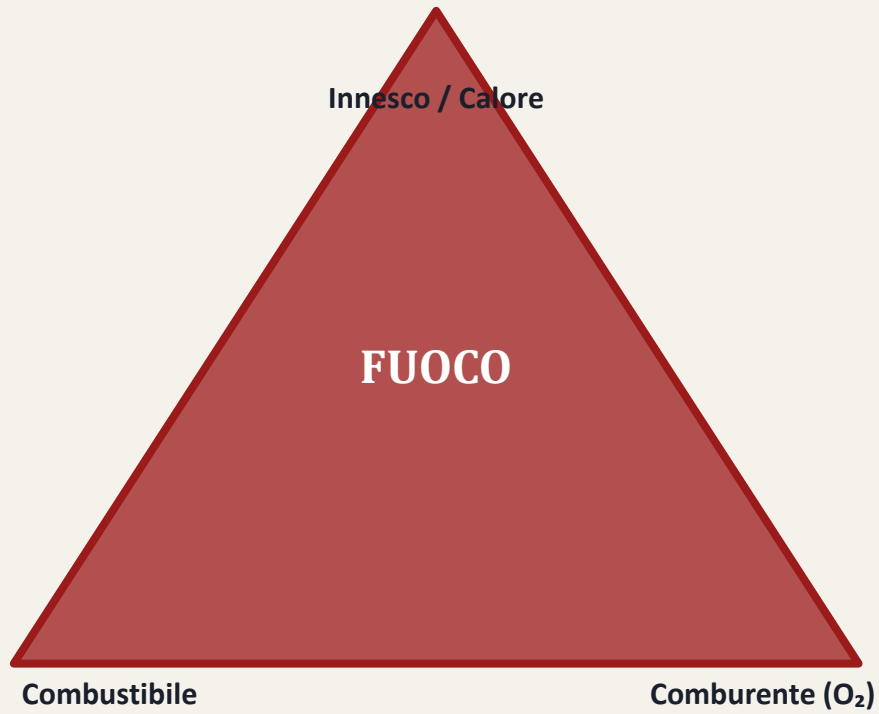
Metalli

Mg, Na, K, Ti, Al · T elevatissime

4. Triangolo e tetraedro del fuoco

Dal modello a 3 elementi al modello completo con la reazione a catena

TRIANGOLO DEL FUOCO



DAL TRIANGOLO AL TETRAEDRO

Il triangolo non basta: la combustione si autoalimenta tramite una reazione a catena, in cui i radicali liberi (H·, OH·, O·) sostengono il processo.

QUARTO LATO

Reazione a catena — radicali liberi H· OH· O·

PRINCIPIO OPERATIVO

La rimozione anche di uno solo dei quattro fattori interrompe l'incendio. Su questo principio si basano tutti i metodi di spegnimento (§11).

5. Proprietà termiche dei combustibili

Le grandezze chiave che governano l'innesco e la propagazione

GRANDEZZA	DEFINIZIONE	VALORI INDICATIVI
T di accensione	T minima per ignizione spontanea in aria	Carta ≈ 230 °C · Legno $\approx 250\text{--}300$ °C · Benzina ≈ 280 °C
Flash point	T minima cui un liquido produce vapori infiammabili	Benzina ≈ -40 °C · Etanolo ≈ 13 °C · Gasolio ≈ 55 °C
PCI (potere calorifico)	Energia liberata da 1 kg di combustibile	Legno 17 · Carta 17 · Polietilene 46 · Metano 50 [MJ/kg]
Velocità di propagazione	Avanzamento del fronte di fiamma	Da pochi cm/s a decine di cm/s
Gocciolamento	Plastiche che fondono e gocciolano	Classi d0 / d1 / d2 (EN 13501-1)
Produzione di fumo	Quantità e densità ottica dei fumi	Classi s1 / s2 / s3 (EN 13501-1)

PUNTO CRITICO

La maggior parte delle vittime muore per inalazione di fumi e gas tossici, non per ustioni. Un compartimento standard di 50 m² può saturarsi di CO letale in meno di 3 minuti dall'ignizione di un divano in poliuretano.

