Il comportamento del fuoco in più stanze

1 Introduzione

Ogni pompiere conosce la curva di sviluppo del fuoco come in figure 1. Questa curva illustra un possibile modo in cui potrebbe comportarsi un incendio all'interno di un edificio. Affinché questa curva si manifesti, devono essere soddisfatte diverse condizioni:

- Deve esserci abbastanza combustibile all'interno della stanza.
- Il carico di combustibile deve essere posizionato in modo tale che possa svilupparsi un incendio il cui ratio di rilascio di calore superi il limite necessario affinché si verifichi un flashover nella stanza.
- Deve esserci aria sufficientemente disponibile (ventilazione) per consentire al fuoco di raggiungere il ratio di rilascio di calore.

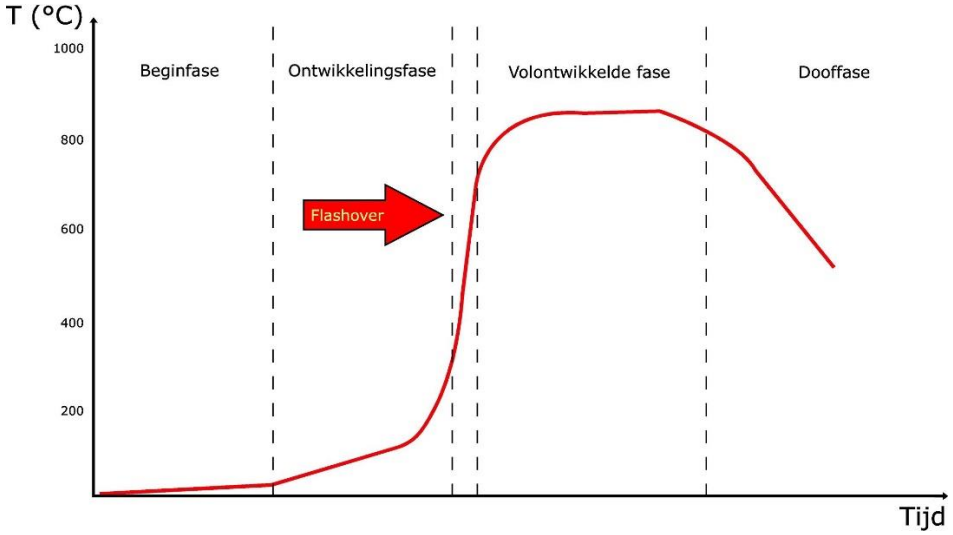

figure 1 Curva di crescita di un incendio ventilato *(Figure: Karel Lambert)*

Non tutti i vigili del fuoco comprendono che questa curva illustra un'evoluzione della temperatura in funzione del tempo, mentre in realtà il ratio di rilascio del calore si riferisce alle condizioni sopra descritte. L'articolo *La curva rivisitata della crescita del fuoco* presenta l'incendio in un grafico "tempo-HRR" [2]. L'articolo esaminava l'impatto di diverse variazioni (ventilazione, carico di combustibile) sull'HRR.

Questa curva si riferisce solo ad un incendio in un singolo compartimento. *Allora come si comporta e come si sviluppa un incendio quando sono coinvolti più compartimenti*?

In questo articolo, diamo uno sguardo più da vicino al comportamento del fuoco in più stanze. L'articolo non sarà esaustivo, né intende esserlo. L'attenzione è posta su un incendio che inizia in una stanza e che si diffonde attraverso la porta aperta in una seconda stanza.

2 Tutto circa il fumo

Ogni incendio produce fumo. Il fumo è fondamentale per la propagazione dell'incendio perché il fumo stesso si diffonde in tre modi che sono importanti per le squadre antincendio.

1. Propagazione di energia
2. Propagazione di combustibile
3. Propagazione di elementi tossici

La sezione seguente tratta in modo più dettagliato la diffusione del fumo e le sue conseguenze.

2.1 Propagazione del fumo

Un incendio produce fumo. Il fumo è costituito da particelle di fuliggine, aerosol e gas. Tuttavia, la maggior parte del fumo è costituita da aria. Com'è in realtà?

