



ORDINE DEGLI INGEGNERI DELLA PROVINCIA DI BERGAMO

INTRODUZIONE ALLA FIRE INVESTIGATION

Ing. Diego Pala

NUCLEO INVESTIGATIVO ANTINCENDI
Capannelle - ROMA





PREAMBOLO

FIRE INVESTIGATION: PROCESSO DI DETERMINAZIONE DELL'ORIGINE, DELLA CAUSA E DELLO SVILUPPO DI UN INCENDIO E DI UN'ESPLOSIONE.

L'INVESTIGAZIONE SULLE CAUSE DI UN INCENDIO O DI UN'ESPLOSIONE RICHIEDE PARTICOLARI CONOSCENZE MULTIDISCIPLINARI COME PER ESEMPIO LA CONOSCENZA DEL «FENOMENO INCENDIO» E LA CONOSCENZA SUL COMPORTAMENTO AL FUOCO DEI MATERIALI E DELLE STRUTTURE.

TALE INVESTIGAZIONE E' RESA COMPLESSA DALLA NATURA DISTRUTTIVA DELL'EVENTO SU CUI SI INDAGA, CON LIVELLI DI DANNEGGIAMENTO DELLE STRUTTURE E DEI MATERIALI TALI DA NON CONSENTIRE, NEI CASI PIU' GRAVI, UNA RICOSTRUZIONE DELLO STATO DEI LUOGHI. L'ANALISI SCIENTIFICA PUO' FACILITARE L'INVESTIGATORE IN UN COMPITO CHE SI PRESENTA COMUNQUE ASSAI ARDUO.

IL SEMINARIO INTENDE FORNIRE UN APPROCCIO SEMPLICE ALLA FIRE INVESTIGATION ORIENTATO A FORNIRE SOLUZIONI PRATICHE ALLE INVESTIGAZIONI. LO SCENARIO INCIDENTALE CHE SI E' PRESO IN CONSIDERAZIONE E' QUELLO RELATIVO AGLI IMPIANTI FOTOVOLTAICI.



INDICE

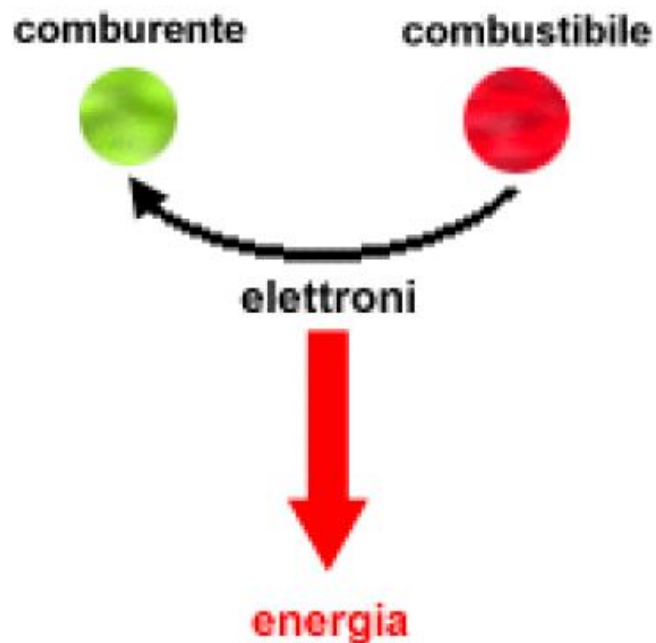
- CHIMICA E FISICA DI UN INCENDIO
 - Generalità sulla combustione
 - Propagazione della combustione
 - Parametri della combustione
 - Prodotti della combustione
- RHR «RATE OF HEAT RELEASED» o HRR «HEAT RELEASE RATE»
 - Generalità
 - Stima della curva RHR (HRR)
- INTERPRETAZIONE DEI SEGNI LASCIATI DA UN INCENDIO
- INDIVIDUAZIONE DEL PUNTO D'ORIGINE DI UN INCENDIO E DIREZIONE DI PROPAGAZIONE DEL FUOCO
- SCENARIO INCIDENTALE: IL CASO DEGLI IMPIANTI FOTOVOLTAICI
- CASE STUDY



CHIMICA E FISICA DI UN INCENDIO

Generalità sulla combustione 1/4

Combustione: reazione chimica nella quale un **combustibile** reagisce con un **comburente** liberando energia (calore).



I combustibili perdono elettroni, cioè si ossidano mentre i comburenti acquistano elettroni, cioè si riducono.



CHIMICA E FISICA DI UN INCENDIO

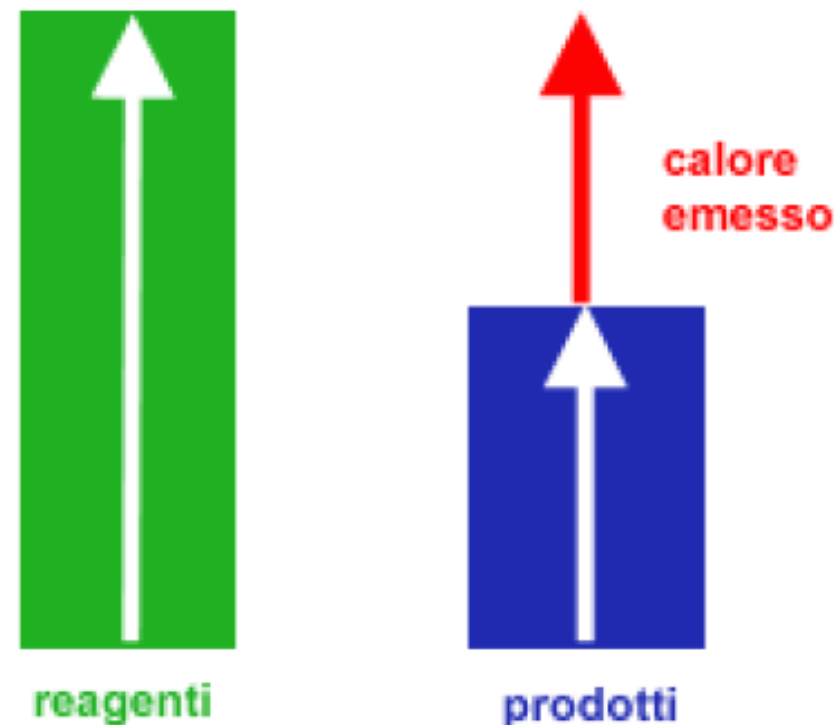
Generalità sulla combustione 2/4

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

Il calore generato, a sua volta, innalza la temperatura dei partecipanti alla reazione e molto spesso 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 in tal caso 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 presente si ha formazione, più o meno elevata, di **ossido di carbonio**, prodotto tipico delle combustioni in atmosfera povera di ossigeno.

Mescolati ai prodotti di reazione di carbonio e di 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** della combustione.

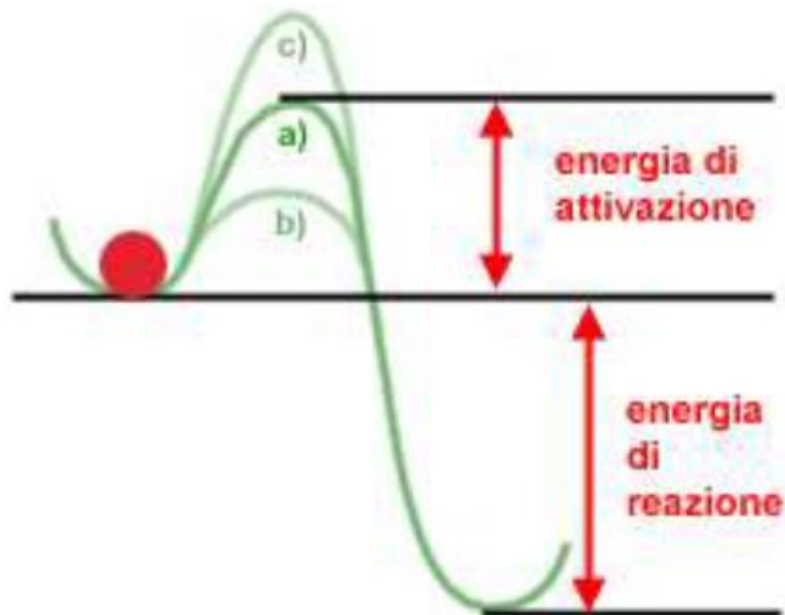




CHIMICA E FISICA DI UN INCENDIO

Generalità sulla combustione 3/4

La reazione di combustione può avvenire quando le molecole dei reagenti superano l'energia di attivazione.



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.



CHIMICA E FISICA DI UN INCENDIO

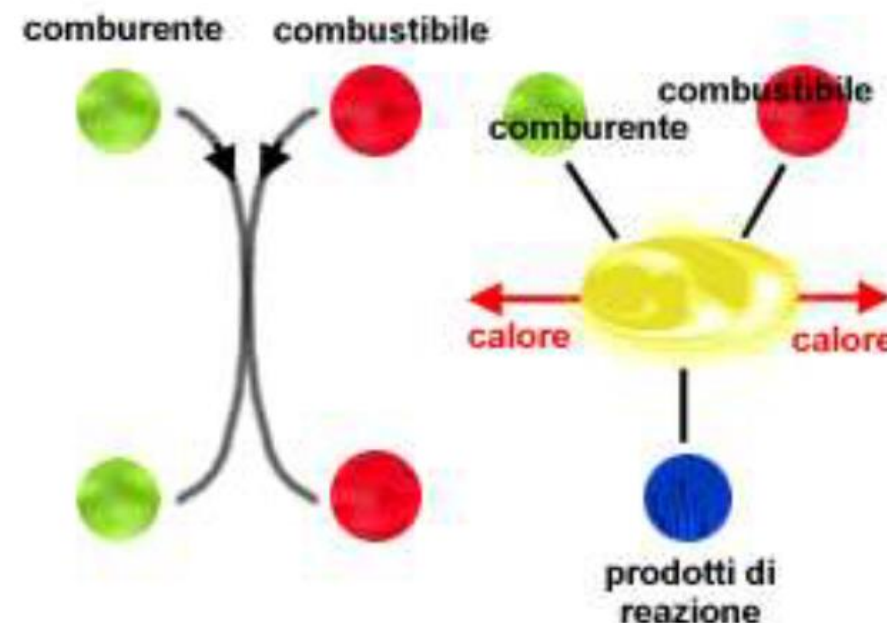
Generalità sulla combustione 4/4

L'energia posseduta dalle molecole è di tipo **cinetico**, cioè legata alla temperatura. Più è alta la temperatura, più veloci si muovono, statisticamente, le molecole e più probabile che venga superata l'energia di attivazione.

Alle basse temperature le molecole, in genere, si urtano senza reagire, mentre alle alte temperature, reagiscono tra di loro in quanto l'energia d'urto è superiore all'energia di attivazione.

Questa è la ragione per cui, nell'atmosfera terrestre, non tutto ciò che è combustibile, inclusi noi stessi, prende fuoco facilmente: la temperatura ambiente, fortunatamente è una temperatura bassa per la maggior parte delle reazioni di ossidazione.

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





CHIMICA E FISICA DI UN INCENDIO

Propagazione della combustione 1/6

La propagazione di un incendio richiede la presenza contemporanea di 3 elementi fondamentali:



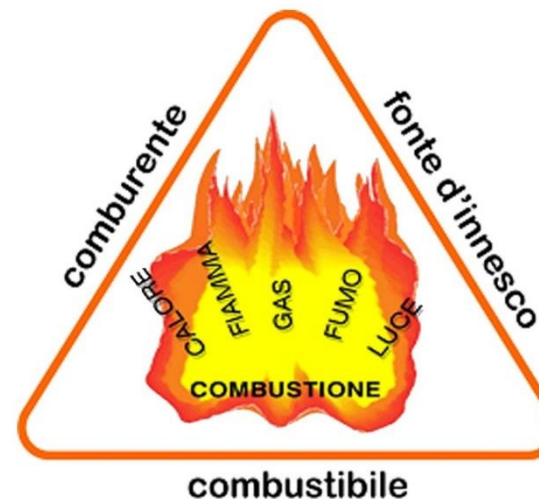
Combustibile



Comburente (ossigeno)



Temperatura adeguata



La maggior parte delle combustioni avviene in fase gassosa per la presenza di:

- ★ combustibili gassosi (come ovvio);
- ★ combustibili liquidi che evaporano;
- ★ combustibili solidi soggetti a pirolisi (formazione di gas per decomposizione termochimica di materiali organici sotto l'azione del calore).



CHIMICA E FISICA DI UN INCENDIO

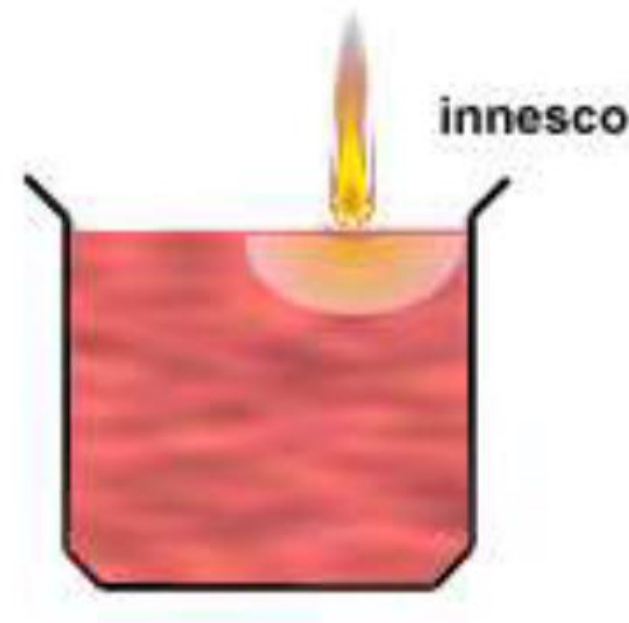
Propagazione della combustione 2/6

La temperatura adeguata deve permettere alla miscela di combustibile e di comburente una reazione di combustione che può avvenire per esempio per **innesco**.

Una volta sviluppatasi la reazione di combustione in un punto il calore che da questa si propaga riscalda le zone circostanti innescando altre reazioni di combustione e quindi la propagazione della fiamma.

Per comprendere la propagazione della fiamma risultano molto importanti i seguenti parametri:

- ★ limite inferiore e superiore di infiammabilità;
- ★ temperatura di infiammabilità;
- ★ temperatura di accensione (autoaccensione).





CHIMICA E FISICA DI UN INCENDIO

Propagazione della combustione 3/6

Limiti di infiammabilità

Condizione affinché avvenga una combustione non è solo la presenza contemporanea di combustibile, di comburente e di una temperatura al di sopra di un certo valore, ma anche che il rapporto tra combustibile e comburente sia entro certi limiti noti come limiti di infiammabilità.

Per i combustibili gassosi i limiti di infiammabilità vengono espressi come la percentuale in volume di combustibile nella miscela aria (ossigeno) - combustibile.

Combustibile	Limite inferiore	Limite superiore
Benzina	0,9	7,5
Gas naturale	3	15
Gasolio	1	6
Butano	1,5	8,5
Metano	5	15

L'ampiezza del **campo di infiammabilità** dei combustibili dipende dalla loro **reattività** (capacità di reagire in una reazione di combustione). I limiti di infiammabilità sono influenzati dalla **pressione** e dalla **temperatura**. L'aumento della pressione e della temperatura allarga i limiti di infiammabilità (rende più reattivi i combustibili).



CHIMICA E FISICA DI UN INCENDIO

Propagazione della combustione 4/6

Temperatura di infiammabilità

La **temperatura di infiammabilità** è la più bassa temperatura alla quale un combustibile liquido emette vapori sufficienti a formare con l'aria una miscela che, **se innescata**, brucia spontaneamente.

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



CHIMICA E FISICA DI UN INCENDIO

Propagazione della combustione 5/6

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

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

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



CHIMICA E FISICA DI UN INCENDIO

Propagazione della combustione 6/6

Temperatura di accensione (autoaccensione)

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

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



CHIMICA E FISICA DI UN INCENDIO

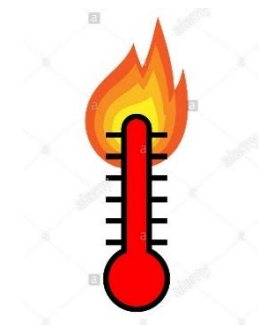
Parametri della combustione 1/4

E' difficile prevedere attraverso calcoli teorici lo sviluppo e la propagazione di una combustione mentre è possibile valutare alcuni parametri fondamentali che la influenzano, tra i quali abbiamo:



Il potere calorifico dei combustibili.

La temperatura teorica di combustione.



L'aria necessaria per la combustione.



CHIMICA E FISICA DI UN INCENDIO

Parametri della combustione 2/4

Potere calorifico

Il potere calorifico si definisce come la quantità di calore (espresso in kilo-calorie oppure in Mega-joule: 1 MJ = 238 kcal) sviluppata dalla combustione di una quantità unitaria di combustibile (espressa in kg per i combustibili solidi e liquidi e in metri-cubi in condizioni normali «pressione atmosferica / 0°C» per i combustibili gassosi. Tenendo conto della presenza di molecole d'acqua nei prodotti della combustione esistono 2 definizioni di potere calorifico derivante da 2 diversi modi di misura.

- ★ **Potere calorifico superiore** per il quale si considera il calore sviluppato dalla reazione allorché tutti i prodotti della combustione sono alla temperatura ambiente e quindi l'acqua prodotta è allo stato liquido.
- ★ **Potere calorifico inferiore** per il quale invece si considera l'acqua prodotta allo stato di vapore (si sottrae al potere calorifico superiore il calore di vaporizzazione dell'acqua formatasi durante la combustione).

Nella pratica si fa riferimento soprattutto al potere calorifico inferiore. Tuttavia nella determinazione del carico d'incendio, cioè della quantità equivalente di legna secca contenuta nell'unità di superficie di un locale, la normativa impone di far riferimento ai poteri calorifici superiori, probabilmente per avere una stima più prudente.

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



CHIMICA E FISICA DI UN INCENDIO

Parametri della combustione 3/4

Temperatura della combustione

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

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

Ne consegue che le temperature **teoriche** di combustione sono sempre **maggiori** di quelle **reali**.

Sostanza	Temperatura di combustione	
	massima teorica	massima reale
Metano	2.218 °C	1.880 °C
Etano	2.226 °C	1.895 °C
Propano	2.232 °C	1.925 °C
Butano	2.237 °C	1.895 °C
Fiammifero	-	oltre i 1.000 °C



CHIMICA E FISICA DI UN INCENDIO

Parametri della combustione 4/4

Aria necessaria per la combustione

Per bruciare un combustibile sfruttando al massimo la sua capacità di produrre un effetto termico è necessario farlo **combinare** con una **determinata quantità di ossigeno** (praticamente con l'aria che contiene in volume circa 1/5 di ossigeno).

La quantità d'aria teoricamente necessaria alla combustione dipende dalla composizione chimica del combustibile: l'aria necessaria è tanto maggiore quanto più elevato è il potere calorifico del combustibile. Nella pratica non è però sufficiente l'aria teorica: affinché si sviluppi la combustione completa occorre una quantità d'aria maggiore. La parte in più del valore teorico viene chiamata **eccesso d'aria** e dipende dal tipo di combustibile. L'aria in eccesso non prende parte alla combustione e la si trova nei prodotti della combustione.