6. Le classi di incendio (UNI EN 2:2005)

Ad ogni classe l'agente estinguente giusto · quello sbagliato è inefficace o pericoloso



A	Solidi che formano braci Legno, carta, tessuti, plastiche	Acqua · schiuma · polvere ABC
B	Liquidi infiammabili Benzina, alcoli, oli, vernici	Schiuma · polvere BC/ABC · CO ₂
C	Gas infiammabili Metano, GPL, idrogeno, acetilene	Polvere BC/ABC · intercettare a monte
D	Metalli combustibili Mg, Na, K, Al, Ti	Polveri speciali D · MAI acqua
F	Oli e grassi da cucina Olio frittura, grassi, margarina	Estinguenti specifici classe F

Classe E (apparecchi elettrici in tensione) NON è classe a sé · disalimentare e usare estinguenti dielettrici (CO₂, polveri)

7. Le 4 fasi dell'incendio confinato

L'esodo deve completarsi PRIMA del flashover



Flashover · T 900–1.100 °C · ambiente incompatibile con la sopravvivenza

01

IGNIZIONE

Pochi secondi-minuti · reazione si avvia · combustione localizzata · massima efficacia estintori e rivelazione precoce

02

CRESCITA

Da minuti a decine · T cresce quadraticamente · strato caldo al soffitto · possibili backdraft e rollover

03

INCENDIO SVILUPPATO

Flashover: tutti i materiali si infiammano · T = 900–1.100 °C · ambiente incompatibile con la sopravvivenza

04

DECADIMENTO

Esaurimento del combustibile o estinzione · possibili collassi strutturali differiti

Approfondimento · Backdraft e rollover

Due fenomeni che hanno ucciso molti vigili del fuoco

BACKDRAFT

Si verifica quando un incendio in ambiente chiuso esaurisce l'O₂ ed è in combustione incompleta: i gas di pirolisi si accumulano in alta concentrazione, senza fiamma per mancanza di comburente. All'apertura (porta forzata) l'aria fresca si miscela rapidamente ai gas combusti incombusti → miscela esplosiva, onda d'urto e getto di fiamma violentissimo.

SEGNALI PREMONITORI

- Fumo denso e nero che esce a impulsi da fessure
- Vetri ingialliti dal calore
- Suono caratteristico simile a respiro («breathing»)
- Assenza visibile di fiamma all'esterno

ROLLOVER

Propagazione della fiamma nello strato di fumo stratificato in alto: i gas di pirolisi accumulati al soffitto raggiungono la T di accensione e si infiammano sopra le teste degli occupanti. È il preludio del flashover, lo precede di pochi secondi (T > 600 °C nello strato di fumo).

DIFESA

- Restare bassi per uscire — l'aria respirabile è solo a terra
- Evitare aperture verticali che creano correnti
- Sistemi di evacuazione fumo (S.8) per impedire l'accumulo

Station Nightclub (USA, 2003 · 100 vittime) — il rollover si propagò lungo il soffitto fonoassorbente in 90 secondi; il flashover seguì.

Approfondimento · I prodotti della combustione

La vera minaccia per la vita umana: la miscela gassosa, non la fiamma

SOSTANZA	ORIGINE TIPICA	EFFETTO FISIOLOGICO	SOGLIA CRITICA
CO	Combustione incompleta materiali carboniosi	Si lega all'emoglobina ($\times 240$ vs O_2) $\rightarrow$ ipossia	1.500 ppm letale in 1 h · 12.800 ppm in minuti
HCN	Poliuretani, nylon, lana, seta, materiali azotati	Inibisce la respirazione cellulare · effetti rapidi	100 ppm letale in 30–60 min · 300 ppm in minuti
HCl	PVC e materiali clorurati (cavi, rivestimenti)	Irritante vie respiratorie · edema polmonare	100 ppm pericoloso · 1.000 ppm letale
Fumo nero	Combustione incompleta idrocarburi e plastiche	Riduce visibilità a pochi cm · perdita di orientamento	< 2 m visibilità = incapacitante
Calore radiante	Tutti gli incendi	Ustioni cutanee e vie aeree · ipertermia	2,5 kW/m ² tollerabile · 10 kW/m ² danni 5–10 s