Il fumo viene prodotto nella sede dell'incendio. Gran parte dell'energia (il calore) sprigionata dal fuoco, viene utilizzata per riscaldare il fumo. Quindi l'HRR dell'incendio gioca un ruolo importante nella diffusione del fumo: maggiore è l'HRR, maggiore è la "forza" che l'incendio ha nel spingere il fumo lontano da sé, per così dire. La temperatura iniziale del fumo dipende dalla quantità di aria che può fluire alla sede del fuoco. La dimensione ed il contorno del fuoco qui è importante. Più grande è, più aria può entrare. Se l'HRR rimane costante, la temperatura del fumo che sale da un incendio con contorno più ampio sarà inferiore.

Poiché il fumo è più caldo dell'aria circostante, salirà verso l'alto. L'effetto che provoca ciò è lo stesso che provoca l'innalzamento di una mongolfiera: l'aria calda sale verso l'alto. Tuttavia, in una mongolfiera, l'aria è intrappolata all'interno del pallone. Non può mescolarsi con l'aria esterna che è più fredda.

Il fumo differisce leggermente a questo riguardo. Il fumo sale verso l'alto e man mano che si alza, l'aria viene mescolata sempre di più nella piuma di fumo. Ciò fa sì che si verifichino diverse cose:

- La temperatura del fumo diminuisce. Il fumo caldo che comincia dal basso si mescola con l'aria circostante più fredda.
- In questo modo diminuirà anche la differenza di temperatura con l'aria circostante e il fumo salirà meno velocemente di prima.
- Anche la massa del fumo aumenta. Dopotutto, gran parte dell'aria è stata mescolata al fumo.

La temperatura del fumo, la velocità con cui sale e la massa cambiano man mano che sale (vedi figura 2).

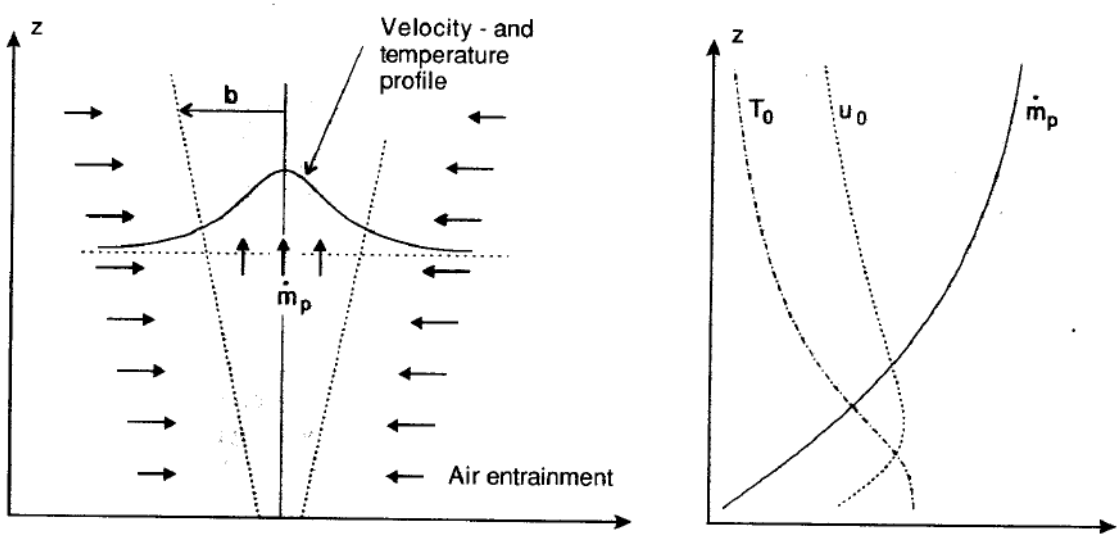

figure 2 Lo schema raffigura una piuma di fumo. Man mano che la piuma di fumo sale più in alto, si allarga. La temperatura e la velocità sono massime al centro e diminuiscono verso l'esterno della piuma. La temperatura (T) e la velocità (u) diminuiscono man mano che il fumo sale. La massa (m) aumenta. (Figura: [7]).

Ogni vigile del fuoco sa che un incendio in una stanza produce prima una piuma di fumo e poi uno strato di fumo. La piuma di fumo colpisce il soffitto dopodiché si diffonderà orizzontalmente. Il fumo continuerà a diffondersi finché non colpirà un muro. Le pareti e il soffitto della stanza che limitano lo strato di fumo. Lo strato di fumo diventerà quindi più spesso (= si espanderà e scenderà).

