

Per quale ragione le persone muoiono negli incendi?

1 Introduzione

Ogni pompiere sa che le persone muoiono in un incendio. Tuttavia spesso vi è una mancanza di informazioni su come effettivamente le persone muoiono. Un incendio produce fumo e calore. Entrambi questi elementi sono una potenziale causa di morte per gli esseri umani. Questo articolo intende approfondire questo aspetto. Tiene inoltre conto delle implicazioni di tale conoscenza per i nostri metodi operativi. Il cambiamento del comportamento del fuoco influenza in qualche modo questi due fattori? Se sì, come e perché?

2 Calore

Un incendio produce energia. Questa energia riscalda l'ambiente circostante. L'elemento più importante è la potenza del fuoco o rateo di rilascio del calore (HRR). L'HRR dell'incendio è in genere misurato in kW o MW. L'HRR ci dice quanta energia, misurata in J, viene prodotta ogni secondo.

L'HRR prodotto dall'incendio viene trasmesso principalmente per convezione e irraggiamento. Si stima che il 70% dell'HRR viene trasferito per mezzo della convezione mentre l'irraggiamento rappresenta il restante 30%.

2.1 Convezione



Figura 1 Sopra la candela si può sentire la parte convettiva del calore prodotto dalla fiamma. (Photo: Szymon Kokot-Góra)

La convezione è responsabile della trasmissione della porzione più grande di energia prodotta dall'incendio. La convezione può essere facilmente dimostrata utilizzando una semplice candela. Se si tiene la mano a 10 cm al di sopra della candela, come mostrato nella figura 1 il calore percepito è quello dell'aria che sale (fumo). Tenendo la mano sul lato della candela, a una distanza simile, è facilmente apprezzabile la differenza tra il calore trasmesso dalla convezione e quello dell'irraggiamento.

Innanzitutto, il calore convettivo viene trasferito dal fuoco al fumo. Più alto è l'HRR, più caldo sarà il fumo.

Tuttavia c'è un altro fattore che determina quanto caldo diverrà il fumo. L'altezza dello strato di fumo gioca un ruolo essenziale in questo. L'incendio che ha origine sul pavimento in una stanza di dimensioni normali inizialmente farà salire il fumo per ca 2,6 metri prima di raggiungere il soffitto. Durante l'ascensione, l'aria si miscela con il fumo (vedi figura 2). Sia il volume del fumo che la sua massa aumenteranno continuamente durante l'ascensione. Più aria fredda viene miscelata nel fumo, più bassa sarà la temperatura finale

del fumo. Pertanto, il fumo che arriva al soffitto di un magazzino alto 5 metri sarà meno caldo rispetto a quello di una cucina di 2,6 metri.

In seguito vi è la creazione di uno strato di fumo. Supponiamo che lo strato di fumo in un appartamento abbia uno spessore di un metro. Il fumo che si origina sul pavimento dovrà quindi innalzarsi per soli 1,5 mt. Ciò significa che viene miscelata meno aria e il fumo sarà più caldo. A parte questo, l'incendio avrà un HRR maggiore rispetto allo stadio iniziale. Si ha quindi più calore mentre allo stesso tempo viene miscelata meno aria fredda. Ciò si traduce in un fumo più caldo rispetto alle fasi iniziali.

Lo strato di fumo caldo è ora diventato esso stesso fonte di calore in grado di riscaldare altri oggetti. Lo strato di fumo è circondato da pareti e soffitto che sono più fredde. Ci sarà un trasferimento di calore convettivo dal fumo alle pareti e al soffitto. Mentre il fumo risale, si raffredda parzialmente. Le pareti e il soffitto si surriscaldano allo stesso tempo. Man mano che le pareti e il soffitto continuano a riscaldarsi, assorbiranno sempre meno calore dallo strato di fumo. Il trasferimento di calore convettivo è infatti proporzionale alla differenza di temperatura (ΔT) tra lo strato di fumo e le pareti e il soffitto. Le pareti e il soffitto a loro volta trasferiranno il calore per mezzo di irraggiamento e conduzione.