LEZIONE OPERATIVA

Le vie d'esodo devono garantire tenibilità: visibilità > 10 m · CO < 1.500 ppm · irraggiamento < 2,5 kW/m² · T aria < 60 °C · per tutto il tempo di evacuazione.

Esempio numerico · HRR di un divano in poliuretano

La «casa moderna» è un deposito di combustibile che dorme



DATI DI PARTENZA

Divano 80 kg in schiuma PU (PCI ≈ 25 MJ/kg) · ultra-rapida · $t\alpha = 75$ s · $\alpha = 0,1876$ kW/s²

HRR a istanti significativi · $q = \alpha \cdot t^2$

30 s ≈ 169 kW

60 s ≈ 675 kW

120 s ≈ 2.700 kW

180 s ≈ 6.080 kW

1 MW

≈ 73 s

dall'ignizione

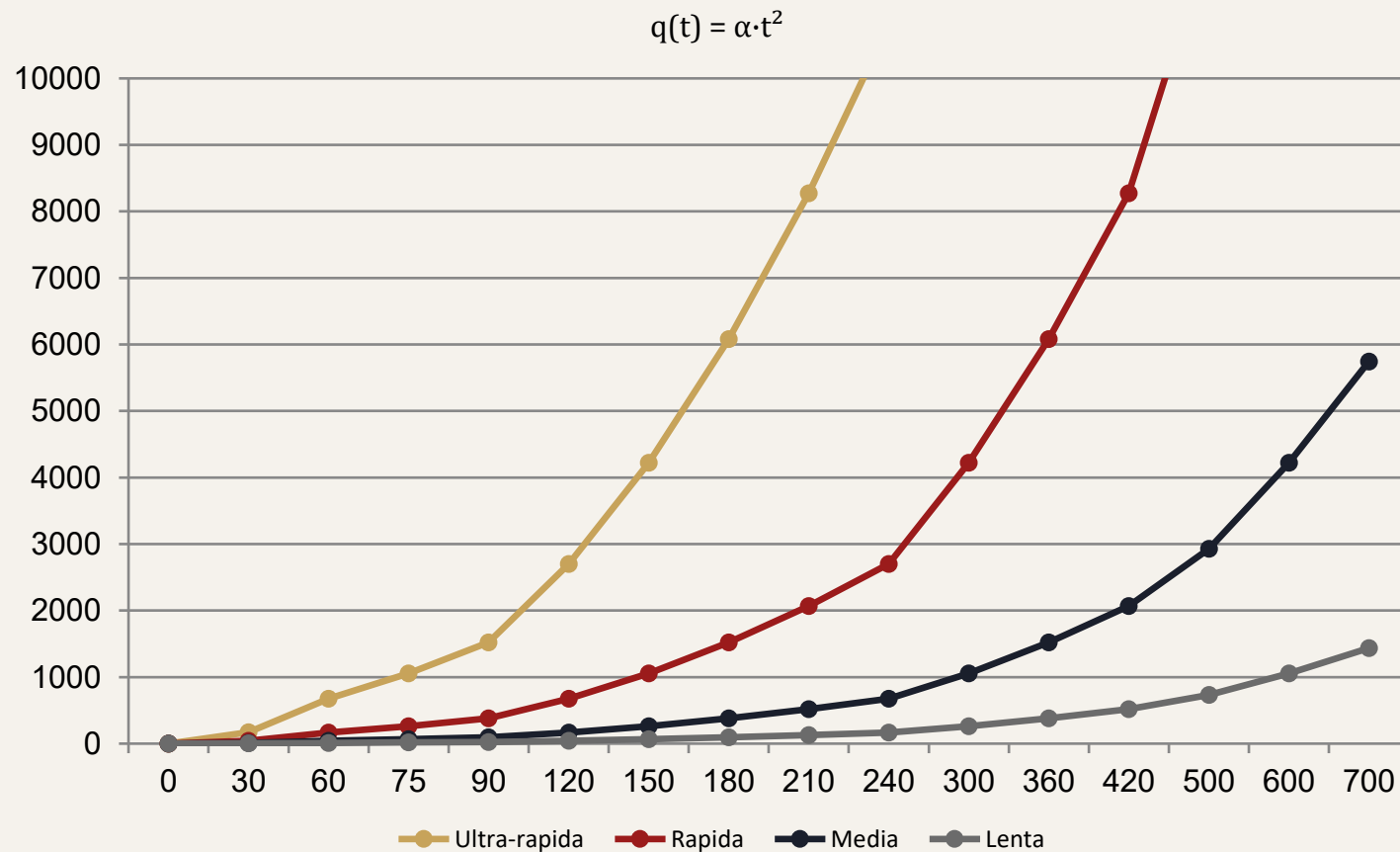
FLASHOVER ≈ 2 MW

≈ 103 s

meno di 2 minuti!

8. La velocità di crescita: curve t^2

$HRR \approx \alpha \cdot t^2$ · quattro categorie standard per tempo al raggiungimento di 1 MW



CATEGORIE STANDARD

Lenta

t_{α} 600 s

Legno massello, archivi cartacei

Media

t_{α} 300 s

Mobilio, scaffalature, libri

Rapida

t_{α} 150 s

Cartone, tessuti, materassi

Ultra-rapida

t_{α} 75 s

Liquidi infiammabili, schiume PU

ASET vs RSET · il vincolo dell'esodo sicuro

La progettazione antincendio è una corsa contro il tempo



ASET

Available Safe Egress Time

Tempo «disponibile»: dall'ignizione al momento in cui le condizioni ambientali diventano incapacitanti.

RSET

Required Safe Egress Time

Tempo «richiesto»: $t_{det} + t_a + t_{pre} + t_{tra}$ — fino al luogo sicuro.