Ciò fa sì che la distanza verticale percorsa dalla piuma di fumo, dalla sede dell'incendio allo strato di fumo, diminuisca. Ciò significa che meno aria può mescolarsi nel fumo che sale. Ciò a sua volta significa che la piuma di fumo si raffredderà meno di prima e il fumo con una temperatura più elevata fluirà nello strato di fumo.

In tutto questo gioca quindi un ruolo importante l'altezza del soffitto della stanza. In un magazzino alto 8 metri, la piuma di fumo si raffredderà per quella distanza prima di entrare nello strato di fumo. Anche in questo caso lo spessore dello strato di fumo è determinato dalla superficie del compartimento. La superficie determina in parte la quantità di fumo che può essere immagazzinata nello strato di fumo. Una stanza più grande impiegherà più tempo a formare uno strato di fumo spesso un metro. Un vano ampio e alto costituisce per così dire una sorta di cuscinetto per il fumo.

Ciò che è importante anche qui sono le aperture nei muri. Se c'è una finestra aperta, il fumo inizierà a fuoriuscire non appena lo strato di fumo raggiunge la parte superiore della finestra. Da quel punto, il fumo fluirà sia nello strato di fumo (dalla piuma) sia fuori dalla stanza (attraverso la finestra). Quando ciò accade, ci sono – teoricamente – tre possibilità:

1. Più fumo scorre nello strato di fumo che fuori. Lo strato di fumo continuerà a scendere.

2. Il fumo esce esattamente alla stessa velocità con cui entra. L'altezza dello strato di fumo rimarrà la stessa.

3. Entra meno fumo che esce. La dimensione dello strato di fumo diminuirà. Ciò potrebbe verificarsi, ad esempio, quando le ventilazioni di uscita del fumo nel soffitto vengono aperti in un incendio controllato dal combustibile.

Quindi ci sono alcuni parametri che determinano come si comporteranno la piuma di fumo e lo strato di fumo:

- Il ratio di rilascio di calore HRR
- La dimensione del fuoco
- L'altezza della stanza
- L'area della stanza
- Presenza di aperture

Il fuoco costituisce un sistema molto complesso in cui tutto cambia costantemente.

La piuma di fumo forma un ponte tra la sede dell'incendio e lo strato di fumo. Attraverso la piuma di fumo, combustibile, energia e particelle tossiche fluiscono nello strato di fumo.

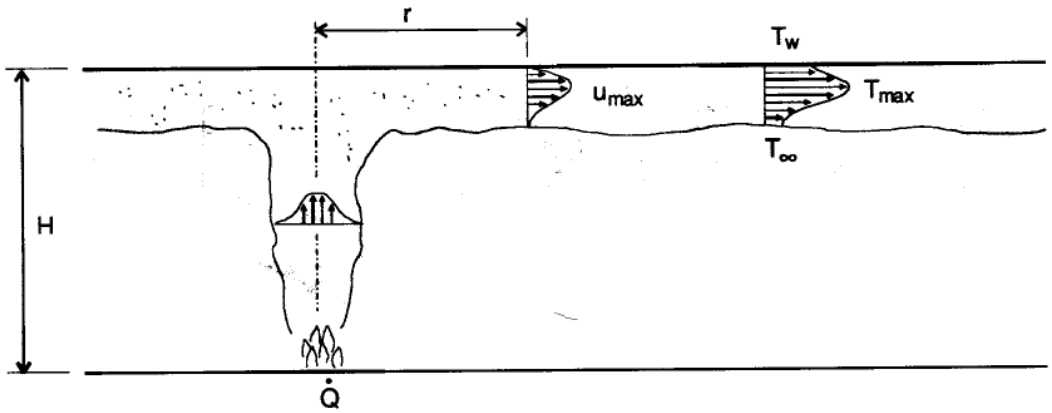

FIGURE 4.17 An idealization of the ceiling jet flow beneath a ceiling.

figure 3 Illustrazione di una piuma di fumo che scorre nello strato di fumo. Nello strato di fumo si forma un getto al soffitto. Il getto è suddiviso in sezioni con diverse velocità di flusso (u) e diverse temperature (T). Entrambi aumenteranno quando aumenta l'HRR dell'incendio. Entrambi diminuiranno quando la stanza sarà più alta. (Figura: [7]).