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

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



CHIMICA E FISICA DI UN INCENDIO

Prodotti della combustione 1/3

Gas di combustione

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

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

Principali gas di combustione:

- ★ **Monossido di carbonio** (CO): gas tossico che si sviluppa in carenza di ossigeno.
- ★ **Anidride carbonica** (CO₂): gas asfissiante.
- ★ **Idrogeno solforato** (H₂S): gas pericoloso, si sviluppa in presenza di zolfo (lana, gomme, pelli, carni, ecc.).
- ★ **Anidride solforosa** (SO₂): si sviluppa in presenza di zolfo con eccesso d'aria. Gas irritante delle mucose, degli occhi e delle vie respiratorie.
- ★ **Acido cianidrico** (HCN): si sviluppa in carenza di ossigeno ed in presenza di seta, lana, resine acriliche, uretaniche e poliammidiche. Gas altamente tossico.
- ★ **Fosgene** (COCl₂): presente nelle combustioni di materiali contenenti cloro (materiali plastici). Gas altamente tossico.
- ★ **Ammoniaca** (NH₃): presente nella combustione di materiali contenenti azoto (lana, seta, materiali acrilici e fenolici). Gas intossicante ed irritante agli occhi, al naso, alla gola ed ai polmoni.
- ★ **Perossido di azoto** (N₂O₄): presente nella combustione della nitrocellulosa, del nitrato di ammonio e di altri nitrati organici. Gas altamente tossico.
- ★ **Acido cloridrico** (HCL): presente nella combustione di materiali contenenti cloro come la maggioranza delle materie plastiche. Gas irritante per le mucose e corrosivo per i metalli.



CHIMICA E FISICA DI UN INCENDIO

Prodotti della combustione 2/3

Fiamme

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

Dal **colore** assunto dalle fiamme si possono avere indicazioni della temperatura raggiunta dall'incendio.

Colore fiamma	Temperatura in °C
Amaranto pallido	480
Amaranto	525
Rosso sangue	585
Rosso scuro	635
Rosso	675
Rosso chiaro	740
Rosso pallido	845
Rosa	900
Arancione	940
Giallo	995
Giallo pallido	1080
Bianco	1205
Azzurro\Blu-viola	1400



CHIMICA E FISICA DI UN INCENDIO

Prodotti della combustione 3/3

Fumi

I **fumi** sono formati da sospensione nell'aria di particelle solide e liquide disperse nei gas prodotti durante la combustione.

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



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



CHIMICA E FISICA DI UN INCENDIO

Dinamica degli incendi (in ambienti chiusi) 1/11

Fattori da cui dipende un incendio

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

- ★ il compartimento;
- ★ il carico d'incendio;
- ★ la ventilazione;
- ★ la velocità di combustione.

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

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

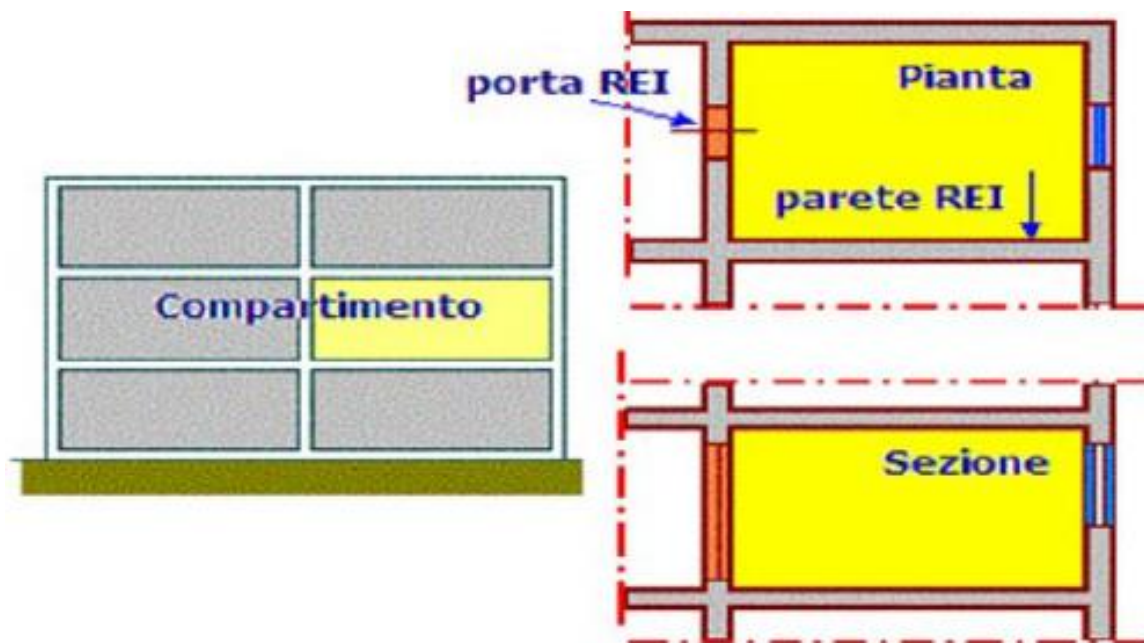


CHIMICA E FISICA DI UN INCENDIO

Dinamica degli incendi (in ambienti chiusi) 2/11

Compartimento

E' un **settore di edificio** delimitato da elementi costruttivi atti ad impedire, per un prefissato periodo di tempo, la propagazione dell'incendio e/o dei fumi e a limitare la trasmissione termica ai settori adiacenti dell'edificio in caso di incendio.





CHIMICA E FISICA DI UN INCENDIO

Dinamica degli incendi (in ambienti chiusi) 3/11

Carico d'incendio

E' la quantità di calore teorica che si svilupperebbe per combustione completa di tutti i materiali combustibili contenuti nel compartimento, compresi le strutture, gli infissi, le opere di finitura dei muri, pavimenti e soffitti costituiti da materiali combustibili.

La quantità di calore teorica è ben lungi dall'essere raggiunta nei casi concreti, a causa di molti fattori accessori (stato di suddivisione, distribuzione e forma dei materiali combustibili presenti nel compartimento) e soprattutto per il fatto che non si verifica mai la combustione completa di tutto il materiale combustibile nel compartimento.





CHIMICA E FISICA DI UN INCENDIO

Dinamica degli incendi (in ambienti chiusi) 4/11

Ventilazione

La portata volumetrica d'aria entrante Q_a è proporzionale all'area delle finestre e alla radice quadrata dell'altezza, secondo la seguente formula:

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

dove:

- ★ A_f ed H sono rispettivamente l'area e l'altezza delle finestre;
- ★ k rappresenta un **coefficiente di proporzionalità** che dipende dalla differenza di temperatura tra interno ed esterno e dal rapporto tra il volume di gas prodotto per unità di massa ed il volume di aria richiesto per la combustione completa dell'unità di massa del combustibile.



CHIMICA E FISICA DI UN INCENDIO

Dinamica degli incendi (in ambienti chiusi) 5/11

Velocità di combustione

Si distinguono 2 casi tipici:

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



CHIMICA E FISICA DI UN INCENDIO

Dinamica degli incendi (in ambienti chiusi) 6/11

Sviluppo di un incendio

Il **focolaio iniziale** di molti incendi in edifici è determinato frequentemente da una sorgente di energia che viene a contatto più o meno ravvicinato con materiali combustibili per fatti accidentali.

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

L'energia assorbita e la temperatura per la quale la combustione prosegue da sé, vengono dette **energia d'ignizione e temperatura d'ignizione**.

Se l'oggetto combustibile acceso è distante da altro materiale combustibile, il fuoco non si può propagare e, una volta esaurito il combustibile la combustione cessa. Viceversa se l'oggetto combustibile acceso è a contatto più o meno ravvicinato con altri materiali combustibili questi possono emanare per effetto di pirolisi (decomposizione termochimica di materiali organici), vapori e gas che facilmente si accendono. Le fiamme che ne conseguono possono propagare l'incendio ai vari elementi combustibili e quindi, per gradi, a tutto il locale.

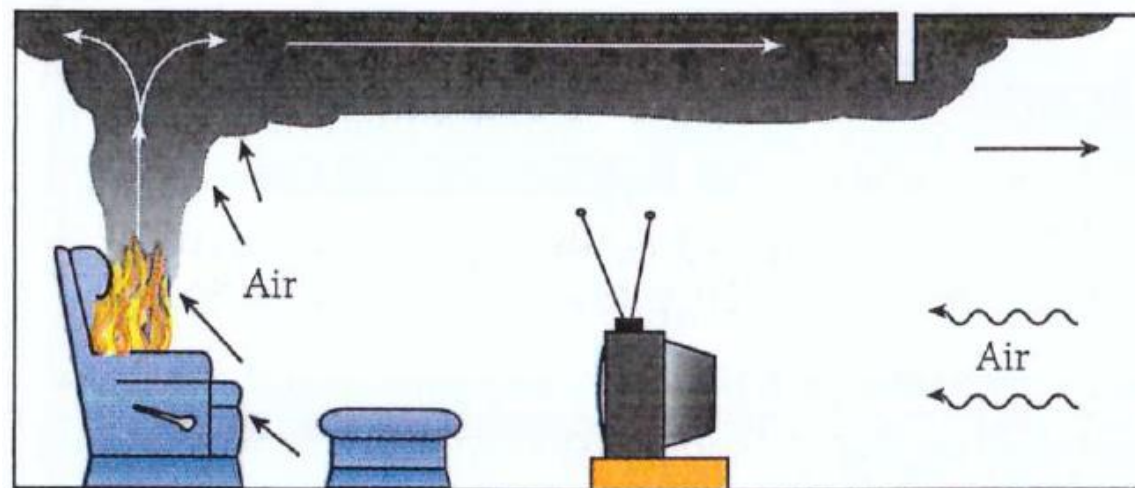


CHIMICA E FISICA DI UN INCENDIO

Dinamica degli incendi (in ambienti chiusi) 7/11

Sviluppo di un incendio

Un incendio si sviluppa attraverso una successione di fasi a partire da quella iniziale dove è richiesta una sorgente d'ignizione necessaria ad avviare una combustione. Il materiale combustibile inizia a bruciare ed i flussi convettivi che si determinano trasportano prodotti della combustione nelle zone alte dell'ambiente mentre l'ossigeno viene richiamato dal basso per sostenere la combustione. La diffusione a soffitto dello strato di gas caldi, irradia il calore nel locale.



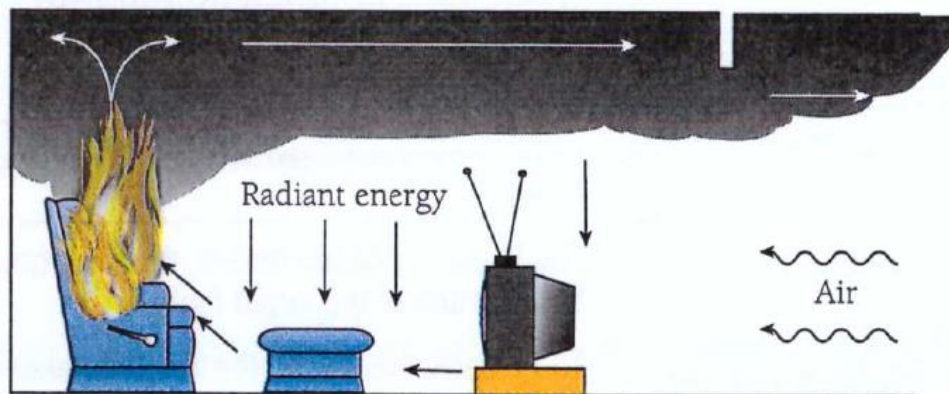


CHIMICA E FISICA DI UN INCENDIO

Dinamica degli incendi (in ambienti chiusi) 8/11

Sviluppo di un incendio

A questo punto segue una fase di crescita dell'incendio ed il calore che si diffonde per convezione ed irraggiamento verso l'alto e verso l'esterno rispetto al materiale inizialmente acceso, consente di raggiungere la temperatura d'ignizione dei materiali combustibili vicini. Il fuoco cresce progressivamente diffondendosi a materiali combustibili adiacenti. Inizia a formarsi, a soffitto, uno strato ricco di materiali combustibili composto da gas tossici, prodotti di pirolisi parzialmente combustibili, fuliggine e fumo la cui temperatura aumenta costantemente. La parte inferiore del locale è ancora ricca di ossigeno e la velocità di combustione all'interno del locale continua ad aumentare con conseguente rilascio di calore.



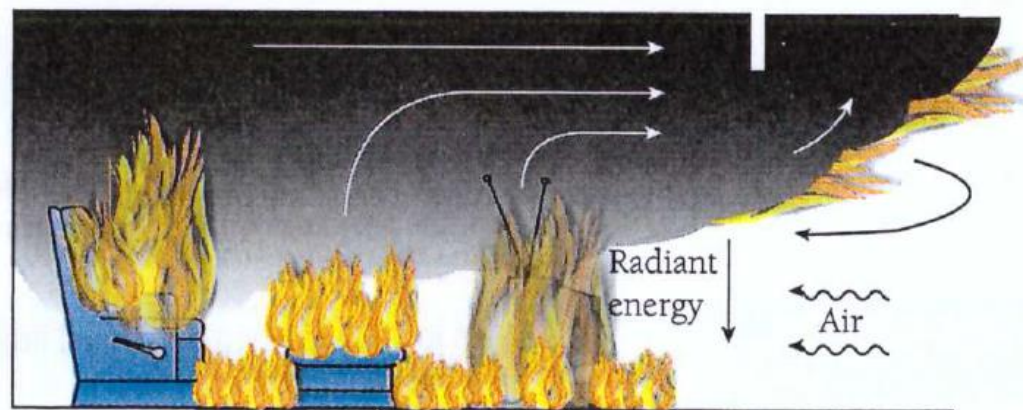


CHIMICA E FISICA DI UN INCENDIO

Dinamica degli incendi (in ambienti chiusi) 9/11

Sviluppo di un incendio

Quando l'aumento progressivo della temperatura e quando lo strato di gas caldi a soffitto raggiunge approssimativamente una temperatura di $600\text{ }^{\circ}\text{C}$ si genera un flusso termico a pavimento di circa 20 kW/m^2 . In un locale normalmente arredato questo flusso termico è sufficiente a far raggiungere ai materiali cellulosei (tappeti, mobili, ecc.) la loro temperatura di accensione, in modo da innescarli contemporaneamente facendo raggiungere all'incendio la fase di **flashover**. In questa fase, la sovrappressione che si determina all'interno del locale, riduce l'ingresso di aria fresca e quindi l'apporto di ossigeno per la combustione.



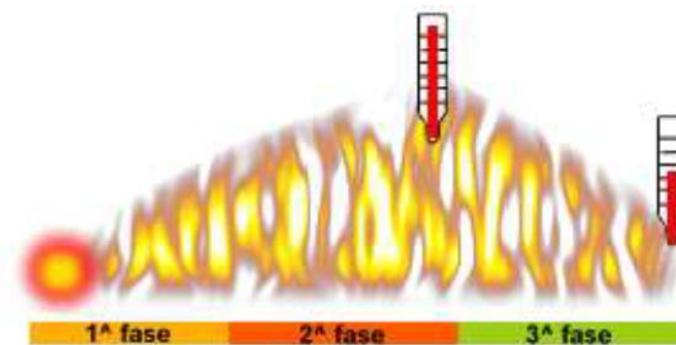
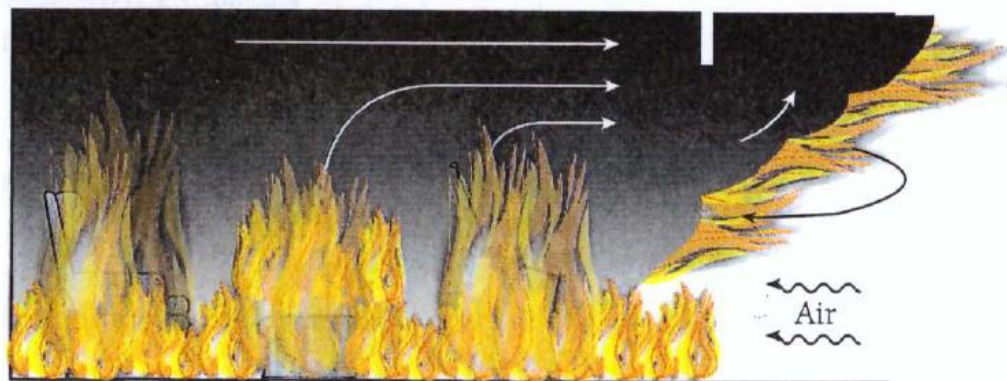


CHIMICA E FISICA DI UN INCENDIO

Dinamica degli incendi (in ambienti chiusi) 10/11

Sviluppo di un incendio

L'incendio è un bilanciamento tra combustibile, calore ed aria. Se la ventilazione è limitata, l'incendio progredirà più lentamente, con un minor tasso di crescita della temperatura ed una maggiore produzione di fumo. Una volta raggiunto il post-flashover, tutti i combustibili continueranno a bruciare fino a quando l'ossigeno è disponibile o fino a quando gli stessi combustibili vengono consumati.



Se l'incendio si spegne (o si auto-estingue) prima del flashover, la determinazione del punto di origine è relativamente semplice. Al contrario, in un incendio dove si è verificato il flashover tale determinazione è molto più complessa. Infatti in un incendio dopo il post-flashover tutto il materiale combustibile coinvolto si è incendiato.



CHIMICA E FISICA DI UN INCENDIO

Dinamica degli incendi (in ambienti chiusi) 11/11

Meccanismi di propagazione di un incendio

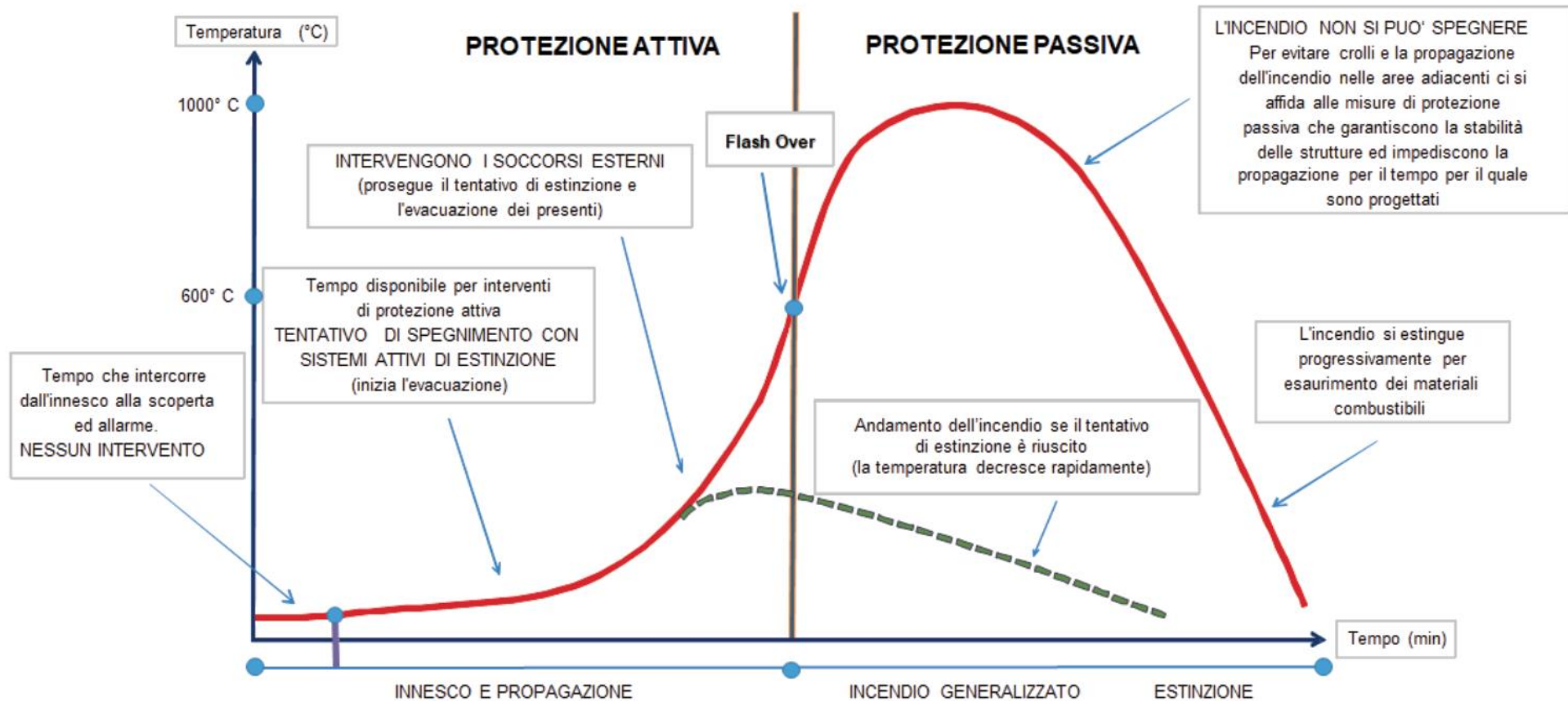
Prendiamo ora in esame alcuni dei meccanismi attraverso i quali si propaga un incendio.