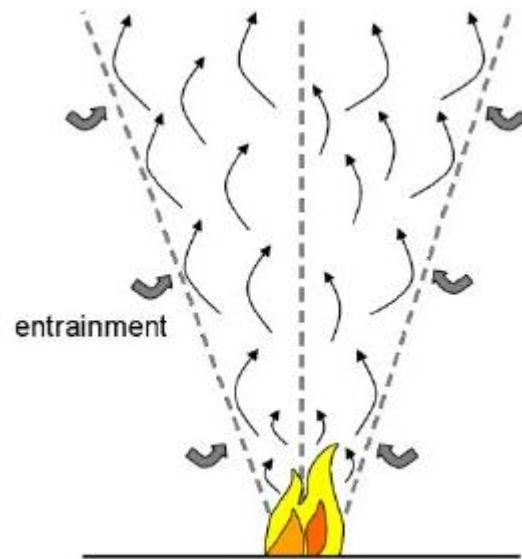


Figura 2 Mentre il fumo sale, sempre più aria è miscelata. Questa azione è chiamata trascinamento. (Figure: Edward Johnson)

È possibile calcolare il calore trasferito per convezione:

$$\dot{Q} = h \times A \times \Delta T \quad [kW]$$

Quando il fumo incontra un'apertura, il fumo fuoriesce da essa. Questo fumo costituisce un volume, una massa di fumo che esce dall'edificio. Ciò equivale a una quantità significativa di energia che esce dall'edificio.

Quando lo strato di fumo scende a circa mezzo metro dal pavimento, i vigili del fuoco impegnati in un attacco interno sono parzialmente nello strato di fumo. La parte del loro corpo immersa nel fumo, assorbe calore. In effetti, la superficie del corpo del pompiere (A) che si trova nello strato di fumo, si comporta analogamente alle pareti dell'edificio. Lo strato di fumo trasferirà il calore al DPI. La quantità di calore trasferita dipenderà dalla differenza di temperatura tra il DPI e il fumo. Il calore verrà quindi trasferito dal DPI al corpo del pompiere per mezzo della conduzione.

Se lo strato di fumo scende fino al pavimento, le eventuali vittime presenti subiranno immediatamente gli effetti del trasferimento di calore al loro corpo. L'abbigliamento che indossano offre poca o nessuna protezione. Lo stesso vale per coloro che stanno in piedi davanti a una finestra, nel flusso di gas in uscita. Un ulteriore problema in questo caso è

che il trasferimento di calore convettivo dipende dalla velocità del fumo in uscita incluso nel coefficiente di trasferimento di calore convettivo h . Il coefficiente di trasferimento del calore convettivo è determinato da una serie di parametri, uno dei quali è la velocità. Più veloce il flusso di fumo, più calore viene trasferito.

Infine, lo strato di fumo trasferirà molto calore per mezzo dell'irraggiamento compresi gli oggetti al di sotto di esso.

2.2 Irraggiamento

Le radiazioni sono una forma di trasferimento di calore ben nota a tutti. Si pensi alla sensazione del sole sul viso in una calda giornata estiva. Tutti possono sentire l'effetto del calore radiante. In un falò o una stufa, lo si percepisce ancor più distintamente. Tutti sanno anche che il calore radiante aumenta man mano che ci si avvicina alla fonte di calore.

In intervento il focolaio d'incendio è la fonte primaria dell'irraggiamento. Il calore radiante si muove in linea retta. Tutto ciò che è in linea con il fuoco viene riscaldato.

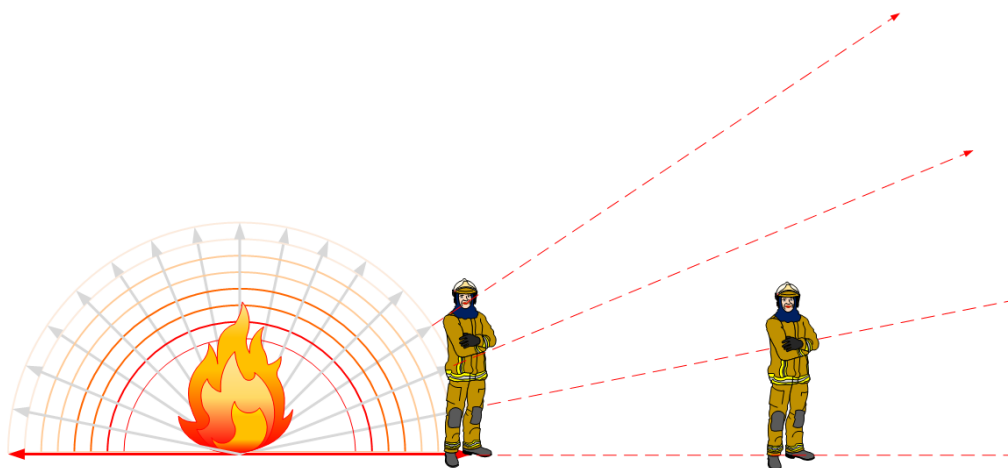


Figura 3 Entrambi i pompieri nella figura hanno le stesse dimensioni. Il pompiere più vicino alle fiamme sta assorbendo molto più calore radiante. Ciò è dimostrato dal numero di frecce che colpiscono il suo corpo. Più lontano dalla fonte di calore, meno calore radiante (meno frecce). (Drawing: Bart Noyens based on an idea of James Mendoza of San Jose Fire Department)