Lo strato di fumo è collegato alle pareti e al soffitto. All'inizio dell'incendio, la parte interna del muro ha all'incirca la stessa temperatura dell'ambiente interno. Non appena le pareti entrano in contatto con il fumo caldo, iniziano ovviamente a riscaldarsi. Parte dell'energia contenuta nello strato di fumo viene trasferita alle pareti.

Non appena lo strato di fumo scende sotto l'estremità superiore dell'apertura della porta che collega un compartimento vicino, il fumo inizierà a fluire nella seconda stanza. Quel flusso causerà uno spostamento di energia, combustibile e tossicità.

2.2 Propagazione dell'energia

Il fumo che scorre attraverso la porta di collegamento risalirà fino al soffitto. Tutti i commenti fatti riguardo alla formazione dello strato di fumo (spessore, temperatura) nella prima stanza, valgono anche per la seconda stanza.

Quello strato di fumo, tuttavia, costituisce una minaccia significativa per tutti e per tutto in quella seconda stanza. Lo strato di fumo trasferirà energia su tutti gli oggetti e gli occupanti che hanno una temperatura inferiore rispetto allo strato di fumo.

Proprio come nella stanza iniziale, lo strato di fumo irradierà calore su tutto ciò che si trova al suo interno. Il calore radiante potrebbe essere piuttosto elevato quando anche la temperatura dello strato di fumo è elevata. Se c'è una quantità sufficientemente elevata di radiazione, gli oggetti sotto lo strato di fumo ad un certo punto inizieranno a pirolizzare. Ciò significa che lo strato di fumo provoca la formazione di gas infiammabili nella seconda stanza.

È necessario prestare particolare attenzione ai rivestimenti delle pareti e soffitti infiammabili. Il soffitto è direttamente a contatto con lo strato dei fumi caldi. Il fumo riscalderà il soffitto per convezione. Questo è un metodo diverso di trasferimento del calore rispetto all'irraggiamento. La convezione richiede il contatto diretto tra il fumo e l'oggetto più freddo. Pertanto, se il fumo tocca il soffitto infiammabile (legno o materiale isolante infiammabile), anche lì possono formarsi gas infiammabili. La pirolisi dei mobili sotto uno strato di fumo potrebbe essere ancora visibile ai vigili del fuoco all'interno della stanza, ma la produzione di gas infiammabili nella parte alta dello strato di fumo non lo è. Pertanto è molto più insidioso.

Alla fine, il calore dello strato di fumo potrebbe causare l'accensione nella seconda stanza. Da quel momento seguirà presto un secondo flashover. Il secondo flashover, invece, avverrà nella seconda stanza e non nella prima. Si ritiene che l'incendio si sia diffuso e potrebbe ancora verificarsi un'ulteriore diffusione.

2.3 Propagazione del combustibile

Il combustibile in forma gassosa fluisce nella seconda stanza attraverso l'apertura della porta. Fino a quel momento la stanza era riempita al 100% di aria. Ora nell'ambiente fluiscono particelle di combustibile (gas di pirolisi e anche gas parzialmente combusti come CO). Sul soffitto si forma uno strato di fumo. Questo dovrebbe essere visto come un serbatoio di combustibile gassoso. Se gli oggetti iniziano a pirolizzare nella seconda stanza, anche i gas formati finiranno in quello strato di fumo.

Ad un certo punto, lo strato di fumo, o alcune parti di esso, raggiungeranno il limite inferiore di infiammabilità. A seconda della temperatura dello strato di fumo, il fumo ad un certo punto si accenderà. Ciò potrebbe avvenire in diversi modi:

- Le fiamme escono dalla prima stanza attraverso l'apertura della porta
- Fiamme danzanti (Dancing angels) nello strato di fumo
- Volventi (Rollover) nel secondo compartimento

Ognuno di questi fenomeni ha bisogno di combustibile per verificarsi. Ecco perché la distribuzione del combustibile dal primo al secondo compartimento (e la "produzione" di combustibile nel secondo compartimento) è così importante.
Ciascuno di questi fenomeni produce energia localmente. Ovunque ci siano fiamme, si libera calore. Lo strato di fumo verrà riscaldato (temporaneamente) in alcune parti. Ciò farà aumentare anche il trasferimento di calore (attraverso irraggiamento e convezione). Si forma un ciclo auto-rinforzante diffondendo energia e diffondendo combustibile. Temperature più elevate porteranno a una maggiore pirolisi (= più combustibile). Quando c'è abbastanza combustibile, potrebbe verificarsi l'accensione che a sua volta apporta a più energia.