- ★ Le correnti di fumo nella zona di combustione contribuiscono alla propagazione attraverso:
 - ✦ **termo-espansione dell'aria causata dall'aumento di temperatura:** un aumento della temperatura provoca un proporzionale aumento del volume dei gas di combustione. Durante un incendio questo fenomeno provoca la rottura delle finestre e delle porte.
 - ✦ **effetto camino:** quando la temperatura negli ambienti si è stabilizzata il principale meccanismo di movimento dei fumi diventa il tiraggio, che, per manifestarsi ha bisogno di camini quali scale, vani ascensore, cavedi di impianti, ecc.
 - ✦ **funzionamento improprio della ventilazione meccanica:** rapidi trasferimenti di fumo e calore nell'edificio attraverso le condotte di passaggio forzata dell'aria.
- ★ Propagazione per **conduzione** attraverso strutture di separazione.
- ★ Propagazione per **irraggiamento termico** per via elettromagnetica.



RHR Rate of Heat Released o HRR (Heat Release Rate): **curva di rilascio termico**

Generalità 1/14



TIPICO ANDAMENTO DI UN INCENDIO



RHR Rate of Heat Released o HRR (Heat Release Rate): curva di rilascio termico

Generalità 2/14

La curva RHR rappresenta il tasso di rilascio termico, ovvero l'energia termica emessa da un incendio nell'unità di tempo (kW/s).

Fornisce maggiori informazioni rispetto al carico d'incendio in quanto prende in esame lo sviluppo reale dell'incendio, mentre il carico d'incendio riguarda l'energia termica emessa senza riferimento al tempo di combustione (uno stesso carico d'incendio può bruciare con differenti velocità dipendenti dal materiale - tipologia, pezzatura, ecc. - e dall'ambiente in cui è inserito - volumetria, aperture, ecc. -, dando origine a temperature nel locale coinvolto anche molto diverse da caso a caso).

Nel caso del carico d'incendio, la stima della temperatura risulta conservativa in quanto si presuppone che tutto il combustibile presente partecipi alla combustione, per cui si sta considerando la dinamica dell'incendio esclusivamente nella fase post-flashover.

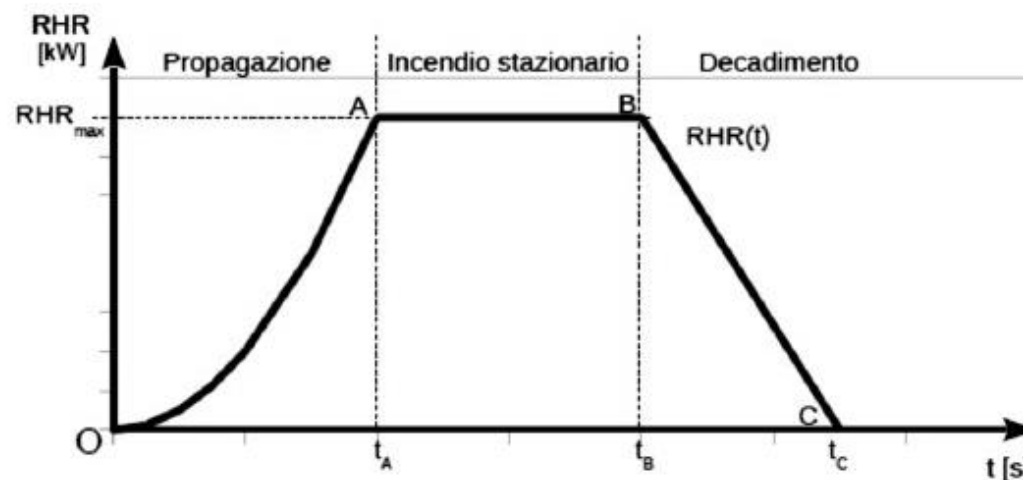


RHR Rate of Heat Released o HRR (Heat Release Rate): curva di rilascio termico

Generalità 3/14

La curva RHR è una schematizzazione semplificata dell'incendio naturale, con l'individuazione di 3 fasi:

- iniziale (che rappresenta la propagazione dell'incendio con andamento tipicamente quadratico);
- intermedia (che rappresenta l'incendio stazionario con andamento costante);
- finale (che rappresenta la fase di decadimento dell'incendio con andamento lineare).



Curva RHR in funzione del tempo per le varie fasi di un incendio



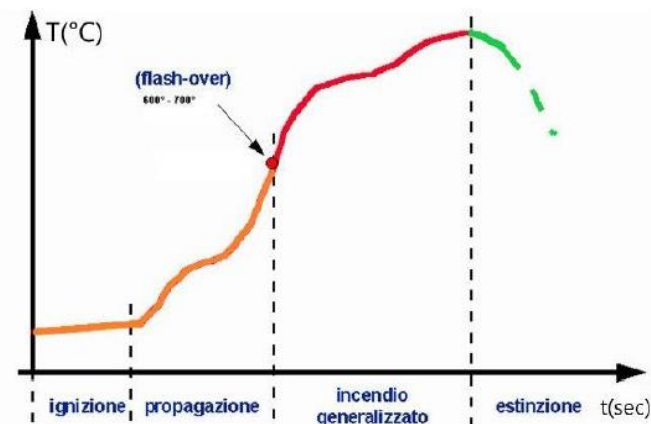
RHR Rate of Heat Released o HRR (Heat Release Rate): curva di rilascio termico

Generalità 4/14

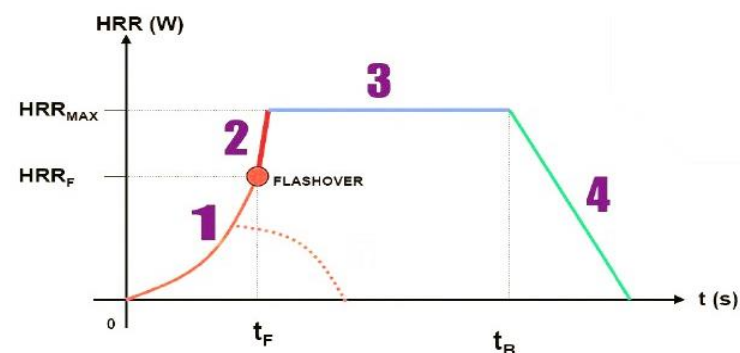
Il valore dell'RHR ad un determinato istante t è dato dal prodotto fra il valore del potere calorifico del combustibile e quello della velocità di combustione in tale istante.

Quindi la potenza termica rilasciata è direttamente proporzionale alla velocità di combustione, ovvero alle dinamiche della combustione. L'area sottesa dalla curva RHR rappresenta il carico d'incendio, ovvero l'energia disponibile per essere rilasciata.

Di fianco è rappresentato il confronto tra la curva dell'andamento naturale di un incendio e l'andamento dell'RHR in funzione del tempo.



Andamento naturale di un incendio nel tempo



Andamento dell'RHR nel tempo

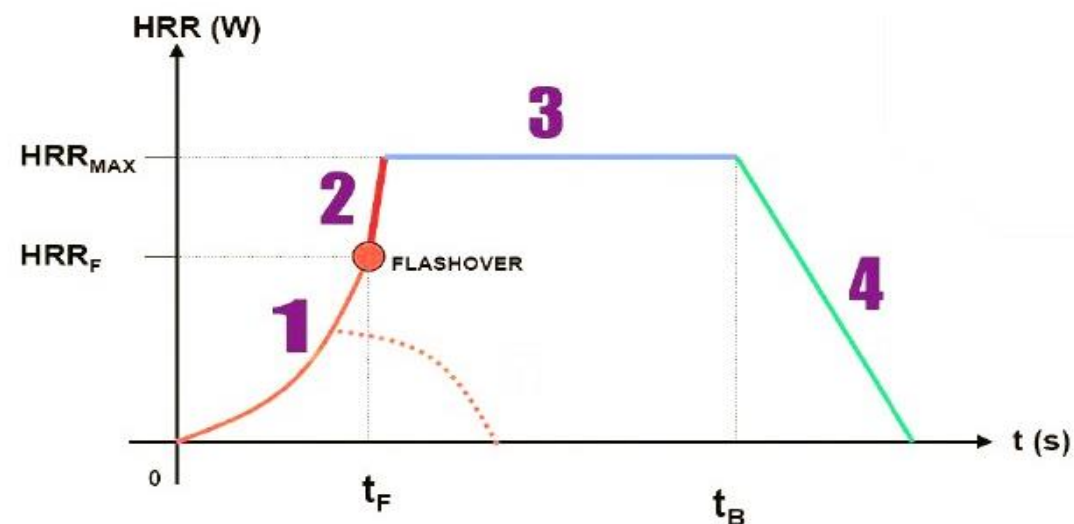


RHR Rate of Heat Released o HRR (Heat Release Rate): curva di rilascio termico

Generalità 5/14

Sulla curva RHR il flashover si trova nella fase di propagazione (tra la parte 1 e 2 della curva crescente) e ciò si raggiunge solo se vi sono quantitativi sufficienti di combustibile e sufficiente ventilazione (comburente).

Nel caso in cui non vi siano quantitativi sufficienti di combustibile e di comburente per il raggiungimento del flashover, la curva dell'RHR decresce rapidamente (curva rossa tratteggiata).



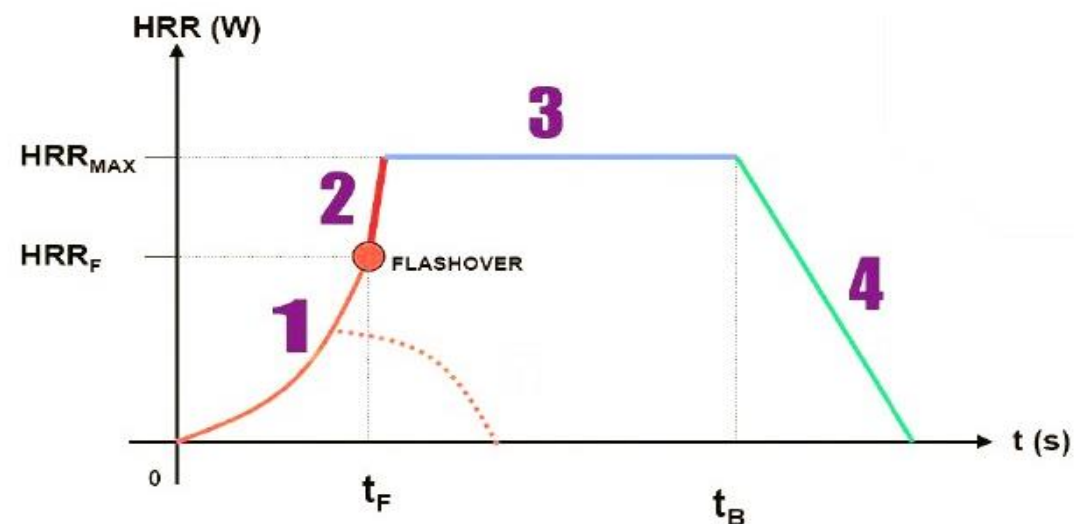


RHR Rate of Heat Released o HRR (Heat Release Rate): curva di rilascio termico

Generalità 6/14

Dopo il raggiungimento della potenza termica del flashover RHR_F , avremo un'ulteriore crescita della curva, fino al raggiungimento del picco RHR_{MAX} .

Generalmente queste prime fasi di propagazione (1 e 2) sono controllate dal combustibile, mentre la fase successiva di incendio stazionario (3) è controllata dalla ventilazione.





RHR Rate of Heat Released o HRR (Heat Release Rate): curva di rilascio termico

Generalità 7/14

INFLUENZA DELLA VENTILAZIONE SUL COMPORTAMENTO DI UN INCENDIO

Possiamo avere due condizioni:

INCENDIO VENTILATO

INCENDIO SOTTO VENTILATO

Per definire queste due situazioni dobbiamo prima comprendere le seguenti modalità di combustione:

COMBUSTIONE CONTROLLATA DAL COMBUSTIBILE

COMBUSTIONE CONTROLLATA DAL COMBURENTE



RHR Rate of Heat Released o HRR (Heat Release Rate): curva di rilascio termico

Generalità 8/14

COMBUSTIONE CONTROLLATA DAL COMBUSTIBILE

All'inizio di un incendio vi è solo una piccola quantità di materiale coinvolto dalla combustione. L'aria disponibile è più che sufficiente per alimentare il piccolo incendio.

Le caratteristiche del materiale combustibile e la sua distribuzione nel locale determineranno l'evoluzione dell'incendio.

I parametri sono:

- la propagazione della fiamma;
- la velocità di propagazione delle fiamme sulla superficie;
- l'HRR (**H**eat **R**elease **R**ate): tasso di rilascio termico (energia emessa per unità di tempo).

Nella fase incipiente di un incendio, il combustibile controlla la progressione del fuoco. E' questo il motivo per cui l'incendio, in questa fase, viene definito «incendio controllato dal combustibile».



RHR Rate of Heat Released o HRR (Heat Release Rate): curva di rilascio termico

Generalità 9/14

COMBUSTIONE CONTROLLATA DAL COMBURENTE

Dopo un po' il fuoco aumenta. La temperatura aumenta mentre la concentrazione di ossigeno diminuisce.

Si forma uno strato di fumo sotto al soffitto, con aumento del calore radiante verso il combustibile che si trova al di sotto dello strato di fumo. Raggiunta la temperatura di accensione del materiale combustibile si genera la fase di flashover ovvero la fase di incendio generalizzato. Perché ciò avvenga deve accadere che una porta o una finestra sia aperta (solitamente a causa della loro rottura durante lo sviluppo dell'incendio).

Dopo il flashover l'intero locale è in fiamme. L'incendio richiama aria (ossigeno) dalle aperture disponibili. Generalmente si formano anche fiamme che escono dall'edificio dal momento che non c'è abbastanza ossigeno disponibile all'interno.

L'intensità dell'incendio non è determinata dal combustibile disponibile ma è la ventilazione che la determina. Dal momento che è la ventilazione ora il parametro che determina l'evoluzione della combustione, l'incendio è a «ventilazione controllata».



RHR Rate of Heat Released o HRR (Heat Release Rate): curva di rilascio termico

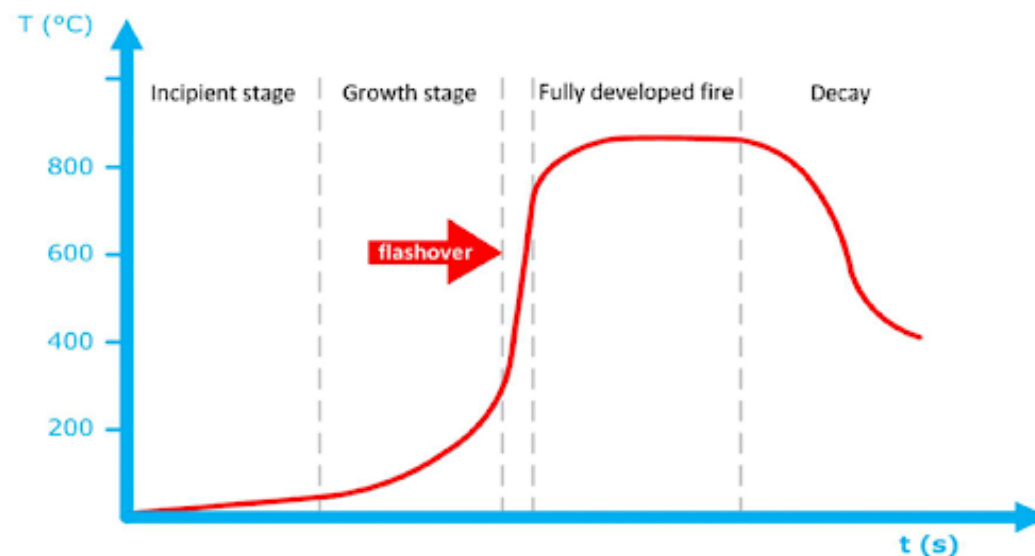
Generalità 10/14

INCENDIO VENTILATO

L'incendio ventilato è costituito da 5 fasi. Il fuoco inizia dalla fase incipiente e si evolve nella fase di crescita. In entrambe le fasi il fuoco è controllato dal combustibile.

Successivamente a queste due fasi si ha il flashover. In questa fase si ha la transizione da un regime controllato dal combustibile ad un regime controllato dalla ventilazione.

La quarta fase è un incendio completamente sviluppato. Durante questa fase l'incendio è a ventilazione controllata. Quando il combustibile nel locale si esaurisce, anche la potenza del fuoco diminuisce. La richiesta di ossigeno scende di conseguenza. Ad un certo punto l'incendio torna ad essere controllato dal combustibile.



Sviluppo di un incendio ventilato

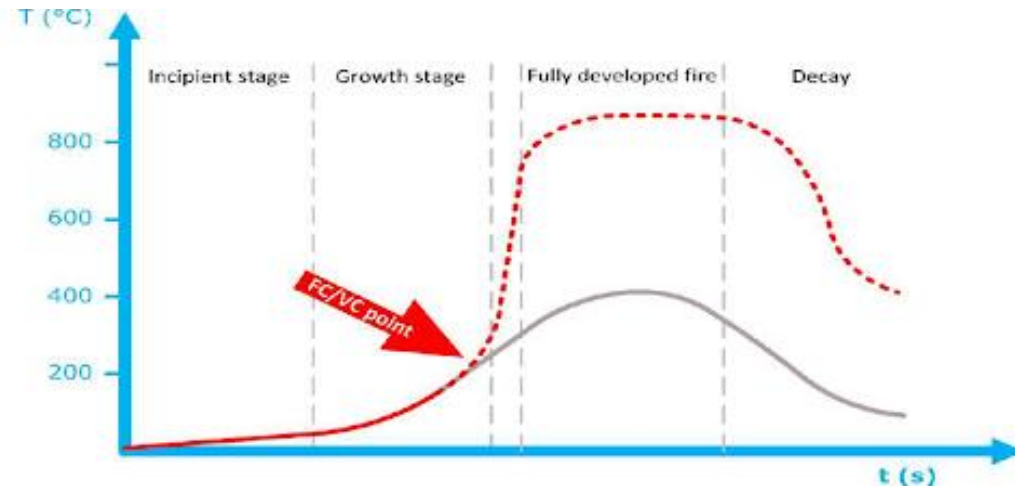


RHR Rate of Heat Released o HRR (Heat Release Rate): curva di rilascio termico

Generalità 11/14

INCENDIO SOTTO VENTILATO

L'incendio sotto ventilato inizia allo stesso modo di quello ventilato. Nella fase incipiente il fuoco è controllato combustibile. Questo avviene anche durante la fase di crescita. La differenza si ha nella disponibilità di aperture di ventilazione. Quando ci sono poche o nessuna apertura di ventilazione, la concentrazione di ossigeno scende rapidamente. Il fuoco diviene a ventilazione controllata prima che si abbia l'irraggiamento che caratterizza la fase iniziale del flashover. L'incendio rimane a ventilazione controllata fino a quando non si esaurisce o finché non viene spento dai vigili del fuoco.