CONDIZIONE DI SICUREZZA

ASET > RSET · margine consigliato: $ASET \geq 1,2 \times RSET$

t1

Rivelazione

t2

Allarme

t3

Pre-movimento

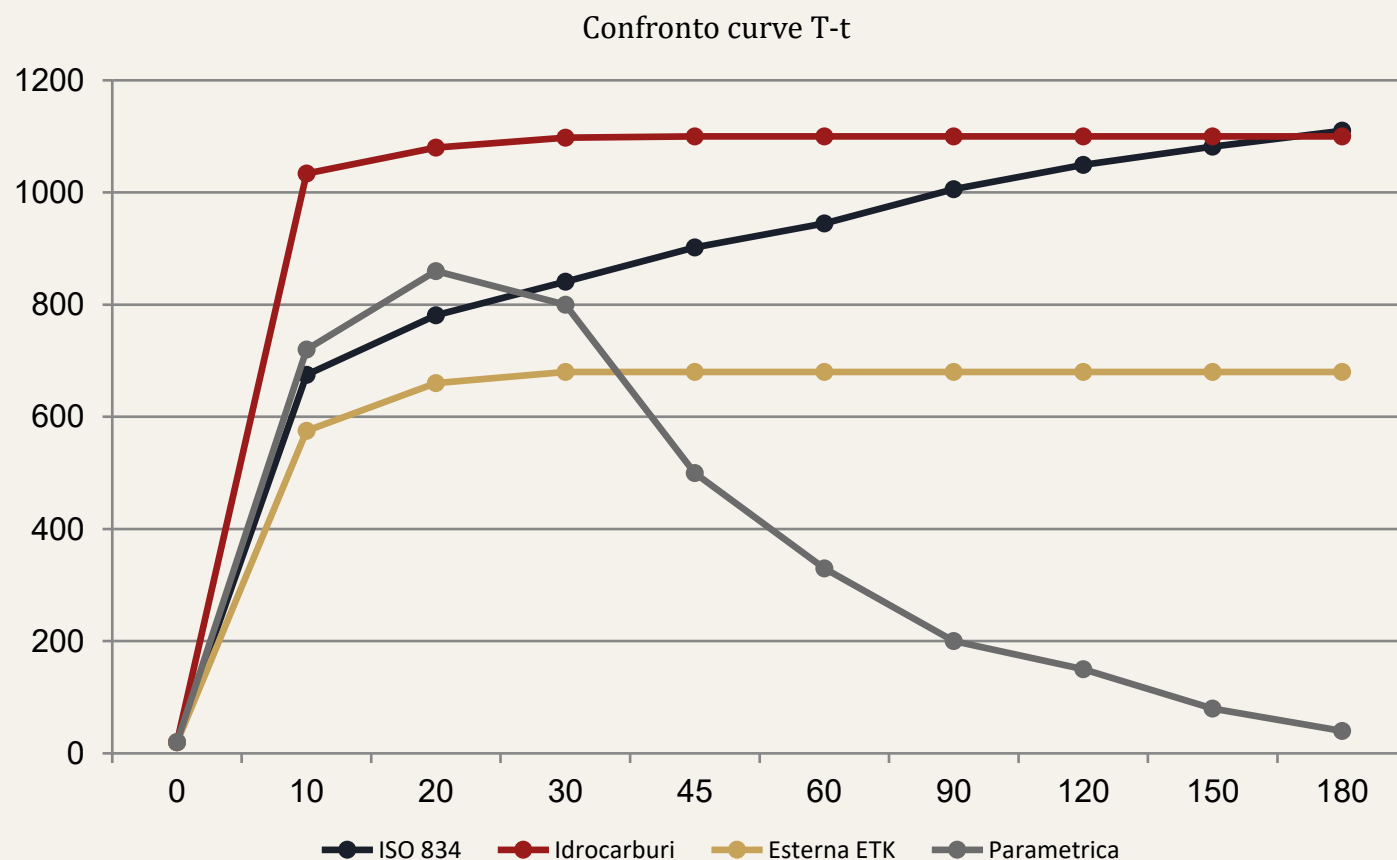
t4

Movimento

Approfondito in Lezione 5 · Strategia S.4 — Esodo

9. Curve d'incendio nominali e parametriche

La sollecitazione termica $T = T(t)$ sulle strutture, per la verifica di resistenza al fuoco



ISO 834

Edifici civili e industriali ordinari

Idrocarburi (HC)

Petrochimico, raffinerie, gallerie merci pericolose

Esterna (ETK)