L'articolo "Come muoiono le persone negli incendi?" [9] spiega che la radiazione è proporzionale alla temperatura assoluta alla quarta potenza. Questo principio impone che le fiamme (in alcune parti dello strato di fumo) emettano 16 volte più calore radiante rispetto al fumo con una temperatura di 200 °C. Quindi, quando parti dello strato di fumo si incendiano, la radiazione aumenta improvvisamente di 16 volte.

2.4 Propagazione della tossicità.

Il terzo problema legato alla diffusione del fumo è la diffusione delle particelle tossiche. Per i vigili del fuoco questo non rappresenta un problema diretto poiché di solito indossano l'autorespiratori. Anche se la concentrazione di gas tossico raggiunge livelli significativi, finché hanno aria nella bombola, possono respirare tranquillamente. Ma questo non vale per le vittime presenti nella stanza. Gli occupanti dell'edificio potrebbero trovarsi in un'altra stanza, ma quando la porta è aperta, il fumo si trasferirà nella stanza con una grande quantità di sostanze tossiche. Gli studi dell'UL hanno dimostrato che ciò porta molto rapidamente a livelli letali di tossicità. In un'abitazione standard, l'aspettativa è che gli occupanti intrappolati nella stanza dell'incendio abbiano solo 5 minuti.

Tuttavia, quando le vittime sono intrappolate in un'altra stanza con la porta chiusa, il tempo necessario prima che le condizioni diventino impraticabili arriva fino a trenta minuti. Ciò ha anche implicazioni tattiche per le squadre che effettuano ricerca e soccorso in un incendio domestico: quando una squadra si trova in una stanza piena di fumo pesante (ad esempio cucina o soggiorno), deve fare attenzione quando apre le porte. È del tutto possibile che siano riusciti ad aprire una porta dal soggiorno pieno di fumo a una camera da letto fino a quel momento priva di fumo. Non appena la porta verrà aperta, il fumo fluirà nella camera da letto dove potrebbe esserci una potenziale vittima ancora viva e vegeta. Dopotutto, all'interno della camera da letto è rimasta ancora aria di sufficiente qualità. Ciò cambierà rapidamente una volta che la porta si aprirà e non ci sarà più una barriera che trattiene il fumo. È possibile che l'azione dei vigili del fuoco metta in pericolo la sicurezza della vittima. Sarebbe poi l'opposto di ciò che le squadre di ricerca e soccorso cercano di ottenere.

Se una squadra di ricerca si ritrova ad aprire la porta di una stanza fino a quel momento priva di fumo, potrebbe essere una buona idea richiuderla immediatamente. Tutti gli occupanti all'interno di quella stanza non correrranno un pericolo immediato. Lasciare le vittime in quella stanza, magari con un pompiere che le informi e le tranquillizzi, potrebbe essere un'opzione. Allo stesso tempo, l'incendio potrebbe essere domato e la maggior parte del fumo potrebbe essere eliminata utilizzando ventilatori in PPV. In questo modo, le vittime potrebbero essere evacuate attraverso stanze in cui la maggior parte del fumo è

stata eliminata. È fondamentale che le squadre di ricerca e salvataggio comunichino chiaramente con i loro ufficiali in comando quando praticano questa tattica.