La linea rossa continua indica la parte che è comune per entrambi i tipi di comportamento dell'incendio (ventilato e non ventilato). La linea rossa tratteggiata rappresenta il comportamento dell'incendio ventilato, mentre la linea grigia rappresenta il comportamento dell'incendio sotto ventilato

Un incendio sottoventilato è un incendio che è diventato a ventilazione controllata prima del flashover.



RHR Rate of Heat Released o HRR (Heat Release Rate): curva di rilascio termico

Generalità 12/14

Creare aperture di ventilazione (se possibile nel tetto) favorisce l'evacuazione del fumo favorendo le operazioni di spegnimento dell'incendio.

Questa è una tattica che in passato ha dato ottimi risultati poiché gli incendi si comportavano diversamente rispetto a quanto accade oggi. Il combustibile era composto principalmente da prodotti naturali mentre oggi è costituito principalmente da derivati del petrolio.

Il tempo per il flashover è diminuito drasticamente: era di circa 30 minuti negli anni 50 mentre ora è di soli 3-4 minuti. Ciò significa che gli incendi sono controllati dal combustibile per un periodo più breve rispetto che in passato. Ventilare un incendio controllato dal combustibile non crea particolari effetti: quello che sta avvenendo alla combustione è determinato dalle caratteristiche del combustibile.

Negli edifici moderni l'incendio diventa controllato dalla ventilazione molto velocemente.



RHR Rate of Heat Released o HRR (Heat Release Rate): curva di rilascio termico

Generalità 13/14

Quando l'incendio diventa controllato dalla ventilazione prima del flashover si ha un incendio sotto ventilato.

E' questo il tipo di incendio che ultimamente sta accadendo sempre di più.

Quando viene realizzata un'apertura nella parete di un locale in cui vi è un incendio sotto ventilato il suo HRR aumenterà bruscamente.

Dal momento che realizzando un'apertura si apporta aria, la ventilazione che si instaura determina lo sviluppo dell'incendio.

Pertanto la ventilazione deve essere utilizzata con molta cautela negli incendi sotto ventilati.

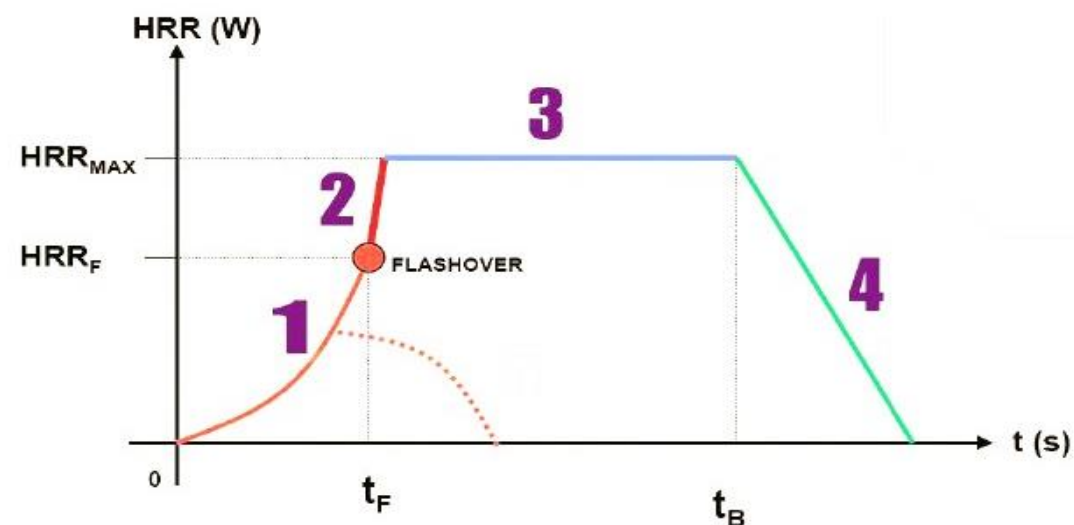


RHR Rate of Heat Released o HRR (Heat Release Rate): curva di rilascio termico

Generalità 14/14

Raggiunto l' HRR_{MAX} si instaura una fase di velocità di combustione costante pari al massimo valore che può essere raggiunto in relazione alle superfici di aerazione.

Infine vi è la fase di decadimento per esaurimento del combustibile (4) che termina con l'estinzione dell'incendio.

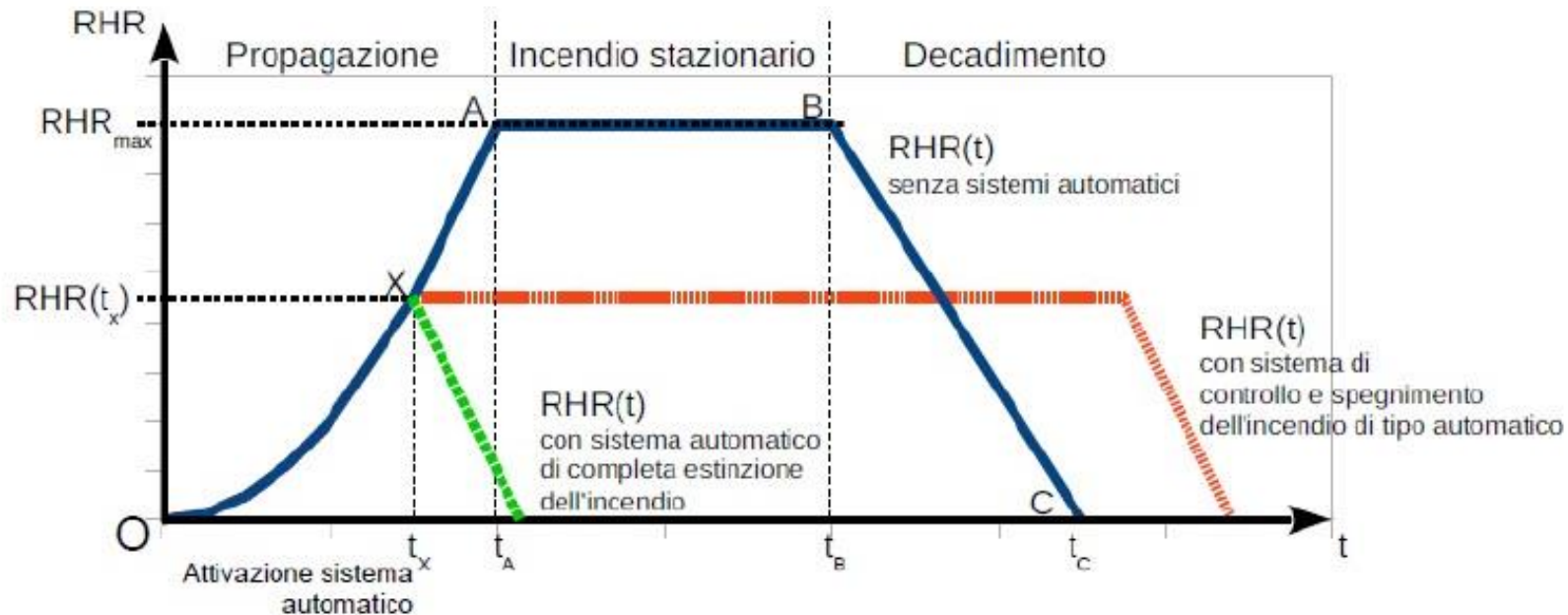




RHR Rate of Heat Released o HRR (Heat Release Rate): curva di rilascio termico

Stima della curva RHR 1/10

Le definizioni quantitative di seguito riportate, delle varie fasi dell'incendio, si riferiscono alla curva qualitativa sotto illustrata.





RHR Rate of Heat Released o HRR (Heat Release Rate): curva di rilascio termico

Stima della curva RHR 2/10

Fase di propagazione / di crescita dell'incendio

Durante la fase di propagazione, la potenza termica rilasciata dall'incendio al variare del tempo HRR(t) può essere rappresentata dalla seguente relazione:

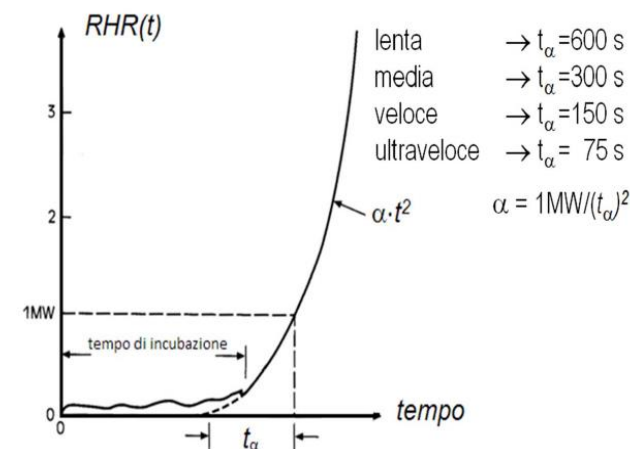
$$HRR(t) = 1.000 \times \left(\frac{t}{t_\alpha} \right)^2 \quad \text{per } t < t_\alpha$$

HRR(t) = è la potenza termica rilasciata dall'incendio (kW);

t = tempo (s);

t_α = tempo necessario affinché l'HRR raggiunga 1.000 kW.

t_α varia a seconda della velocità di combustione.



Tipologia	Rateo di crescita dell'incendio	t_α [s]
Abitazione	medio	300
Ospedale (locali)	medio	300
Hotel (stanze)	medio	300
Libreria	veloce	150
Ufficio	medio	300
Aula scolastica	medio	300
Centro commerciale	veloce	150
Teatro (cinema)	veloce	150
Trasporto (spazi pubblici)	basso	600

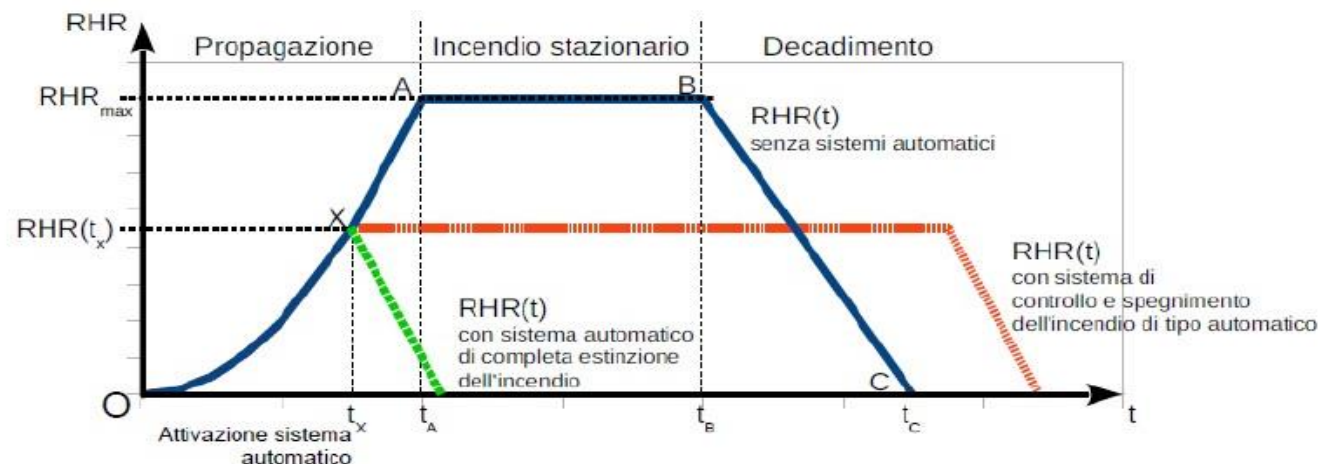


RHR Rate of Heat Released o HRR (Heat Release Rate): curva di rilascio termico

Stima della curva RHR 3/10

Effetto dei sistemi di protezione attiva antincendio

Se nell'attività sono previsti sistemi di controllo e spegnimento dell'incendio di tipo automatico (es. impianto sprinkler) l'andamento della potenza termica rilasciata $HRR(t)$ non raggiunge il valore massimo HRR_{MAX} , ma può essere assunta costante e pari al valore $HRR(t_x)$ raggiunto all'istante t_x di entrata in funzione dell'impianto automatico.





RHR Rate of Heat Released o HRR (Heat Release Rate): curva di rilascio termico

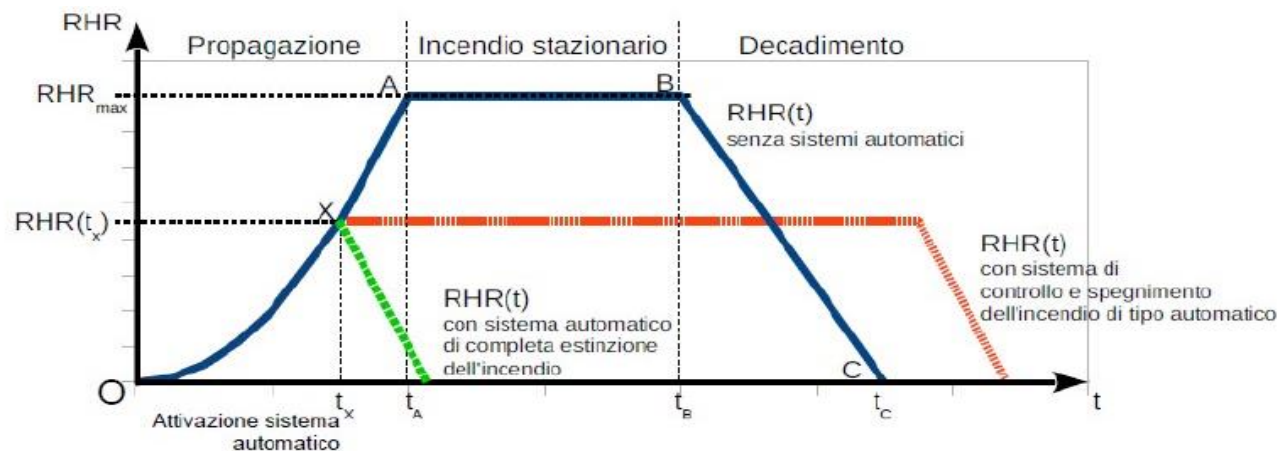
Stima della curva RHR 4/10

Fase dell'incendio stazionario

Se nell'attività non sono previsti sistemi di controllo e spegnimento dell'incendio di tipo automatico si suppone che dal tempo t_A al tempo t_B la potenza termica prodotta dall'incendio si stabilizzi al valore massimo HRR_{MAX} che sarà pari a:

$$HRR(t) = HRR_{MAX} \quad \text{per } t_A \leq t \leq t_B$$

Dove per t_B si intende il tempo finale della fase stazionaria dell'incendio e coincide con l'inizio della fase di decadimento.





RHR Rate of Heat Released o HRR (Heat Release Rate): curva di rilascio termico

Stima della curva RHR 5/10

La valutazione di HRR_{MAX} varia a seconda che l'incendio risulti controllato dal combustibile o dalla ventilazione. Nel primo caso, per un incendio controllato dal combustibile, come avviene per incendi all'aperto o in locali con elevata areazione, il valore di HRR_{MAX} può essere determinato dalla seguente relazione:

$$HRR_{MAX} = HRR_f \times A_f$$

dove:

HRR_f rappresenta il valore della potenza termica massima rilasciata, per unità di superficie lorda. Questa quantità esprime la massima velocità di rilascio di calore prodotta da 1 m² di fuoco in caso di incendio controllato dal combustibile (kW/m²).

A_f rappresenta la superficie lorda del locale in caso di distribuzione uniforme del carico d'incendio, oppure la superficie effettivamente occupata dal combustibile (m²).

Table E.5 — Fire growth rate and RHR_f for different occupancies

Max Rate of heat release RHR_f			
Occupancy	Fire growth rate	t_a [s]	RHR_f [kW/m ²]
Dwelling	Medium	300	250
Hospital (room)	Medium	300	250
Hotel (room)	Medium	300	250
Library	Fast	150	500
Office	Medium	300	250
Classroom of a school	Medium	300	250
Shopping centre	Fast	150	250
Theatre (cinema)	Fast	150	500
Transport (public space)	Slow	600	250



RHR Rate of Heat Released o HRR (Heat Release Rate): curva di rilascio termico

Stima della curva RHR 6/10

Se lo sviluppo dell'incendio risulta limitato dal valore della superficie di ventilazione, come generalmente succede in locali con superfici di ventilazione ordinaria, allora il valore di HRR_{MAX} deve essere ridotto in conseguenza della quantità di comburente disponibile che può affluire dalle superfici di ventilazione presenti nella fase di post-flashover. In tal caso, se le pareti del locale presentano solo aperture verticali, è possibile determinare il valore di HRR_{MAX} ridotto tramite la seguente espressione semplificata:

$$HRR_{MAX} = 0,1 * m * H_u * A_v * \sqrt{H_{eq}}$$

dove:

m = fattore di partecipazione alla combustione del materiale pari a 0,8 per il legno o altri materiali di natura cellulosa ed 1 per altri materiali combustibili.

H_u = potere calorifico del legno assunto pari a 17.500 (kJ/kg).

A_v = area totale delle aperture verticali in tutte la pareti del locale (m²).

H_{eq} = altezza equivalente delle aperture verticali che si calcola con la seguente relazione: $H_{eq} = \frac{\sum(A_{v_i} * h_i)}{A_v}$.

A_{v_i} = area dell'apertura verticale i – esima (m²);

h_i = altezza dell'apertura verticale i – esima (m).



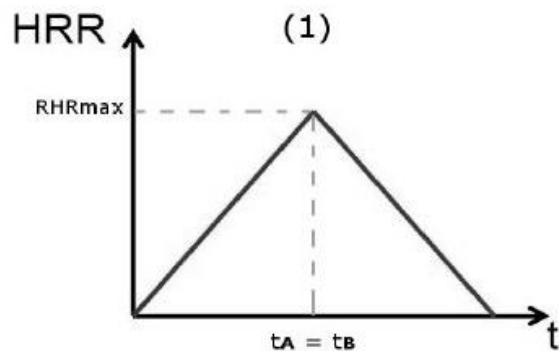
RHR Rate of Heat Released o HRR (Heat Release Rate): curva di rilascio termico

Stima della curva RHR 7/10

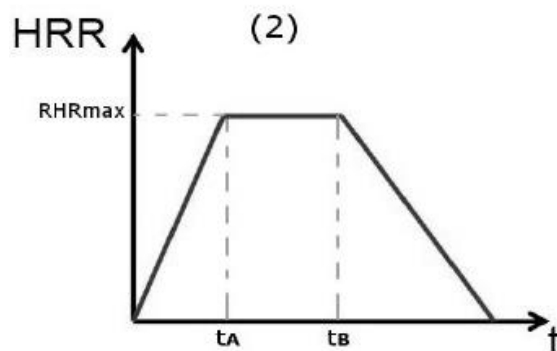
Una volta calcolato il valore di RHR_{MAX} , possiamo calcolare i tempi t_A e t_B di inizio e fine della fase stazionaria dell'incendio.

$$t_A = \sqrt{HRR_{MAX} * \frac{t_{\alpha}^2}{1.000}}$$

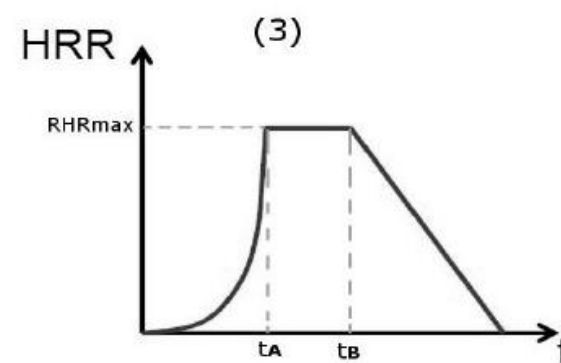
La curva RHR può presentare delle forme differenti quali quelle rappresentate nei seguenti grafici:



Incendio che non presenta la fase stazionaria



Incendio tipico con susseguirsi delle 3 fasi ma con fase di crescita lineare



Incendio tipico con susseguirsi delle 3 fasi ma con fase di crescita parabolica



RHR Rate of Heat Released o HRR (Heat Release Rate): curva di rilascio termico

Stima della curva RHR 8/10

La fase d'incendio stazionaria termina al tempo t_B , inizio della fase di decadimento, in cui il 70% dell'energia termica inizialmente disponibile « $q_f \cdot A_f$ » è stata rilasciata nel locale.

dove:

q_f = carico d'incendio specifico (kJ/kg);

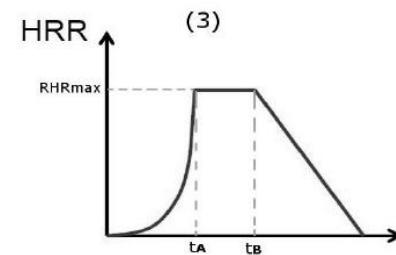
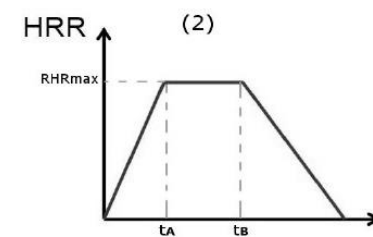
A_f = rappresenta la superficie lorda del locale in caso di distribuzione uniforme del carico d'incendio, oppure la superficie effettivamente occupata dal combustibile (m²).