Elementi esterni esposti a incendio interno

RABT/ZTV

Gallerie stradali e ferroviarie

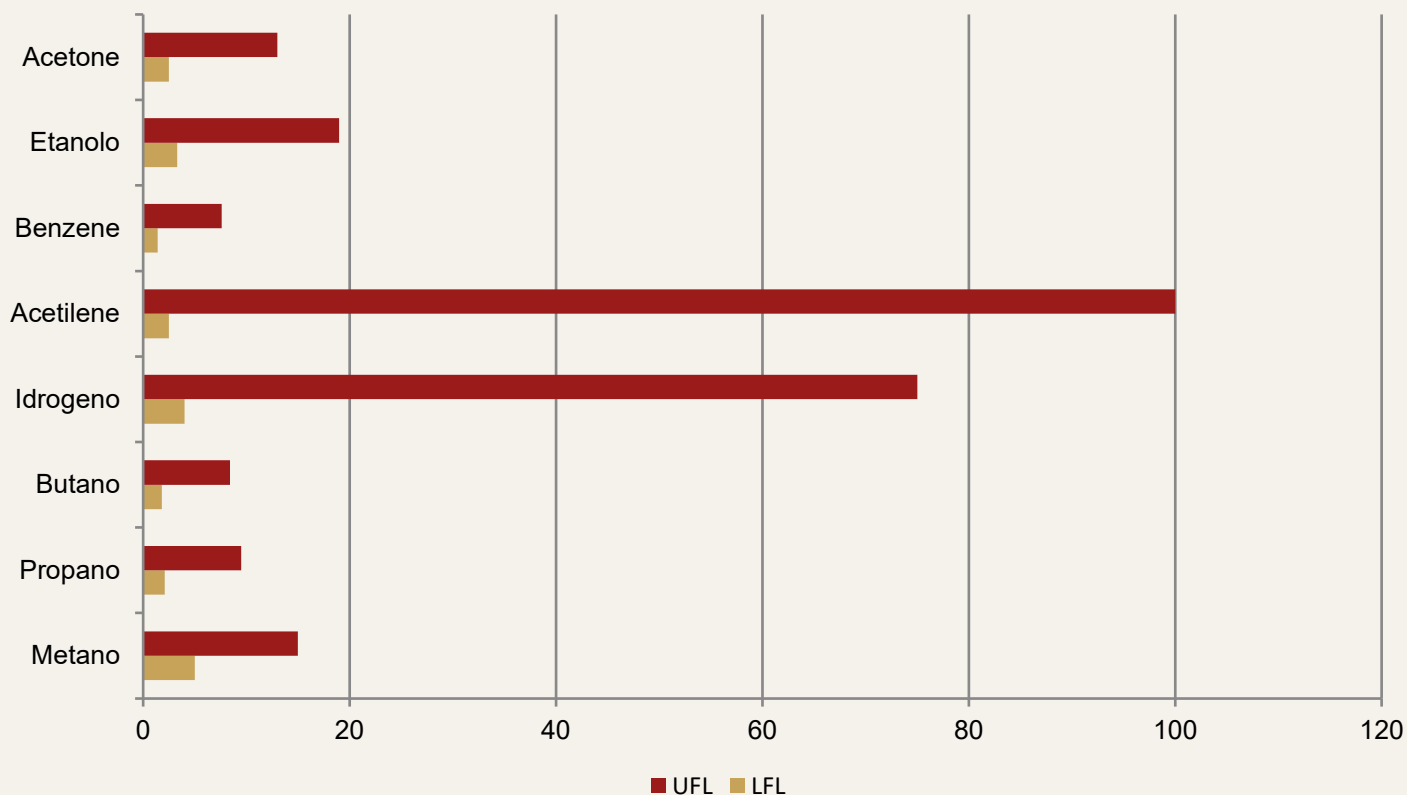
Parametriche

EN 1991-1-2 · incendi reali con decadimento (FSE)

10. Limiti di infiammabilità (LFL/UFL)

Per gas e vapori la combustione è possibile solo entro un range definito

Range di infiammabilità · sostanze comuni



LFL

Lower Flammability Limit · sotto = miscela troppo magra

UFL

Upper Flammability Limit · sopra = miscela troppo ricca (O₂ insufficiente)

Range

Più ampio = sostanza più pericolosa (H₂ e acetilene tra i peggiori)

SIGNIFICATO PRATICO

Base della progettazione ATEX e dei rivelatori gas. I LEL detector tipicamente allarmano al 10–20% del LFL, ben prima di concentrazioni pericolose.