Tieni presente che non sarà sempre possibile tenere le vittime in uno compartimento per un periodo di tempo più lungo. A volte ci vuole un po' di tempo prima che l'incendio possa essere tenuto sotto controllo. In tal caso, si consentirebbe una maggiore diffusione del fumo nelle stanze vicine. Anche quando ci sia una porta resistente al fuoco che separa le stanze, ci sarebbe comunque del fumo che potrebbe filtrare. La maggior parte delle porte resistenti al fuoco non sono completamente a tenuta di fumo. Ai vigili del fuoco di Bruxelles una volta accadde quanto segue in un incendio al 12° piano di un grattacielo. Un'unità abitativa è stata coinvolta quasi interamente. I vigili del fuoco hanno dovuto affrontare una serie di problemi diversi (alimentazione idrica difettosa, carico di carburante molto grande nell'unità con oggetti che bloccavano parzialmente la porta,...). A causa di questi problemi, ci è voluto molto tempo prima che i vigili del fuoco riuscissero a domare l'incendio. Dall'altra parte del corridoio al 12° piano, una madre era intrappolata nel suo appartamento insieme a quattro bambini piccoli. Il corridoio era completamente invaso da un fumo denso e nero. L'idea iniziale era di tenerli nel loro appartamento e fargli "scavalcare" il fuoco. Dopo 45 minuti, tuttavia, il fumo era penetrato ad un livello tale da rendere necessaria l'evacuazione. Ciò è stato fatto utilizzando maschere di salvataggio (vedi figura 4).

Sono disponibili diversi tipi di maschere. Alcuni funzionano utilizzando filtri, altri utilizzano un serbatoio d'aria. Quando si utilizzano maschere con filtro, nel fumo deve esserci abbastanza ossigeno per poter evacuare le persone in sicurezza. Ciò non è necessario quando si utilizza un BA con serbatoio d'aria. Se la temperatura del fumo è sufficientemente bassa, le persone potrebbero essere evacuate attraverso il fumo anche molto denso utilizzando queste maschere di salvataggio.

figure 4 Una maschera di salvataggio che può essere messa sulla testa della vittima. È necessario collegare un regolatore o una valvola a richiesta polmonare, preferibilmente con un tubo extra lungo, in modo che sia la vittima che il vigile del fuoco possano muoversi facilmente l'uno accanto all'altro. *(Photo: Pieter Maes)*

È possibile che una squadra di ricerca apra una porta in una stanza con meno fumo di quello in cui si trovava originariamente, ma comunque abbastanza da causare problemi di sicurezza per eventuali vittime all'interno. Raramente le cose sono chiare, in bianco o nero nella lotta agli incendi. Le squadre di ricerca dovranno valutare al meglio delle proprie capacità quale tattica impiegare.

3 Secondo compartimento a fuoco: possibili curve

I vigili del fuoco conoscono molto bene la curva della temperatura di un incendio in un compartimento ventilato. Questo è il grafico mostrato nella figura 1. *Come cambia il grafico quando l'incendio si diffonde in una seconda stanza?*

La Figura 5 illustra nuovamente l'incendio della Figura 1 con una linea rossa. Questa linea rossa rappresenta, ad esempio, il comportamento del fuoco in una camera da letto. Poiché la porta della camera da letto è aperta, il fumo fluirà dalla camera da letto alla stanza vicina (ad esempio il soggiorno). Non appena lo strato di fumo scende sotto la parte superiore dell'apertura della porta, si forma un flusso. Come descritto sopra, il fumo caldo irradierà calore su ogni oggetto sottostante. Il divano del soggiorno verrà riscaldato in questo modo.

Dopo il flashover nella prima stanza, le fiamme dalla camera da letto usciranno attraverso la porta del soggiorno. Le temperature nel soggiorno inizieranno ad aumentare notevolmente. Ciò farà sì che anche la radiazione aumenti drasticamente (proporzionalmente alla quarta potenza della temperatura assoluta). Ciò causerà l'inizio di un incendio nel soggiorno. Quel secondo fuoco è illustrato dalla linea blu. Anche questa linea ha una fase di crescita e va anche in flashover. È molto importante che i vigili del fuoco si rendano conto che due incendi in stanze diverse possono trovarsi in fasi diverse. L'incendio della camera da letto può essere completamente sviluppato (post flashover) mentre l'incendio del soggiorno può essere ancora in fase di crescita (pre flashover). Con un incendio completamente sviluppato in una stanza non significa che il flashover non possa verificarsi in un'altra stanza. In altre parole, mentre si avanza verso un incendio completamente sviluppato, potrebbe verificarsi un flashover nella stanza attraverso la quale si avanza per l'attacco.