Se l'energia termica inizialmente disponibile è sufficiente affinché l'incendio superi la fase di crescita e raggiunga l'energia termica massima HRR_{MAX} , allora si verifica che:

$$70\% * q_f * A_f \geq \frac{1}{3} * \frac{1.000}{t_\alpha^2} * t_A^3$$

e il tempo t_B di fine della fase stazionaria si calcola con la seguente espressione:

$$t_B = t_A + \frac{70\% * q_f * A_f - \frac{1.000}{3 * t_\alpha^2} * t_A^3}{HRR_{MAX}}$$

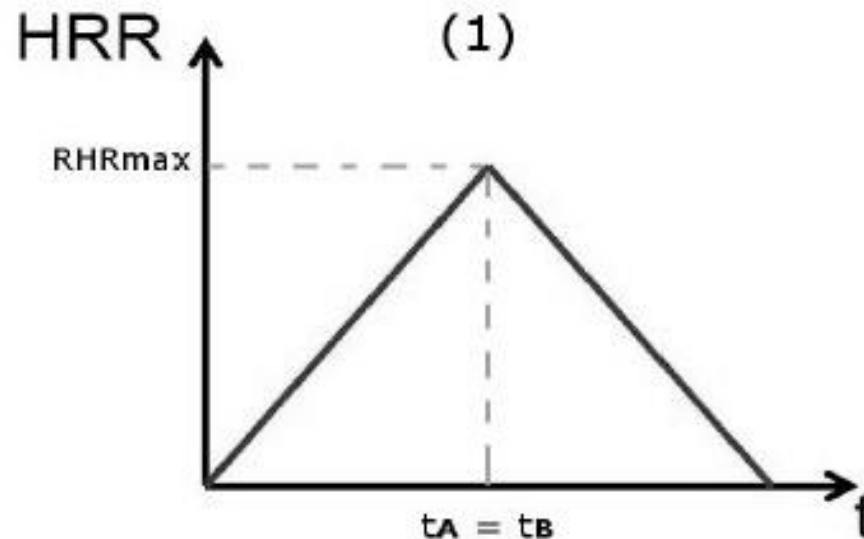




RHR Rate of Heat Released o HRR (Heat Release Rate): curva di rilascio termico

Stima della curva RHR 9/10

Se l'energia termica inizialmente disponibile non è sufficiente affinché l'incendio superi la fase di crescita, la curva HRR raggiunge il valore massimo per qualche secondo e poi passa direttamente nella fase di decadimento ($t_A = t_B$).





RHR Rate of Heat Released o HRR (Heat Release Rate): curva di rilascio termico

Stima della curva RHR 10/10

Fase di decadimento dell'incendio

Il tempo t_C , trascorso il quale la potenza termica rilasciata dall'incendio si annulla, viene calcolata considerando che nella fase di decadimento è consumato il restante 30% dell'energia termica inizialmente disponibile. Possiamo calcolare il tempo con potenza termica nulla t_C con la seguente espressione:

$$t_C = t_B + \frac{2 * 30\% * q_f * A_f}{HRR_{MAX}}$$

Durante la fase di decadimento l'andamento della potenza prodotta dall'incendio è lineare ed il suo valore, al variare del tempo vale specificatamente:

$$HRR(t) = HRR_{MAX} * \frac{(t_C - t)}{(t_C - t_B)} \quad \text{per } t_B \leq t \leq t_C$$



INTERPRETAZIONE DEI SEGNI LASCIATI DA UN INCENDIO

Generalità 1/3

La maggior parte dei segni (effetti visibili o misurabili che rimangono dopo un incendio in ambienti chiusi) vengono registrati su superfici bidimensionali nel luogo in cui dette superfici intersecano il fuoco a sviluppo tridimensionale.

I segni possono essere causati da radiazione termica (irraggiamento), per contatto con lo strato di gas caldi o per contatto diretto delle fiamme.

Considerata l'estrema complessità del fenomeno incendio, l'interpretazione «univoca» dei segni di danno termico lasciati dall'incendio è tutt'altro che semplice. Risulta difatti assai difficoltoso pervenire alla determinazione dell'area di origine ed alla spiegazione della possibile dinamica.





INTERPRETAZIONE DEI SEGNI LASCIATI DA UN INCENDIO

Generalità 2/3

I segni più frequenti sono:

- ★ Segno a cono rovesciato (vertice in alto).
- ★ Segni a colonna.
- ★ Segni a clessidra.
- ★ Segni a «V» (vertice in basso).
- ★ Segni a «U».
- ★ Carbonizzazione del legno, materiali plastici e vetri.
- ★ Segni da liquidi infiammabili.
- ★ Linee di demarcazione (orizzonti di fumo).
- ★ Orizzonti di fumo e di calore.
- ★ Combustione pulita.
- ★ Segni di protezione.



INTERPRETAZIONE DEI SEGNI LASCIATI DA UN INCENDIO

Generalità 3/3

Sequenza con la quale tendono a svilupparsi i segni.

Incendi senza flashover:

- ★ Segno a cono rovesciato sui muri od oggetti.
- ★ Segno a colonna.
- ★ Segno a clessidra.
- ★ Segno a «V».
- ★ Segno a «U».

Incendi post-flashover:

- ★ Negli incendi in cui è avvenuto il flashover difficilmente la forma dei segni è prevedibile. Si possono formare segni a V che spesso vengono confusi ed erroneamente interpretati come punti di origine dell'incendio.

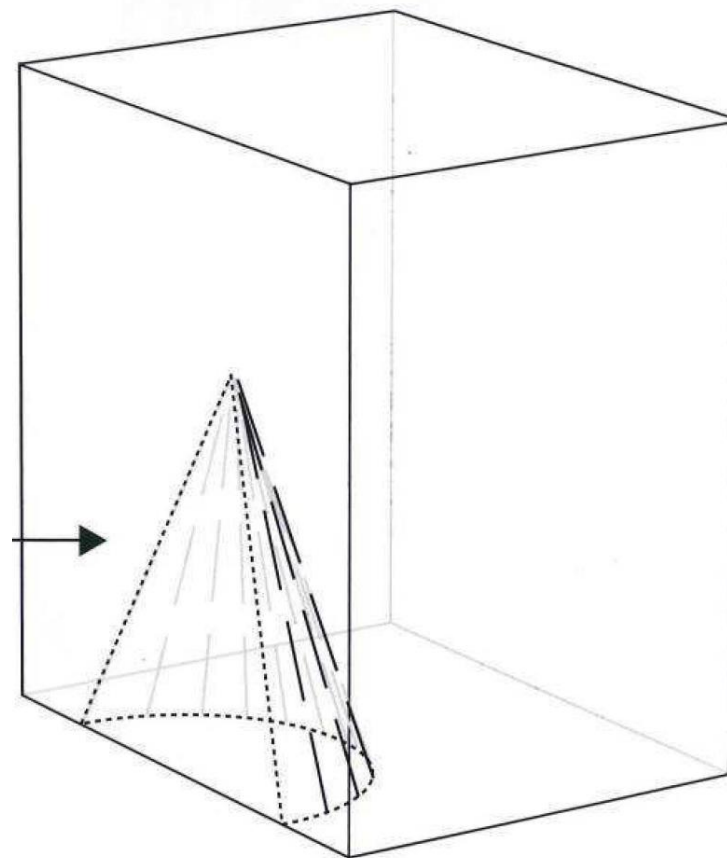


INTERPRETAZIONE DEI SEGNI LASCIATI DA UN INCENDIO

Segno a cono rovesciato (inverted cone pattern) 1/3

Se si considera la fiamma dell'incendio nella sua fase iniziale si può visualizzare un cono rovesciato, che riflette generalmente la forma della fiamma (cono tridimensionale che rappresenta l'energia termica creata da un incendio che produce segni bidimensionali sugli oggetti e sulle pareti che interseca).

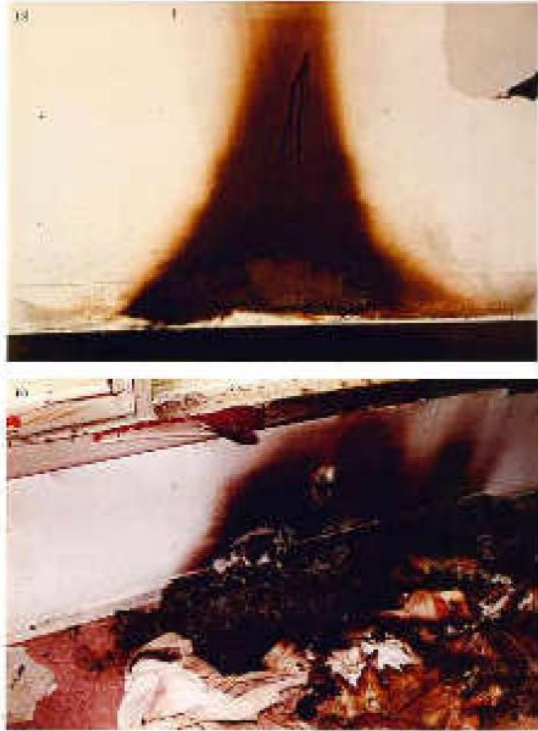
Questo segno lo si trova, solitamente quando l'incendio dopo la sua fase incipiente, non si sviluppa ulteriormente. I segni a cono rovesciato sono quindi il risultato di incendi non completamente sviluppati.



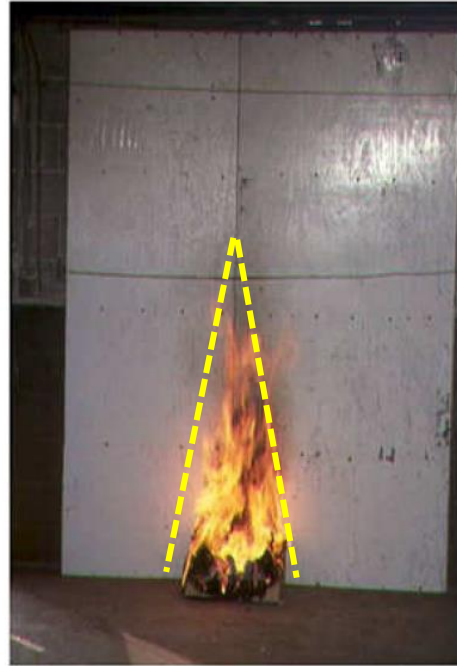


INTERPRETAZIONE DEI SEGNI LASCIATI DA UN INCENDIO

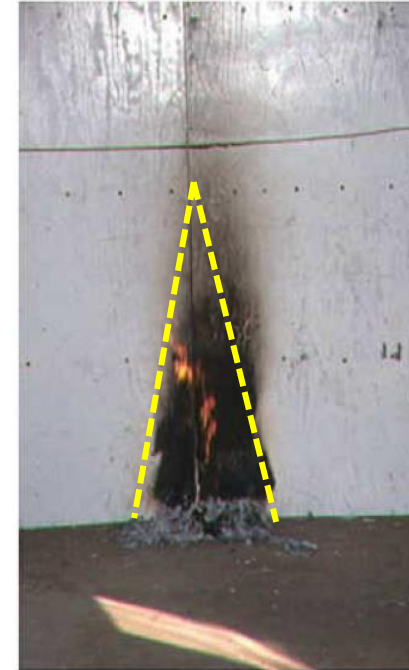
Segno a cono rovesciato (inverted cone patterns) 2/3



Segno a cono rovesciato:
notare il triangolo sul muro e il
segno semicircolare sul
pavimento



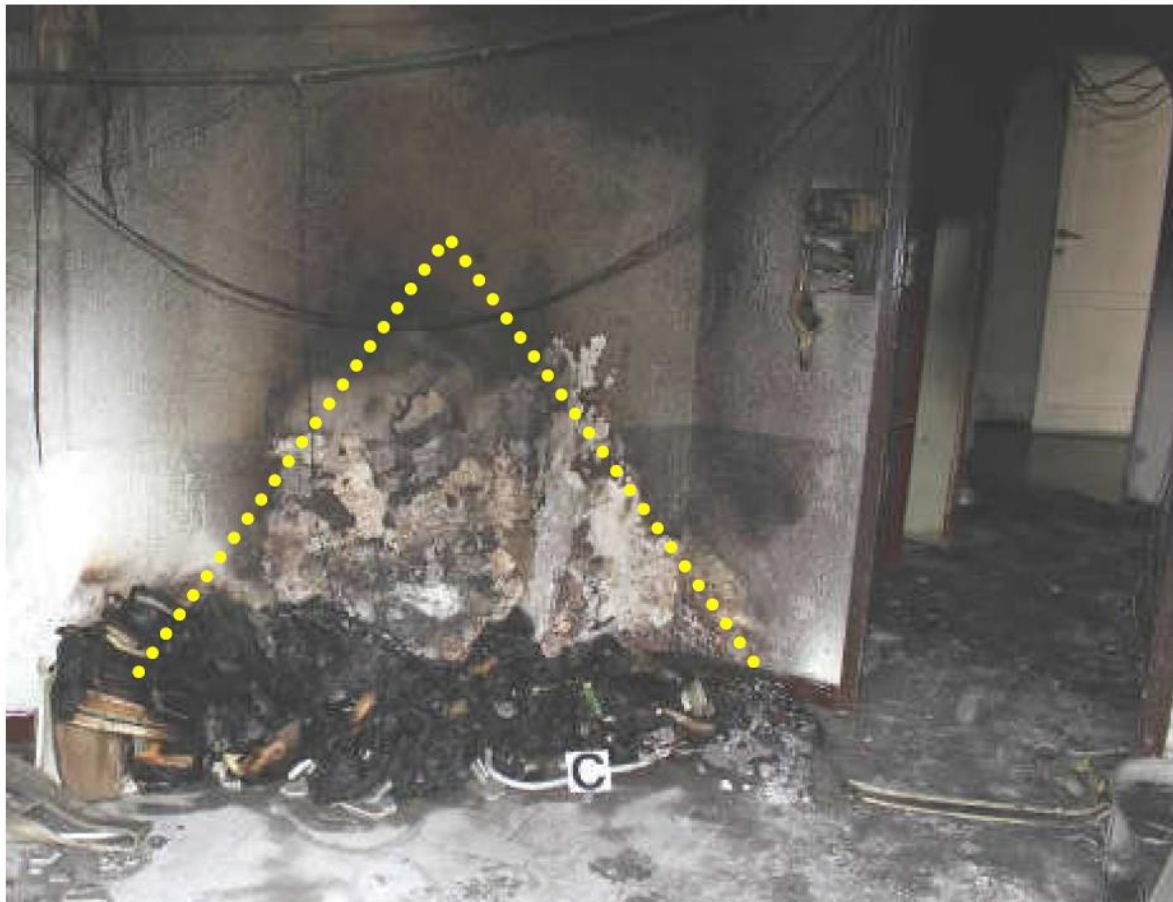
Segno a cono rovesciato: carta bruciata a 12 cm
di distanza dalla parete





INTERPRETAZIONE DEI SEGNI LASCIATI DA UN INCENDIO

Segno a cono rovesciato (inverted cone patterns) 3/3



Altro caso di segno a cono rovesciato

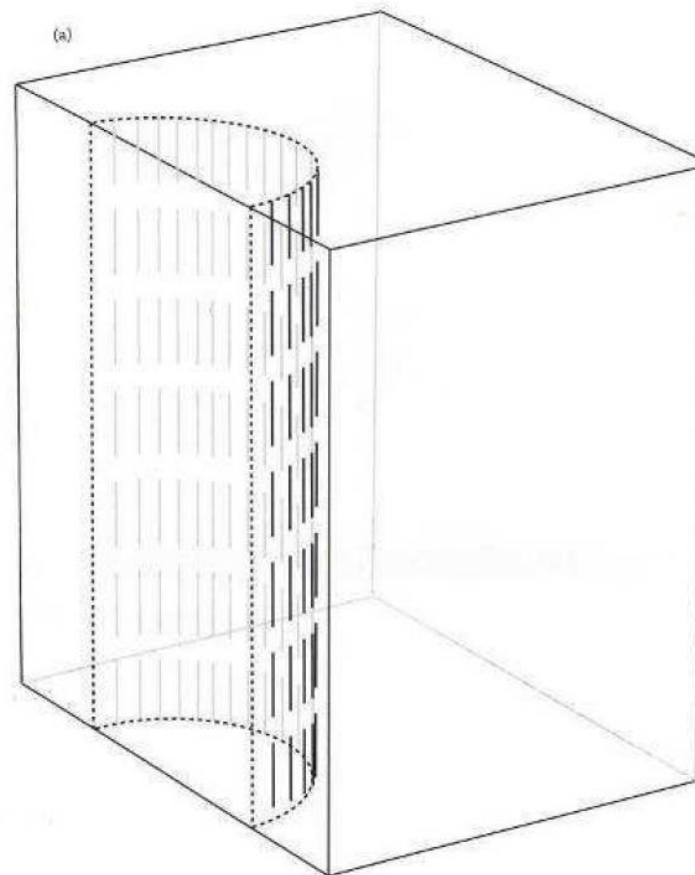


INTERPRETAZIONE DEI SEGNI LASCIATI DA UN INCENDIO

Segno a colonna 1/2

Man mano che il fuoco progredisce, i prodotti della combustione vengono inviati verso l'alto assumendo la forma di una colonna che, intersecando una parete produce un segno verticale con lati approssimativamente paralleli.

Poiché la forma del segno cambia quando la colonna interagisce con il soffitto i segni a colonna hanno vita breve e non sono frequenti.