Lo strato di fumo caldo irradierà calore anche sugli oggetti che gli sono "in vista" e cioè gli oggetti situati sotto di esso. Ciò significa che nelle immediate vicinanze del fuoco, un divano verrà riscaldato da due lati. Ovviamente, anche il focolaio emette calore radiante. La quantità di calore proveniente da qui è generalmente piuttosto grande, tuttavia la distanza dal divano potrebbe essere per esempio di cinque metri. Lo strato di fumo sarà meno caldo del focolaio o delle fiamme sopra di esso. Tuttavia, il calore radiante trasferito dallo strato di fumo sul divano potrebbe essere molto più elevato a causa della minore distanza tra i due (meno di mezzo metro).

La distanza tra la fonte di calore e l'oggetto ricevente è un parametro importante nel trasferimento di calore radiante. Il calore radiante (quantificato in kW/m^2) è inversamente proporzionale alla distanza al quadrato. Ciò significa che il calore radiante trasferito diventa

quattro volte inferiore quando la distanza dalla fonte di calore raddoppia. La percentuale di calore radiante ricevuta in relazione al calore radiante che viene emesso, è chiamato fattore di visualizzazione (view factor in inglese n.d.t.). Il simbolo che definisce il fattore di visualizzazione è ϕ . La Figura 3 mostra chiaramente che il pompiere che si trova più vicino alla fonte di calore, sta ricevendo una quantità maggiore di calore radiante rispetto a quello che sta più lontano.

Un secondo parametro importante è la temperatura della fonte di calore. Per il trasferimento di calore convettivo, la quantità di calore trasferita è determinata dalla differenza di temperatura tra la fonte di calore e il ricevitore. Per il trasferimento di calore radiante, le cose sono più complicate. La fonte di calore emette calore. La quantità di calore che viene emessa è direttamente proporzionale alla temperatura in Kelvin alla quarta potenza. Questo è un po' più difficile da comprendere. In generale, la quantità di calore radiante diventa 16 volte maggiore quando la temperatura in Kelvin raddoppia. La temperatura in Kelvin è di 273° più alta di quando indicato in Celsius. Una temperatura di 400 Kelvin equivale a 127°C. Una temperatura di 800 Kelvin corrisponde a 527°C. Quando la temperatura di uno strato di fumo passa da 127°C a 527°C, il calore radiante proveniente da quello strato di fumo aumenta di 16 volte.

Ogni oggetto emette calore radiante. Il divano che si sta riscaldando emetterà quindi calore. Quando il divano ha raggiunto una temperatura di 77°C (350 K), anch'egli emette un po' di calore. È chiaro tuttavia, che il calore che viene irradiato dal divano è trascurabile rispetto a quello proveniente dallo strato di fumo.

È possibile calcolare il trasferimento di calore radiante:

$$\dot{Q} = \sigma \times \epsilon \times \phi \times T^4 \quad [kW/m^2]$$

Anche il calore radiante colpisce le vittime. Le vittime distese sul pavimento o in piedi su un balcone, possono ricevere calore radiante sia dallo strato di fumo che dalle fiamme. Spesso le persone cercano rifugio sui balconi. Anche se non sono più influenzate dal fumo, il calore radiante causerà comunque (gravi) ustioni. Una vittima in piedi su un balcone, accanto alle fiamme che escono da una grande porta scorrevole in vetro, ne resterà ustionata. Questo rappresenta un punto a favore dell'uso dell'attacco di transizione. Abbattendo le fiamme, la temperatura dei gas in uscita diminuirà in modo significativo. Il calore radiante diventerà rapidamente 16 volte inferiore. Ciò significa che la vittima può rimanere su quel balcone per un tempo 16 volte più lungo, prima di accumulare la stessa quantità di calore radiante. È tuttavia importante utilizzare la giusta quantità di acqua. Le prime decine di litri che entrano nelle fiamme sono in realtà gas molto caldi. Quando l'energia viene asportata da questi gas, vi sarà una riduzione considerevole. Il volume di gas che si restringe a sua volta crea spazio per l'espansione del vapore proveniente dall'acqua che sta evaporando. Se successivamente viene immessa più acqua nella stanza, evaporerà principalmente sulle pareti e sul soffitto. In questo caso, non ci sarà alcuna riduzione di volume ma solo una quantità extra di vapore. Questo eccesso di vapore si diffonderà ovunque ostacolando i vigili del fuoco con possibili danni alle vittime. È quindi molto importante chiudere la lancia immediatamente dopo l'abbattimento delle fiamme.