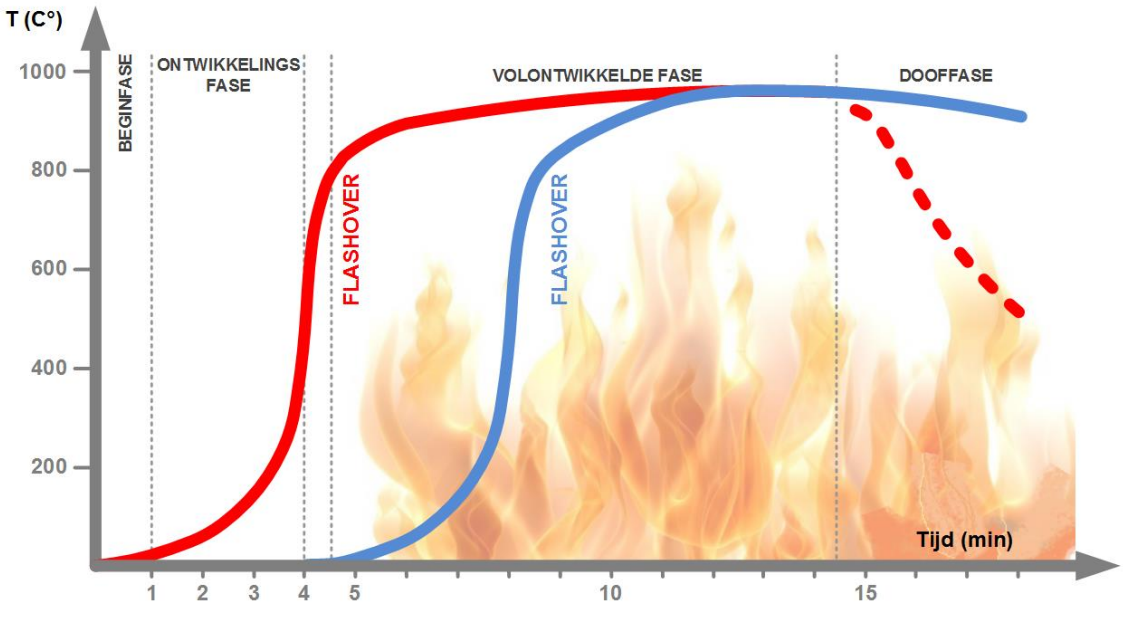

figure 5 Sviluppo dell'incendio in più stanze. La linea rossa rappresenta lo sviluppo dell'incendio nella stanza in cui ha origine l'incendio. Durante la fase completamente sviluppata, le fiamme escono dalla stanza attraverso l'apertura di una porta. Le fiamme entrano in una seconda stanza. Il calore radiante di queste fiamme creerà un fuoco secondario (linea blu). Dopo alcuni minuti, il fuoco secondario passerà in flashover. *(Drawing: Bart Noyens & Karel Lambert)*

Dopo un certo periodo di tempo il carico di combustibile nella prima stanza si esaurirà. L'intensità del fuoco diminuirà. Il fuoco entrerà nella fase di decadimento. Il fuoco nel soggiorno, tuttavia, brucia ancora violentemente. Quel fuoco è nella fase di completamente sviluppato. Ancora una volta, i due fuochi si comportano in modi diversi (e appariranno anche diversi).

Possiamo anche osservare la curva HRR, che illustra la potenza o HRR accumulata durante l'incendio. Queste curve sono totalmente diverse da quelle della figura 5. La cosa importante da notare è questa: due temperature non possono essere sommate insieme, due HRR sì!

La linea arancione nella figura 6 illustra l'HRR dell'incendio nella camera da letto (linea rossa nella figura 5), sviluppandosi dallo stadio di incipiente a quello di crescita e poi allo stadio completamente sviluppato. La fase di decadimento non è raffigurata. La progressione dell'HRR è rappresentata in modo semplificato. Una volta che l'incendio raggiunge lo stadio completamente sviluppato, l'HRR rimane lo stesso. L'incendio è diventato controllato dalla ventilazione e l'HRR è determinato dalla quantità di aria che può fluire nella stanza.