INTERPRETAZIONE DEI SEGNI LASCIATI DA UN INCENDIO

Segno a colonna 2/2



L'incendio che ha causato i segni raffigurati nelle fotografie è stato spento prima che avesse il tempo per interagire con il soffitto

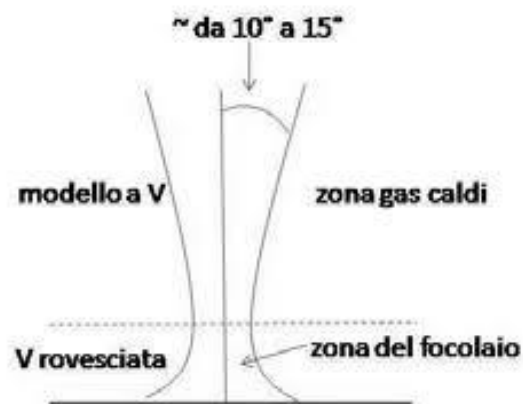


INTERPRETAZIONE DEI SEGNI LASCIATI DA UN INCENDIO

Segno a clessidra

Si tratta di un segno non molto frequente, che si può trovare per esempio quando viene versato del liquido infiammabile accanto ad una parete verticale.

In genere questi segni si sviluppano nel breve lasso di tempo che intercorre tra il passaggio da un segno a colonna ad un segno a «V».





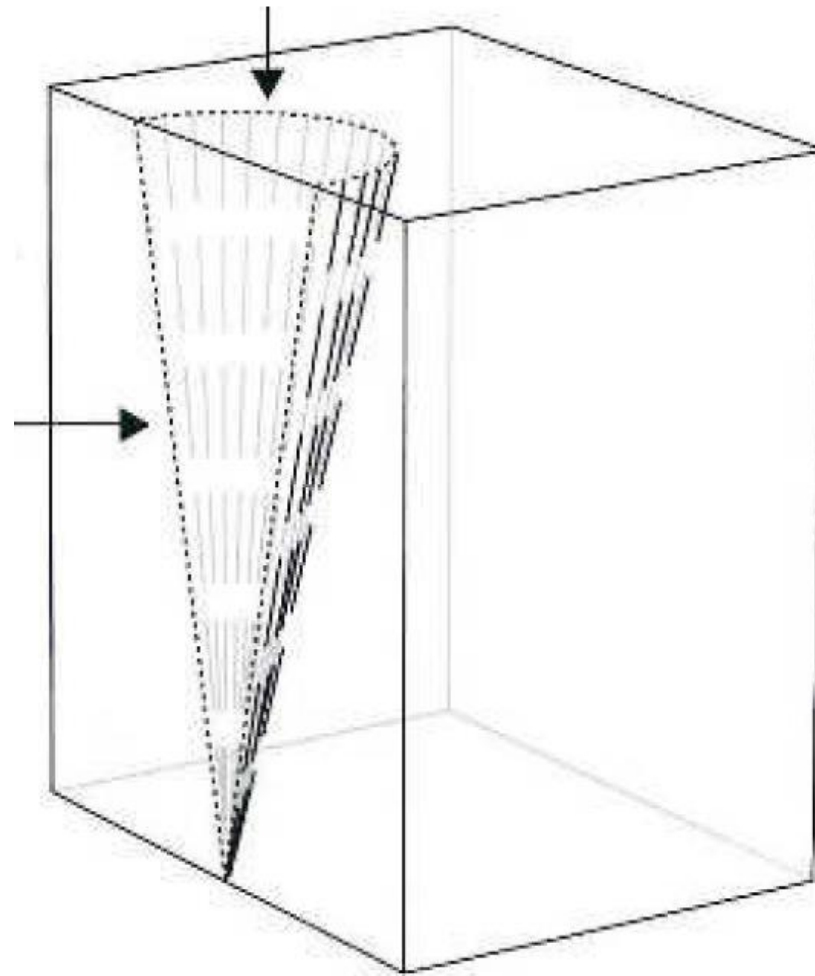
INTERPRETAZIONE DEI SEGNI LASCIATI DA UN INCENDIO

Segno a «V» 1/2

Di solito, se il fuoco non si spegne, i segni a colonna ed a clessidra, pur prodotti da incendi più sviluppati di quelli che producono segni a cono rovesciato, evolvono ulteriormente.

Se l'incendio non viene estinto in tempi brevi, il «pennacchio (plume)» dei fumi (se indisturbato) assume la forma di un cono a causa dell'interazione del soffitto sulla fiamma.

Questo cono produce un segno a V se la base del pennacchio è molto vicina o a contatto con la parete.





INTERPRETAZIONE DEI SEGNI LASCIATI DA UN INCENDIO

Segno a «V» 2/2

La seguente fotografia mostra un tipico segno a V nel punto di origine di un incendio dove inizialmente era bruciato un cestino.

Un segno a V può indicare (ma non sempre) il punto di origine dell'incendio.

Tuttavia bisogna sempre tener presente che non è possibile a priori definire una regola generale che valga sempre in ogni caso (importanti effetti sulla forma della fiamma dipendono dalle condizioni al contorno e tra queste, in particolare la ventilazione in prossimità della parete).

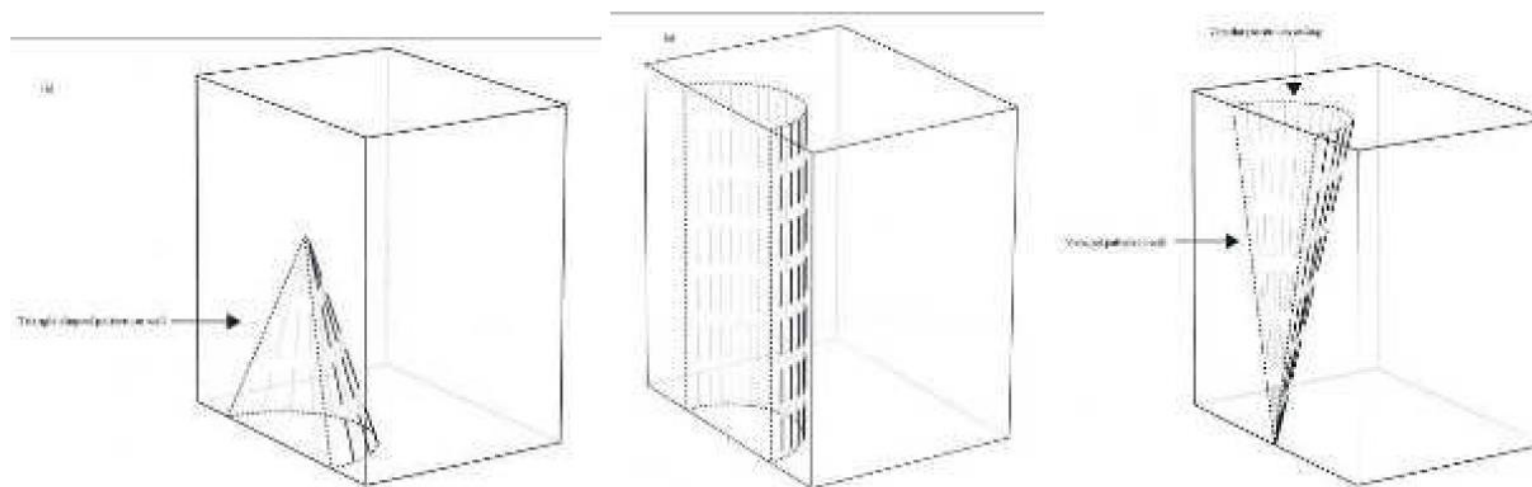




INTERPRETAZIONE DEI SEGNI LASCIATI DA UN INCENDIO

Sequenza con la quale il pennacchio cambia forma modificando i segni che produce

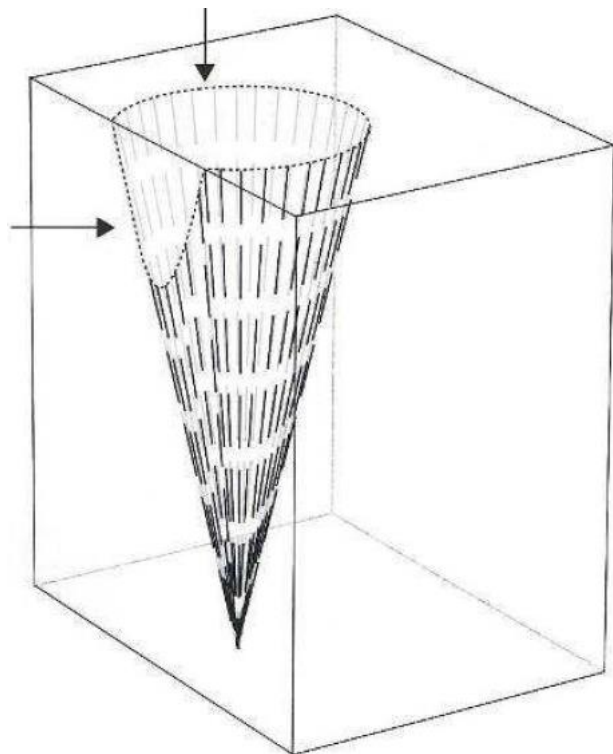
- ★ Si parte con un cono rovesciato che produce un segno triangolare sulla parete.
- ★ Se il fuoco ha modo di svilupparsi il pennacchio assume la forma di una colonna che produce un segno con lati verticali ed approssimativamente paralleli.
- ★ Se l'incendio si sviluppa ulteriormente, il pennacchio assumerà una forma a cono, per l'interazione del soffitto sulla fiamma che farà comparire il segno a V.





INTERPRETAZIONE DEI SEGNI LASCIATI DA UN INCENDIO

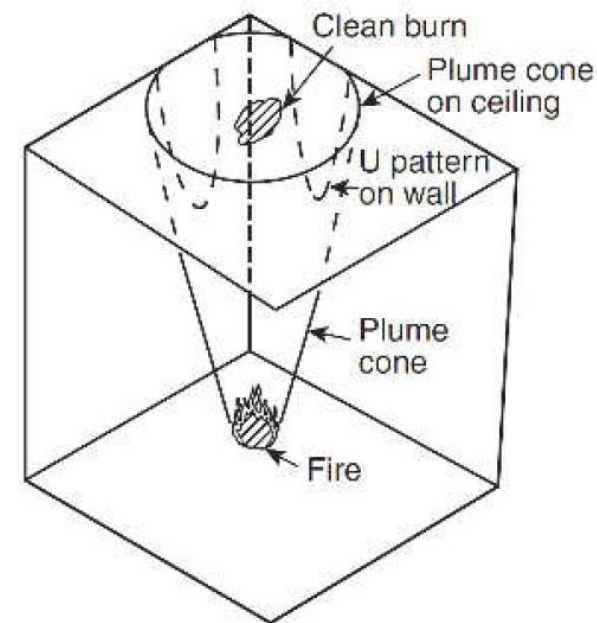
Segno ad «U» 1/2



Immaginiamo ora un incendio in cui la base del pennacchio non è più a contatto o molto vicina alla parete ma spostata più lontano dalla stessa.

L'intersezione del cono dei fumi avverrà nella parte superiore dove si produrrà un caratteristico segno a forma di «U». Sul soffitto avremo invece un segno di bruciatura a forma di cerchio completo se il pennacchio non si interseca con le pareti.

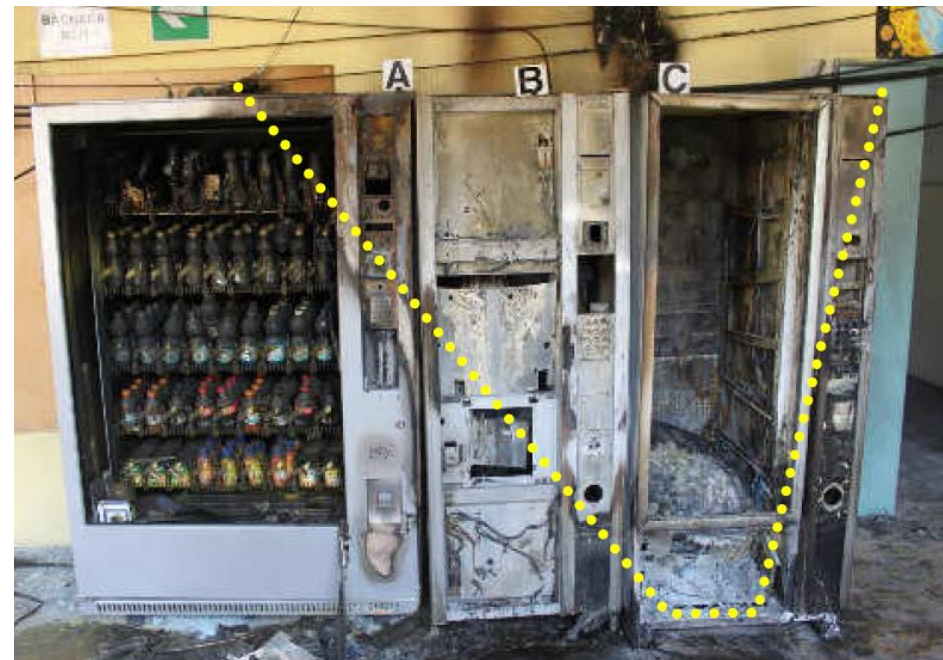
Se l'incendio, invece, è vicino ad un angolo del locale, l'intersezione del cono interesserà due pareti e lascerà su entrambe un segno ad «U».





INTERPRETAZIONE DEI SEGNI LASCIATI DA UN INCENDIO

Segno ad «U» 2/2



Esempi di incendio che hanno lasciato segni ad «U» sulla parete



INTERPRETAZIONE DEI SEGNI LASCIATI DA UN INCENDIO

Considerazioni

La complessità della lettura dei segni lasciati dall'incendio è legata all'evoluzione dinamica dell'evento nel corso della quale, può avvenire la perdita (o sovrapposizione dell'uno sull'altro) dei segni inizialmente formati per effetto della combustione dei primi materiali a favore di altri segni che si determinano in seguito, ad esempio alla combustione di altri materiali verso i quali l'incendio si propaga in fasi successive a quelle iniziali.

In sostanza, l'osservazione di un singolo segno lasciato dall'incendio spesso non può, da sola, consentire di determinare la zona d'origine dell'incendio stesso. Al contrario, è la lettura dell'insieme dei segni lasciati dall'incendio che può fornire, se correttamente interpretati, talune precise indicazioni sulla dinamica dell'incendio.

Sicuramente molto ardua è la lettura dei segni che vengono generati dopo che il locale è rimasto coinvolto completamente dalle fiamme (post-flashover, ovvero incendio generalizzato).



INTERPRETAZIONE DEI SEGNI LASCIATI DA UN INCENDIO

Carbonizzazione del legno 1/2

La carbonizzazione (char) del legno è un segno che spesso si trova in uno scenario d'incendio e l'analisi della sua profondità può fornire informazioni utili.





INTERPRETAZIONE DEI SEGNI LASCIATI DA UN INCENDIO

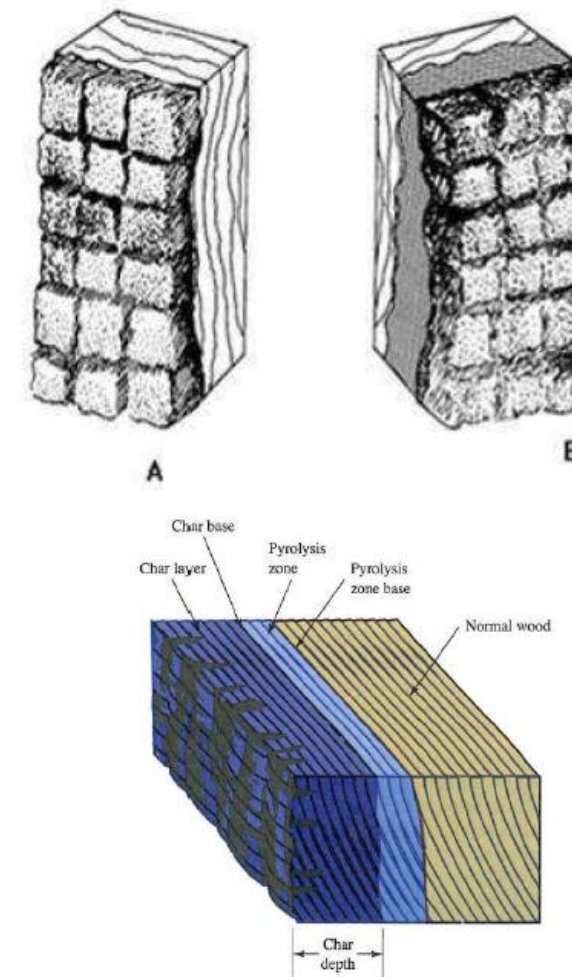
Carbonizzazione del legno 2/2

Occorre tuttavia tener conto del fatto che la velocità della carbonizzazione dipende da numerosi fattori, tra i quali:

- ★ Intensità del fuoco e del calore.
- ★ Durata dell'esposizione.
- ★ Ventilazione.
- ★ Tipo di legno.
- ★ Orientamento delle fibre.
- ★ Superficie coinvolta.

Non è possibile stabilire un tempo di esposizione specifico basandosi esclusivamente sulla profondità della carbonizzazione che può comunque fornire alcune indicazioni sulla rapidità o meno dell'incendio.

Il campione di legno evidenziato con la lettera «A» indica una combustione rapida, suggerita dalla netta linea di demarcazione tra la parte carbonizzata e la parte non bruciata. Il campione con la lettera «B» invece, mostra i segni di una combustione lenta, evidenziata dal passaggio graduale dall'area carbonizzata all'area non bruciata.





INTERPRETAZIONE DEI SEGNI LASCIATI DA UN INCENDIO

Screpolature a «pelle di coccodrillo»

Il legno combusto presenta una superficie esterna a «pelle di coccodrillo» che, in passato, era giudicata come l'indicazione di un incendio veloce e caldissimo che suggeriva il possibile utilizzo di un liquido accelerante.

Le attuali conoscenze portano a ritenere invece che non vi è alcuna prova scientifica di una tale correlazione e che possiamo osservare questo tipo di screpolatura in molti tipi di incendio.





INTERPRETAZIONE DEI SEGNI LASCIATI DA UN INCENDIO

Materiali plastici 1/2

Uno dei materiali più diffusi che si trova comunemente in tutti gli edifici, in oggetti e componenti di varia natura è la plastica. Di conseguenza, è di fondamentale importanza conoscere il comportamento al fuoco dei materiali plastici.

I materiali plastici sono quasi tutti costituiti da lunghe catene di idrocarburi collegate tra di loro in vari modi, pertanto un apporto di calore può essere sufficiente a rompere i legami chimici che tengono assieme le catene.

La plastica pirolizza formando composti più semplici, volatili e infiammabili.

I materiali termoplastici (ovvero quelli che si ammorbidiscono fino a liquefare se esposti al calore per poi indurire in un successivo raffreddamento) ad alte temperature iniziano a gocciolare (fondono).

Se le gocce sono incendiate, cadendo sul pavimento possono accendere nuove fiamme.





INTERPRETAZIONE DEI SEGNI LASCIATI DA UN INCENDIO

Materiali plastici 2/2

Nel corso degli incendi, i lucernari, i paralumi ed i lampadari in plastica, possono essere innescati e gocciolare a seguito delle temperature che si raggiungono a soffitto. Poiché questi oggetti bruciando fondono e danno luogo a gocciolamenti di materiale infiammato, possono a loro volta produrre isolati punti di origine. Attenzione a non farsi fuorviare da questi numerosi focolai separati attribuendoli ad una causa dolosa.