11. I metodi di spegnimento

Spezzare almeno uno dei lati del tetraedro del fuoco

01 RAFFREDDAMENTO

Sottrarre calore al combustibile sotto la T di accensione

MEZZI TIPICI

Acqua (alta capacità termica e λ di vaporizzazione)

LIMITI

Inefficace su liquidi leggeri · reattiva con Na, K, Mg

02 SOFFOCAMENTO

Ridurre O_2 sotto il 15% isolando il combustibile

MEZZI TIPICI

Schiume · sabbia · coperte · gas inerti (N_2 , CO_2 , Ar)

LIMITI

Gas inerti soffocano anche le persone — pre-allarme

03 SEPARAZIONE

Rimuovere fisicamente il combustibile o impedirne il flusso

MEZZI TIPICI

Chiusura valvole · fasce tagliafuoco · rimozione materiali

LIMITI

Spesso impraticabile in fase acuta

04 INIBIZIONE CATALITICA

Spezzare la reazione a catena intercettando i radicali

MEZZI TIPICI

Polveri (BC, ABC) · agenti gassosi puliti (HFC, FK-5-1-12)

LIMITI

Halon banditi (protocollo di Montreal)

Principio operativo: rimuovere uno solo dei quattro lati del tetraedro è sufficiente a interrompere l'incendio.

Matrice estinguente × classe di incendio

Sintesi operativa · l'estinguente sbagliato può uccidere

CLASSE	Acqua	Schiuma	Polvere ABC	CO ₂	D / F	Note
A · solidi	✓✓	✓	✓	—	—	1 ^a scelta: acqua
B · liquidi	NO	✓✓	✓	✓	—	Schiuma per pozze
C · gas	—	—	✓	✓	—	Sezionare a monte
D · metalli	NO	NO	NO	NO	✓✓ (D)	Reazioni esplosive
F · oli cucina	NO	—	—	—	✓✓ (F)	Saponificazione
Elettrici	NO	—	✓	✓✓	—	Dielettrici

✓✓ prima scelta · ✓ adatto · — non indicato · NO pericoloso

ERRORI FATALI

Acqua su olio bollente → vapore esplosivo · Acqua su trasformatore in tensione → folgorazione · Acqua su Mg → H₂ esotermico · CO₂ in locale chiuso senza pre-allarme → asfissia

12. Casi storici e lezioni apprese

Sei eventi che hanno cambiato la prevenzione incendi

Innovation, Bruxelles

22 mag 1967 · 323 vittime

Propagazione fulminea per scale aperte e plastiche · vie d'esodo bloccate.

Nasce la compartimentazione moderna e lo sgombrare vie d'esodo

Stardust, Dublino

14 feb 1981 · 48 vittime

Uscite di sicurezza incatenate per impedire ingressi non paganti.

Divieto catene · maniglioni antipanico (UNI EN 1125)

Linate

8 ott 2001 · 118 vittime

Collisione SAS-Cessna in nebbia · incendio hangar bagagli.

Nuove procedure ICAO · hangar compartimentati

Station Nightclub, USA

20 feb 2003 · 100 vittime

Pirolisi schiuma fonoassorbente · rollover + flashover in 90 s.

Vietati materiali ad alta HRR sui soffitti pubblici

Viareggio

29 giu 2009 · 32 vittime

Deragliamento cisterne GPL · flash fire e BLEVE.

Revisione sicurezza ferroviaria merci pericolose (RID)

Grenfell Tower, Londra

14 giu 2017 · 72 vittime

Propagazione verticale via rivestimento ACM (alluminio + PE).

Messa al bando rivestimenti combustibili su edifici alti

UNA RIFLESSIONE FINALE

*« Il fuoco è un buon servitore,
ma un cattivo padrone »*

— proverbio dei vigili del fuoco

I SETTE MESSAGGI CHIAVE

1. Tetraedro: combustibile + comburente + innesco + reazione a catena
2. Ogni classe (A,B,C,D,F) richiede un estinguento specifico
3. 4 fasi: l'esodo deve completarsi prima del flashover
4. Velocità di crescita: curve t^2 · 4 categorie standard
5. Curve T-t (ISO 834, HC, ETK, parametriche) per la resistenza al fuoco
6. Gas: pericolosi entro LFL–UFL · allarme al 10–20% del LFL
7. Spegnimento: raffreddamento, soffocamento, separazione, inibizione