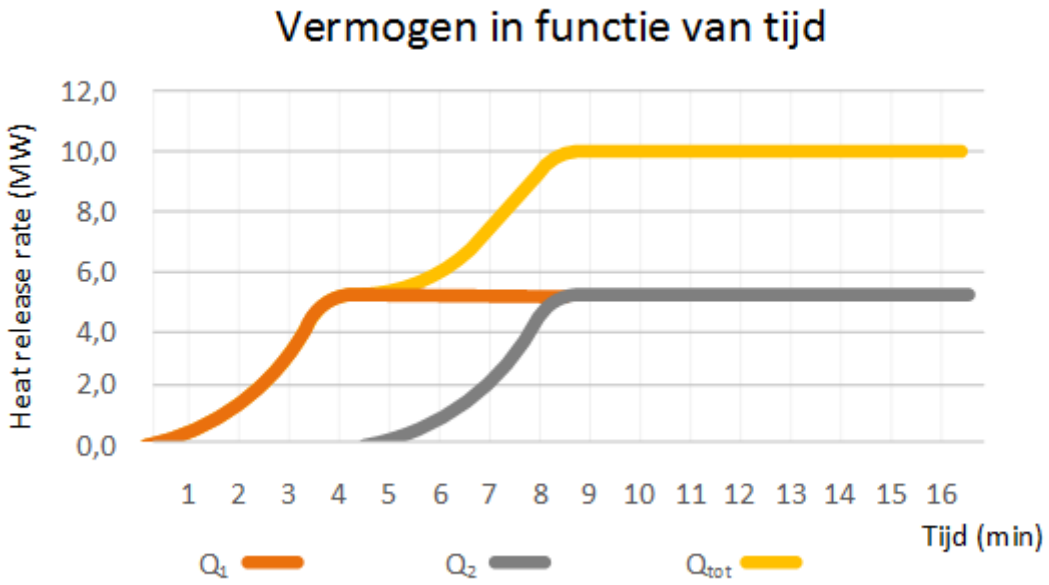

figure 6 Una rappresentazione semplificata dell'accumulo di HRR in un incendio che si estende in una seconda stanza. È possibile sommare due diversi HRR. *(Figura: Bart Noyens & Karel Lambert)*

La linea grigia illustra l'HRR nella seconda stanza (la linea blu in figura 5). Anche in questo caso l'HRR rimane lo stesso dopo il flashover. Il grafico non è del tutto accurato. In realtà, probabilmente il flashover nel soggiorno avrà un effetto sull'incendio nella camera da letto. Una (grande) parte dell'ossigeno necessario per l'incendio della camera da letto verrà consumata dall'incendio del soggiorno. Per semplicità, questo viene ignorato nella rappresentazione attuale.

La linea gialla rappresenta l'HRR totale che si sta accumulando. La linea gialla è la somma delle altre due linee. Quando entrambi gli incendi producono ciascuno un HRR di 5 MW, in totale viene raggiunto un HRR di 10 MW.

Anche se la temperatura è una grandezza fisica familiare ai vigili del fuoco, la quantità di potere estinguente presente nelle nostre manichette viene presentata come HRR o potenza. Per la nostra sicurezza è importante disporre sempre di una potenza estinguente maggiore dell'HRR dell'incendio. O l'obiettivo non sarà raggiunto

4 Considerazioni conclusive

Il comportamento del fuoco in una stanza singola è ben noto ai vigili del fuoco. Le regole che si applicano ad un incendio in più stanze sono molto più complicate. Questo articolo tenta di presentare le regole più importanti in modo semplificato. L'obiettivo non è coprire completamente l'argomento. Il lettore deve quindi tenere presente che sono state fatte alcune semplificazioni e che la realtà è ancora più complessa di quella qui rappresentata.

5 Bibliography

[1] *Lambert K & Baaij S (2018) Brandverloop: technisch bekeken, tactisch toegepast; 2nd edition, Sdu, Nederland*
[2] *Lambert K (2019) De brandcurve anders bekeken, De BrandweerM/V, mei 2019*
[3] *CFBT-BE (2019) Bijscholing instructeurs Attack Cell 2019*
[4] *Drysdale D (1999) An introduction to fire dynamics, 2nd edition, John Wiley & sons, England*
[5] *Merci B (2010) Active fire protection II: smoke and heat control, postgraduate studies in fire safety engineering, Universiteit Gent.*
[6] *Merci B (2011) Fire dynamics, postgraduate studies in fire safety engineering, Universiteit Gent.*
[7] *Karlsson B, Quintiere J (2000) Enclosure fire dynamics, CRC press*
[8] *Lambert K (2016) Brandbaarheidsgrenzen, De BrandweerM/V, november 2016*
[9] *Lambert K (2019) Waarom sterven mensen in een brand, De BrandweerM/V, maart 2019*

Karel Lambert