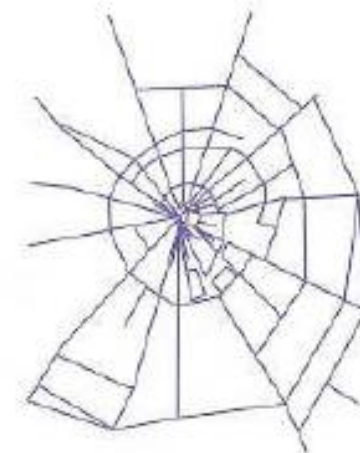
Prova di reazione al fuoco al pannello radiante
«effetto di gocciolamento di materiali termoplastici»



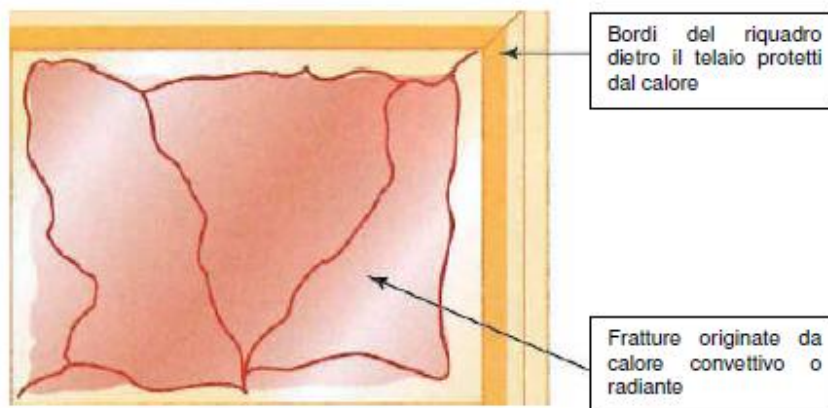
INTERPRETAZIONE DEI SEGNI LASCIATI DA UN INCENDIO

Vetri 1/3

Un impatto meccanico produce tipicamente la rottura di un vetro (non rinforzato e non temperato) con linee di frattura radiali e concentriche.



Rottura meccanica di un vetro



Rottura termica di un vetro

Il vetro, quando riscaldato, si espande sia per effetto del calore convettivo che radiante, per cui può rompersi con fratture che tendono a formare linee casuali (solitamente parallele ai bordi del telaio di contenimento).



INTERPRETAZIONE DEI SEGNI LASCIATI DA UN INCENDIO

Vetri 2/3



Vetri di finestre rotti a causa di una sollecitazione termica



INTERPRETAZIONE DEI SEGNI LASCIATI DA UN INCENDIO

Vetri 3/3

Altre informazioni possono ricavarsi dalla posizione dei frammenti di vetro nei residui dell'incendio.

Frammenti di vetro, con (relativa) poca fuliggine, trovati sul pavimento di un locale, con tutti i detriti dell'incendio posti su di essi, indicano, che la finestra si è probabilmente rotta prima dell'incendio.

Al contrario, frammenti di vetro posti alla sommità di detriti dell'incendio, indicano una più probabile rottura avvenuta durante la sovra-pressione causata dall'incendio.

Il vetro temprato, presente nei veicoli e in molti serramenti, è realizzato trattando il vetro per ottenere maggiore resistenza alla rottura meccanica. Quando si rompe, questo vetro si frantuma in numerosi blocchi cubici. In generale per questa tipologia di vetro non è possibile comprendere se la rottura è stata originata da urti meccanici o da sollecitazioni termiche.



INTERPRETAZIONE DEI SEGNI LASCIATI DA UN INCENDIO

Liquidi infiammabili 1/5

Nel caso di incendi provocati da liquidi infiammabili ci si può imbattere in segni a cono rovesciato o a clessidra lasciati sulle pareti.

Ci sono altri segni tipici che si possono riscontrare, in particolare sui pavimenti senza tuttavia dimenticare che segni simili possono essere il risultato di un «floor jet», nel caso di un incendio a ventilazione controllata o possono essere provocati dal gocciolamento di materiale fuso o dalla caduta di detriti infiammati o carbonizzati.



INTERPRETAZIONE DEI SEGNI LASCIATI DA UN INCENDIO

Liquidi infiammabili 2/5

POSSIBILI SEGNI SUI PAVIMENTI LASCIATI DA LIQUIDI INFIAMMABILI



Pavimento
In cemento



Pavimento
In parquet



Pavimento
In piastrelle in vinile

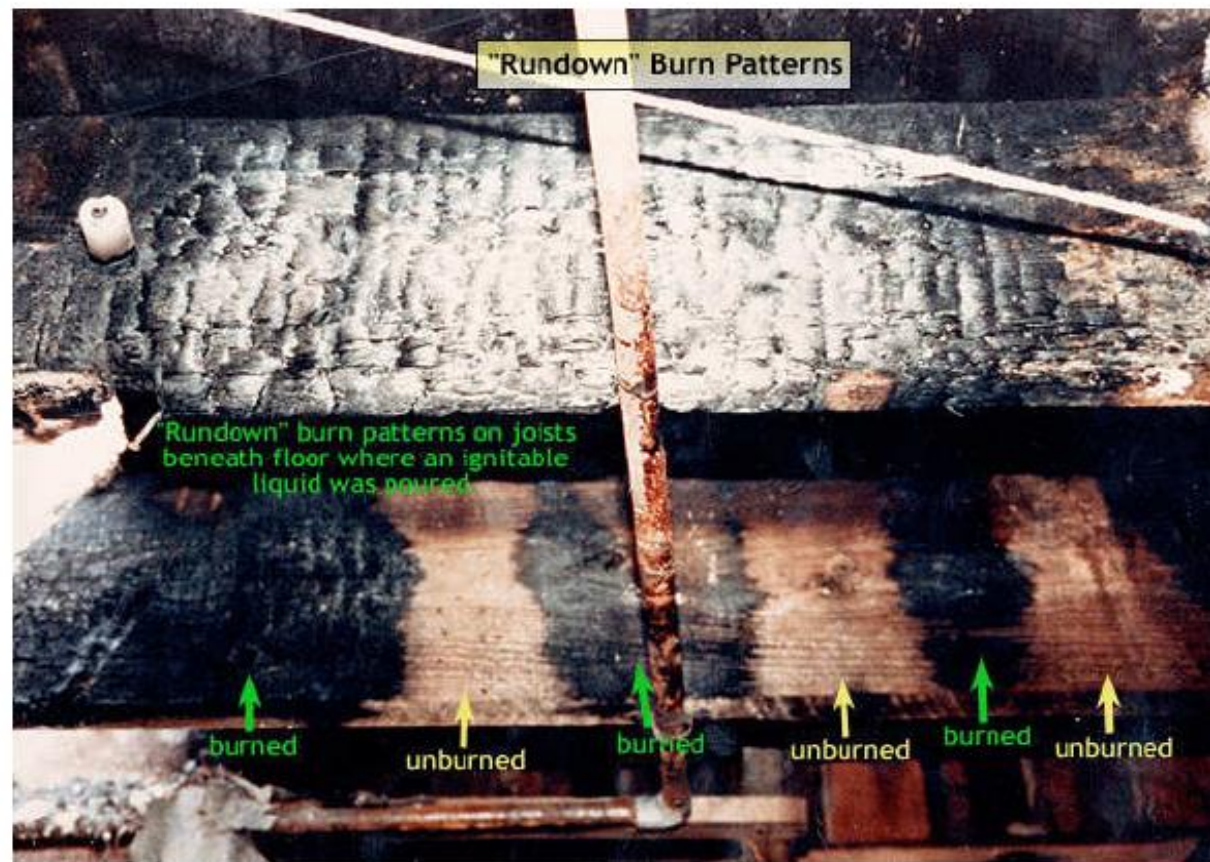


INTERPRETAZIONE DEI SEGNI LASCIATI DA UN INCENDIO

Liquidi infiammabili 3/5

MACCHIE DI SCORRIMENTO (RUNDOWN BURN PATTERNS)

Sono le macchie bruciate provocate da un liquido infiammabile che è stato cosparso e che poi scorre su una superficie verticale. Nell'immagine si vedono i segni prodotti su alcuni travetti sotto un pavimento sul quale è stato versato liquido infiammabile.





INTERPRETAZIONE DEI SEGNI LASCIATI DA UN INCENDIO

Liquidi infiammabili 4/5

Nel caso in cui ci si imbatta in segni che fanno supporre un incendio di natura dolosa, è importante osservare se vi è stata un'elevata velocità di propagazione dell'incendio, se ci sono segni riconducibili a focolai numerosi e diffusi, se la presenza delle tracce di combustione è più marcata ai livelli più bassi degli ambienti interessati, se vi è presenza di contenitori «sospetti» (taniche, bottiglie, ecc.) e di segni di effrazione su porte e finestre.

Nell'immagine di fianco riportata sono evidenziati i segni prodotti da un incendio simulato da un contenitore di plastica riempito di benzina posizionato nel punto ⑤ e innescato con un accendino elettrico.

- ① linea di demarcazione;
- ② calcinazione (disidratazione dell'intonaco);
- ③ perdita di materiale;
- ④ rottura del vetro;
- ⑥ segno di penetrazione sul soffitto;
- ⑦ Area di combustione pulita (clean burn).





INTERPRETAZIONE DEI SEGNI LASCIATI DA UN INCENDIO

Liquidi infiammabili 5/5

Di lato vediamo un grande segno circolare sul pavimento, solitamente riconducibile ad un incendio causato dal versamento di un liquido infiammabile, ma che può anche essere provocato dalla caduta di detriti bruciati o dal «gocciolamento» di materiale combustibile che brucia, come ad esempio plafoniere in plastica.





INTERPRETAZIONE DEI SEGNI LASCIATI DA UN INCENDIO

Linee di demarcazione

Si tratta di segni o meglio di linee più o meno nette che «separano» la porzione bruciata dalle aree non bruciate di una parete. In genere si formano a causa del calore e per la deposizione di fuliggine ed altri residui della combustione.



Esempio di linea di demarcazione provocata dal fumo



INTERPRETAZIONE DEI SEGNI LASCIATI DA UN INCENDIO

Orizzonti di fumo e di calore 1/2

Anche gli orizzonti di fumo e di calore sono delle linee di demarcazione.

Gli orizzonti di fumo appaiono come segni di fumo orizzontale (paralleli al soffitto ed al pavimento) prodotti sulle pareti dallo strato di fumi caldi.



Sono segni che spesso non sopravvivono al flashover perché in questo caso lo strato di gas caldi scende al livello del pavimento (si può quindi ritenere in questi casi che il flashover non si sia verificato).



INTERPRETAZIONE DEI SEGNI LASCIATI DA UN INCENDIO

Orizzonti di fumo e di calore 2/2

La seguente foto illustra la linea di demarcazione nota come «orizzonte di calore», prodotta dallo strato dei fumi caldi quando ancora l'incendio era confinato. Il segno sulle pareti si è prodotto, quindi, prima che il tetto bruciasse.





INTERPRETAZIONE DEI SEGNI LASCIATI DA UN INCENDIO

Combustione pulita (clean burn)

La combustione pulita viene descritta come un fenomeno che appare sulle superfici non combustibili (pareti o superfici metalliche) quando i prodotti della combustione (fuliggine, prodotti di pirolisi) che normalmente si sarebbero trovati aderenti alla superficie, vengono bruciati. In tal caso si osserverà una superficie pulita adiacente alle zone annerite dai prodotti della combustione, prodotta dal contatto diretto della fiamma o dall'intenso calore irradiato (temperature > 500 °C).



Superfici non a contatto con la fiamma raramente raggiungono temperature sufficientemente elevate da consentire la combustione completa della fuliggine e degli altri prodotti della combustione.



INTERPRETAZIONE DEI SEGNI LASCIATI DA UN INCENDIO

Segni di protezione

Poco prima del flashover l'irraggiamento diventa il meccanismo predominante di trasmissione del calore ed i segni sono prodotti quando le superfici sono riscaldate o accese dalla radiazione termica.

I bordi di tali segni sono spesso coincidenti con i bordi degli oggetti che proiettano un'ombra o che giacevano direttamente su una superficie, impedendo alla radiazione termica di raggiungerla. Tali segni sono noti come «segni di protezione». Un altro tipo di segno di protezione è quello provocato dagli oggetti che, nel caso di un incendio, bloccano la deposizione di fumo sulle superfici (di solito pareti).



Segno di protezione originatosi per la presenza di un mobiletto accostato alla parte e poi rimosso, accanto al quale è anche presente un segno a V di combustione pulita



INDIVIDUAZIONE DEL PUNTO D'ORIGINE DI UN INCENDIO E DIREZIONE DI PROPAGAZIONE DEL FUOCO

Individuazione del punto d'origine di un incendio

L'individuazione della zona d'origine di un incendio è un'operazione estremamente complessa che dipende fortemente dall'interazione tra l'incendio e la struttura nella quale il fenomeno si è sviluppato oltre che, ovviamente, dalla conoscenza delle proprietà fisiche dei materiali coinvolti e dal loro comportamento al fuoco.

Nell'ambito di un'indagine sulle cause e sulla dinamica di un incendio è di fondamentale importanza poter ricostruire, per quanto possibile (attesa la natura distruttiva dell'evento) la configurazione iniziale dello stato dei luoghi, in termini di geometria dei locali, ventilazione degli stessi, tipologia, quantità e natura dei materiali combustibili presenti.



INDIVIDUAZIONE DEL PUNTO D'ORIGINE DI UN INCENDIO E DIREZIONE DI PROPAGAZIONE DEL FUOCO

Direzione di propagazione di un incendio 1/2

Le linee di demarcazione delle seguenti fotografie indicano la provenienza del calore.

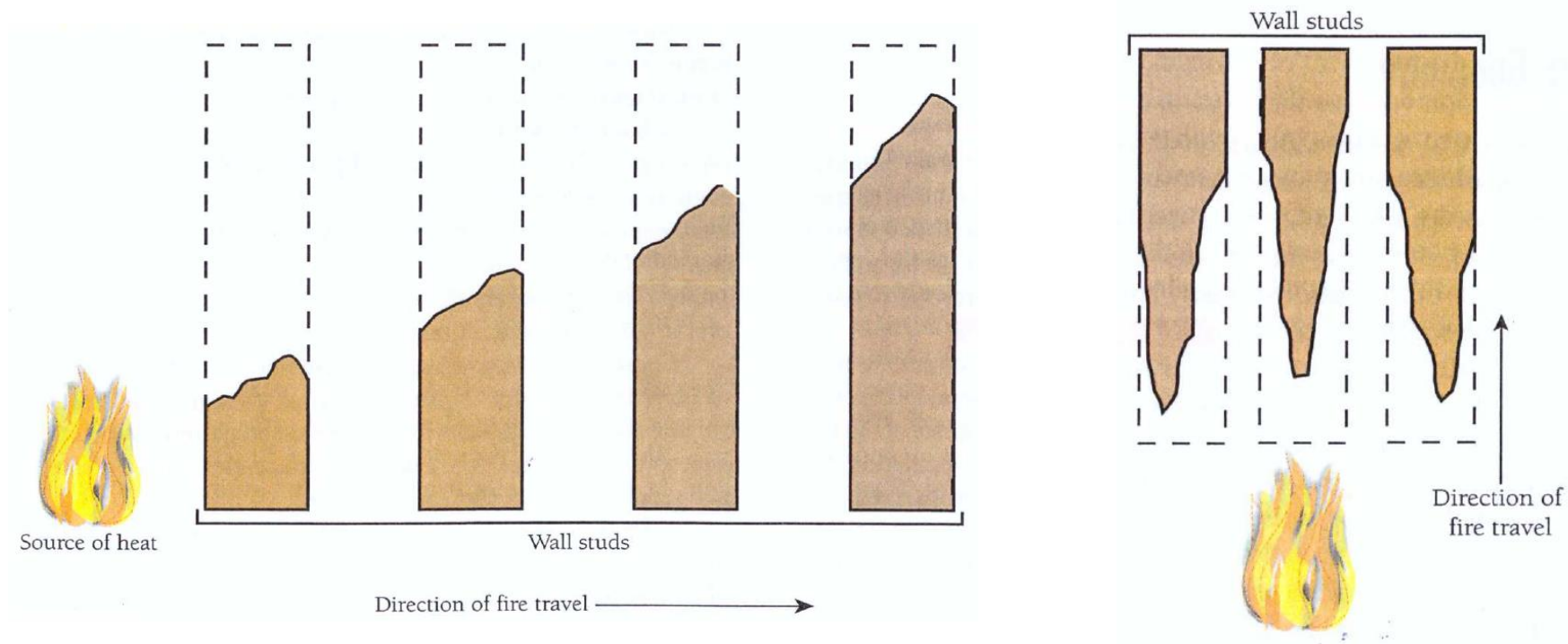




INDIVIDUAZIONE DEL PUNTO D'ORIGINE DI UN INCENDIO E DIREZIONE DI PROPAGAZIONE DEL FUOCO

Direzione di propagazione di un incendio 2/2

L'illustrazione di seguito riportata evidenzia i danni prodotti da un incendio su montanti di supporto in legno. Questi decrescono all'aumentare della distanza dalla sorgente di calore.





CONCLUSIONI

Considerazioni finali sui segni lasciati da un incendio

L'interpretazione dei segni dell'incendio è indispensabile per una corretta analisi del fenomeno anche se l'evento è dinamico e la sua evoluzione spazio-tempo, è influenzata da innumerevoli fattori. Molti di tali fattori, come ad esempio: l'esatta distribuzione, quantità e tipologia dei materiali combustibili presenti in un ambiente, le superfici iniziali di ventilazione di un locale e le loro variazioni nel tempo, il grado di partecipazione al fuoco dei materiali combustibili interessati dall'incendio, ecc. non sono a posteriori facilmente individuabili.

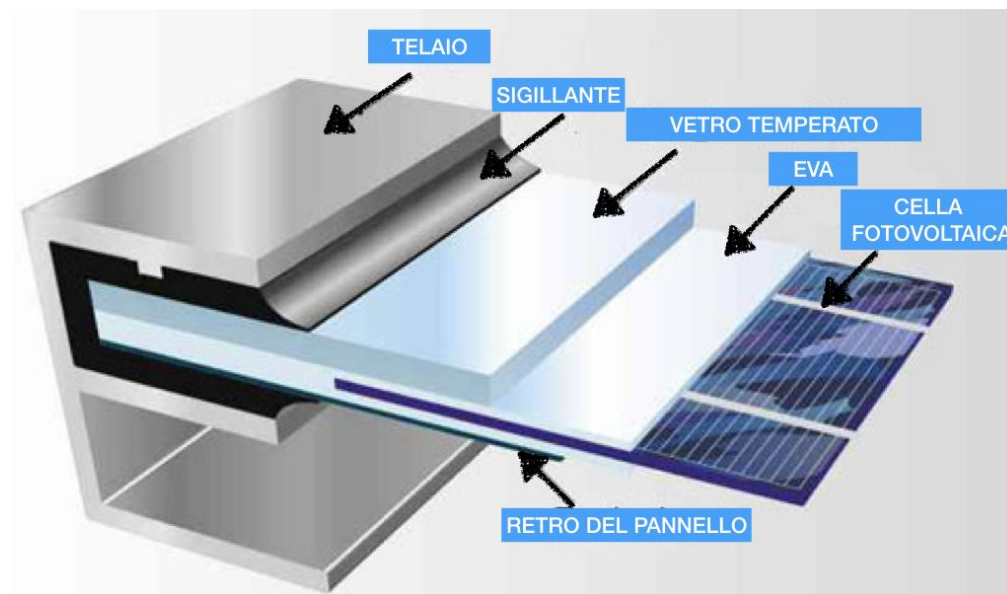
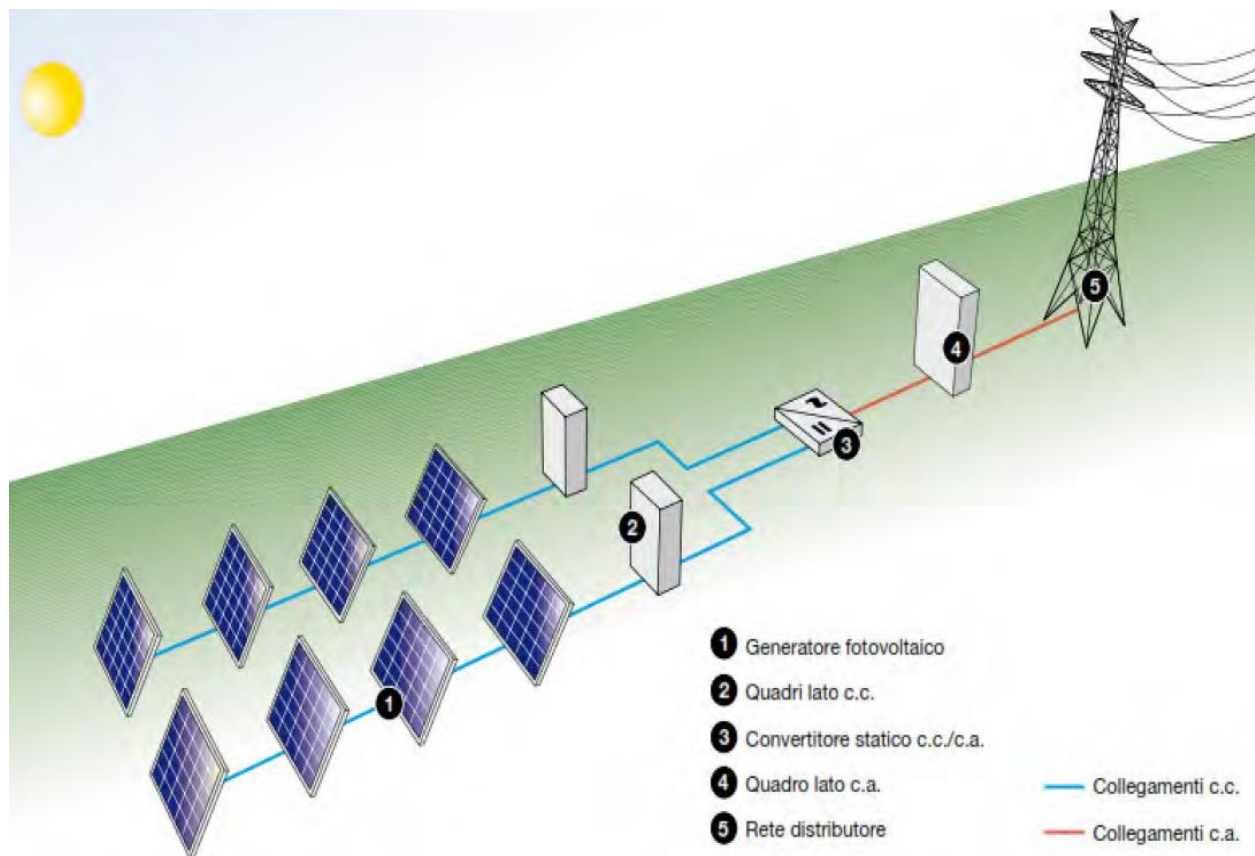
In ragione della natura distruttiva dell'incendio, potrebbe non essere possibile identificare la causa, soprattutto nel caso di incendi che raggiungono la fase di flashover.

Alcuni segni tipici che l'incendio rilascia, nella fase iniziale di ignizione del materiale combustibile, tendono poi ad essere cancellati nel corso delle fasi successive. Ciò che si vede dopo un incendio è la registrazione totale di quello che è avvenuto e solitamente non si è in grado di vedere l'ordine sequenziale della creazione di ogni segno.



SCENARIO INCIDENTALE: IL CASO DEGLI IMPIANTI FOTOVOLTAICI

Generalità



Schema tipico di un impianto fotovoltaico e sezione di un modulo fotovoltaico con le sue componenti



SCENARIO INCIDENTALE: IL CASO DEGLI IMPIANTI FOTOVOLTAICI

CAUSE FREQUENTI DI INNESCO DI UN IMPIANTO FOTOVOLTAICO

Allentamento del contatto delle connessioni o dei connettori (effetto joule).



Nelle stringhe la corrente può risultare pari a diversi ampere (valore indicativo 7 - 8 A).



SCENARIO INCIDENTALE: IL CASO DEGLI IMPIANTI FOTOVOLTAICI

Arco elettrico che può manifestarsi in diversi punto dell'impianto.

Un arco elettrico in corrente continua, con i valori di tensione normalmente in uso negli impianti fotovoltaici (diverse centinaia di volt) può rimanere attivo per molto tempo (anche diversi minuti).





SCENARIO INCIDENTALE: IL CASO DEGLI IMPIANTI FOTOVOLTAICI

Incendio delle scatole di giunzione.





SCENARIO INCIDENTALE: IL CASO DEGLI IMPIANTI FOTOVOLTAICI

E' possibile che si sviluppi un arco elettrico anche all'interno del modulo fotovoltaico per difettosità delle saldature tra celle e celle oppure per ossidazione creatasi a seguito della perdita di ermeticità del modulo. Un arco elettrico in serie tra le celle potrebbe perforare la parte sottostante e innescare il materiale di supporto.





SCENARIO INCIDENTALE: IL CASO DEGLI IMPIANTI FOTOVOLTAICI

La collocazione dei moduli posizionati al termine di una falda di tetto potrebbe creare infiltrazioni d'acqua che nel tempo possono generare, durante il funzionamento, significative correnti di cortocircuito in grado di innescare i moduli fotovoltaici.





SCENARIO INCIDENTALE: IL CASO DEGLI IMPIANTI FOTOVOLTAICI

Un modulo fotovoltaico può essere soggetto ad innesco di incendio a causa del fenomeno di «hot spot» (surriscaldamento localizzato). Condizioni tipiche che possono produrre l'hot spot sono gli ombreggiamenti o la sporcizia delle celle. Si possono quindi generare correnti inverse verso l'hot spot con conseguenti surriscaldamenti localizzati. Un rimedio per cercare di evitare questo fenomeno è l'installazione di diodi di by-pass (posizionati nella scatola di giunzione) in grado di by-passare gruppi di celle di un modulo fotovoltaico (sede dell'hot spot) impedendogli di essere percorso dalle correnti inverse.





SCENARIO INCIDENTALE: IL CASO DEGLI IMPIANTI FOTOVOLTAICI

Anche un'inadeguata ventilazione dei moduli fotovoltaici può provocare condizioni critiche di surriscaldamenti potenzialmente a rischio di innesco di incendio.

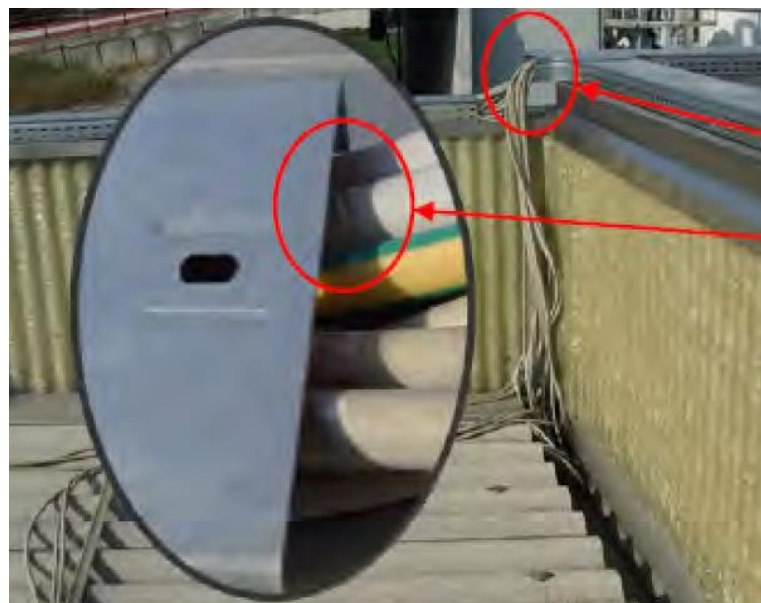




SCENARIO INCIDENTALE: IL CASO DEGLI IMPIANTI FOTOVOLTAICI

Un altro punto debole degli impianti fotovoltaici è rappresentato dalla perdita di isolamento dei cavi con conseguente formazione di archi elettrici, le cui cause tipiche possono essere ricondotte:

- a lesioni del rivestimento isolante dei cavi (spigoli taglienti della lamiera, incuria nel posizionamento dei cavi tali da tagliare l'isolante sotto il proprio peso, ecc.). In questo caso potrebbe trattarsi quindi di errata installazione;
- all'azione di roditori.

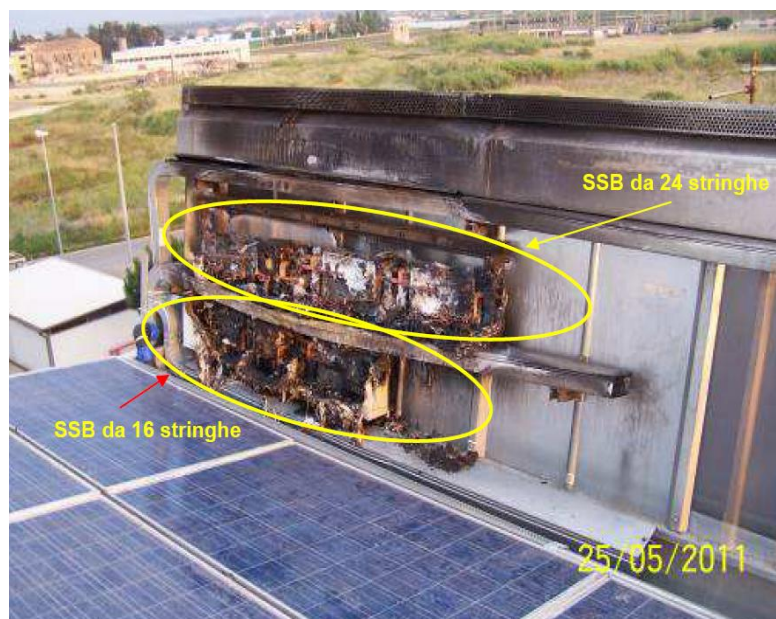




SCENARIO INCIDENTALE: IL CASO DEGLI IMPIANTI FOTOVOLTAICI

Anche le «string boxes» (quadri elettrici di stringa) possono essere all'origine di inneschi di incendio. Tra le possibili tipiche cause interne di innesco abbiamo:

- l'allentamento dei morsetti (effetto joule);
 - l'ingresso d'acqua che provoca cortocircuiti,
- mentre tra le cause esterne possiamo avere le sovratensioni indotte dalla caduta a terra di fulmini, sulle spire costituite dal collegamento dei moduli fotovoltaici a realizzare le stringhe, i cui effetti sottoforma di archi elettrici, si scaricano nelle string boxes.





SCENARIO INCIDENTALE: IL CASO DEGLI IMPIANTI FOTOVOLTAICI

Un ultimo rischio di innesco di incendio è costituito dagli inverter.

Anche nel caso degli inverter possiamo avere diverse cause interne di innesco, tra le quali:

- allentamento dei morsetti (effetto joule);
- difetto di qualche componente interno;
- carenza di tipo progettuale, installativo e manutentivo;
- scarsa ventilazione del locale nel quale sono installati,

mentre tra le possibili cause esterne possiamo avere le sovratensioni indotte dalla caduta a terra di fulmini, sulla rete alla quale l'impianto fotovoltaico è connesso in parallelo oppure i disturbi provenienti dalla rete stessa.





CASE STUDY

1. Incendio di un edificio con moduli fotovoltaici installati sul tetto





CASE STUDY

Ipotesi sulle cause dell'incendio



DIFETTO DEI MODULI FOTOVOLTAICI (ipotesi coerente da rendere consistente)



CASE STUDY

Ipotesi sulle cause dell'incendio



SCOPERTA INTERESSANTE
(sporcizia dei moduli fotovoltaici)



CASE STUDY

Ipotesi sulle cause dell'incendio



HOT SPOT (ipotesi coerente ed abbastanza consistente)



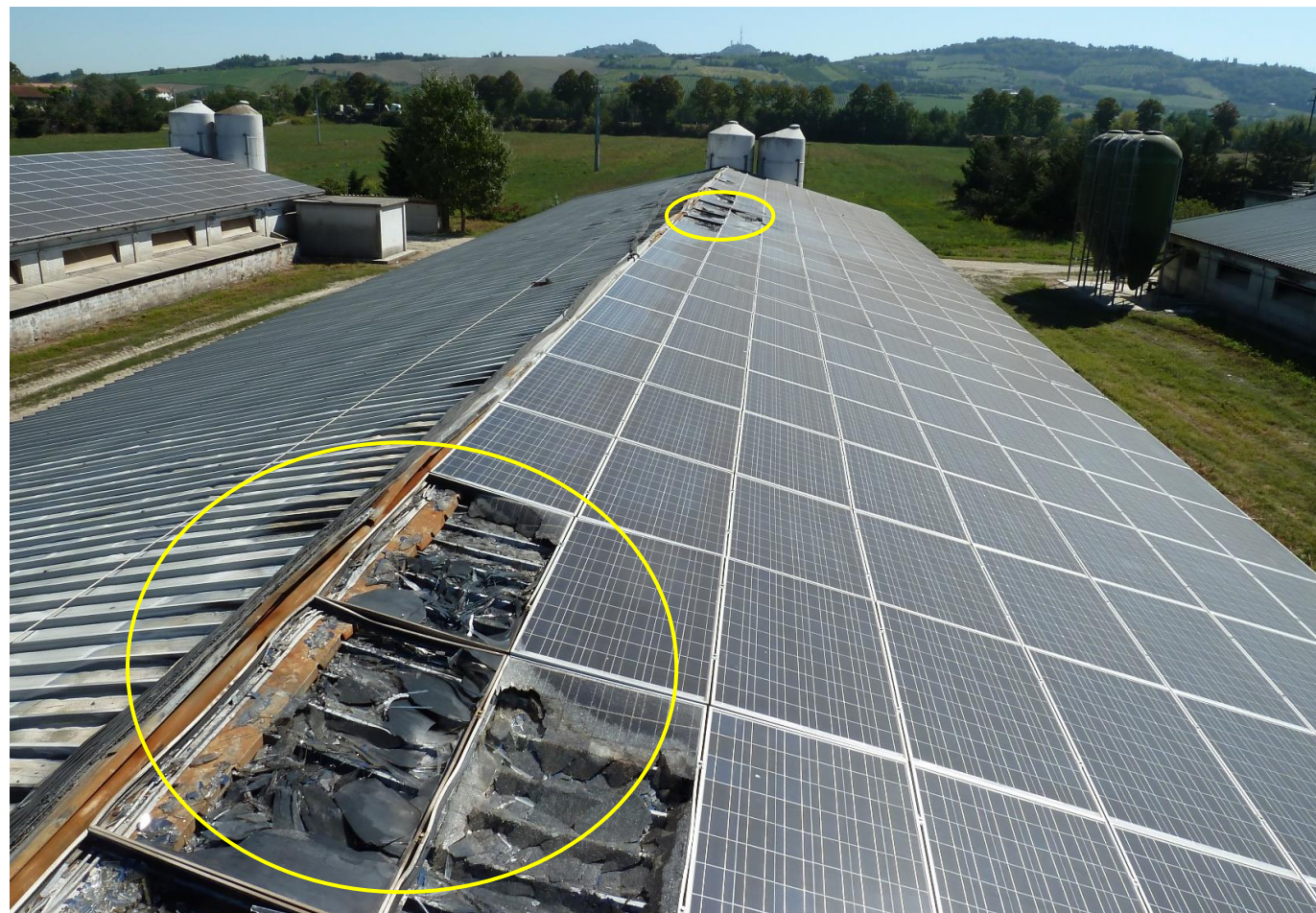
CASE STUDY

2. Incendio di moduli fotovoltaici





CASE STUDY





CASE STUDY

Ipotesi sulle cause dell'incendio



DIFETTO DEI MODULI FOTOVOLTAICI (ipotesi coerente ma poco consistente)



CASE STUDY

Ipotesi sulle cause dell'incendio



OMBREGGIMENTO DEI MODULI FOTOVOLTAICI (ipotesi coerente ma inconsistente)



CASE STUDY

Ipotesi sulle cause dell'incendio

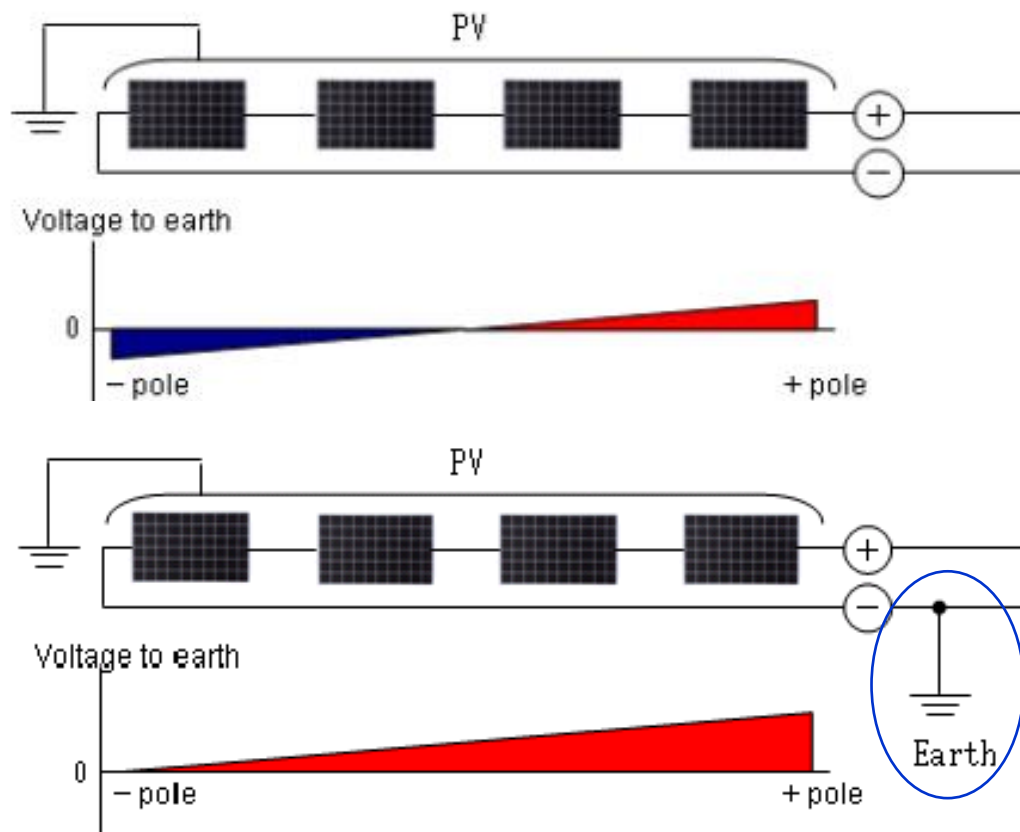


SCARSA VENTILAZIONE TRA COPERTURA E MODULI FOTOVOLTAICI
(ipotesi coerente ma poco consistente)



CASE STUDY

*Messa a terra del polo negativo delle stringhe (PID **P**otential **I**nduced **D**egradation)*



SCOPERTA INTERESSANTE
(ipotesi coerente ed abbastanza consistente)



BIBLIOGRAFIA

- Chimica e fisica dell'incendio (Servizio Tecnico Centrale C.N.VV.F.)
- La semiotica degli incendi (Nucleo Investigativo Antincendi VV. F.)
- Relazione tecnica sugli incendi coinvolgenti impianti fotovoltaici (Nucleo Investigativo Antincendi VV. F.)
- Fire Investigator «Principles and Practise to NFPA 921 and 1033» - Jones & Bartlett Learning
- Il IV° elemento «Trattato sulla struttura del fuoco e indagine di Polizia Scientifica sulla dinamica degli incendi» Antonietta Lombardozzi - Giancarlo Zedde Torino