3 Fumo

La produzione di fumo dipende dal tipo di incendio. Quando si osservano gli incendi dal punto di vista della "produzione di fumo", possiamo discernere tre tipi di incendi: incendi covanti, ventilati e sotto ventilati. Un incendio covante è definito come un lento processo di combustione a basse temperature e senza fiamme. Gli incendi covanti e quelli sotto ventilati producono generalmente grandi quantità di gas (10 volte più degli incendi ventilati). La produzione di fumo è molto più bassa in caso di incendi ventilati. Quando si tratta di incendi covanti, molto dipende dalle dimensioni del fuoco e da come esso progredisce. Ad esempio, una sigaretta potrebbe cadere da qualche parte, innescare un incendio covante, ma quel fuoco non sarà in grado di crescere. Finché la superficie rimane limitata, anche la produzione di gas rimarrà bassa.

Il fumo è una miscela di gas, particelle solide (fuliggine) e particelle liquide in sospensione. Vengono prodotti anche gas diversi. La CO₂ e il CO sono due gas importanti nel fumo insieme ai gas della pirolisi. Quando è presente nel combustibile anche l'azoto, vi è la formazione di sostanze come l'HCN. Infine nel fumo vi è anche dell'ossigeno. Il livello di ossigeno nel fumo è ovviamente molto inferiore al normale 21% presente nell'aria. Il fumo sale a forma di pennacchio verso il soffitto dove forma uno strato di fumo. La composizione dello strato di fumo non è fissa ma in continua mutazione. All'interno dello strato di fumo, vi può essere una combustione localizzata in alcune parti. Questo dipende dalla temperatura e dall'ossigeno disponibile. Il livello di CO nello strato di fumo è direttamente proporzionale alla temperatura negli incendi limitati dal combustibile mentre è inversamente proporzionale alla temperatura negli incendi limitati dalla ventilazione. I livelli dei diversi gas nello strato di fumo cambiano costantemente. È un fenomeno molto complesso.

4 Effetti sul corpo umano

4.1 Calore

Quando la nostra pelle è riscaldata, proviamo prima una sensazione piacevole. Si pensi nuovamente al sole che irradia il suo calore sulla nostra pelle. Tutti però sanno cosa significhi scottatura da sole. Ognuno di noi ha avuto ustioni di primo grado a causa del fatto di rimanere troppo a lungo al sole. Quella piacevole sensazione può provocare ustioni a causa della lunga esposizione. Il calore radiante proveniente dal sole in una calda giornata estiva è di circa 1 kW/m². L'esposizione prolungata a questo livello di radiazione può provocare ustioni di primo grado.

La temperatura della pelle potrebbe essere ulteriormente riscaldata. Questo può essere fatto mediante trasferimento di calore convettivo o radiante come spiegato sopra. La soglia del dolore umano è a circa 43°C. Quando la pelle si riscalda oltre questo punto, si avverte dolore. Maggiore sono la temperatura e la superficie di epidermide coinvolta, maggiore sarà il dolore causato. Questo dolore può anche far "saltare le persone dalle finestre", anche quando è certo che non si può sopravvivere alla caduta. Le ustioni di primo grado, con il tipico arrossamento della pelle, si verificano quando la temperatura della pelle raggiunge i 48°C. Ad una temperatura di 55°C, iniziano a formarsi ustioni di secondo grado. Questo tipo di ustioni è caratterizzato da vesciche. A temperature più elevate, si verificano



ustioni di terzo grado. Ciò significa che la pelle nel punto di combustione ne risulta completamente distrutta.

Naturalmente c'è una differenza di temperatura tra la pelle e il fumo. A causa del trasferimento di calore (radiante e/o convettivo), la pelle si surriscalda.

I vigili del fuoco spesso sono interessati sia dalla convezione che dall'irraggiamento. Sovente lavorano all'interno di fumi ad una certa temperatura e allo stesso tempo sono esposti a una buona quantità di calore radiante (misurata in kW/m^2). Negli USA il NIST ha realizzato un grafico che indica l'effetto di entrambe le forme di trasferimento di calore. Il grafico tiene conto dell'effetto protettivo dei DPI.

Il grafico del NIST è, ovviamente, un modello semplificato di realtà. Offre comunque una buona stima iniziale su quanto tempo i vigili del fuoco possono operare in sicurezza a determinate condizioni prima che subiscano delle ustioni.

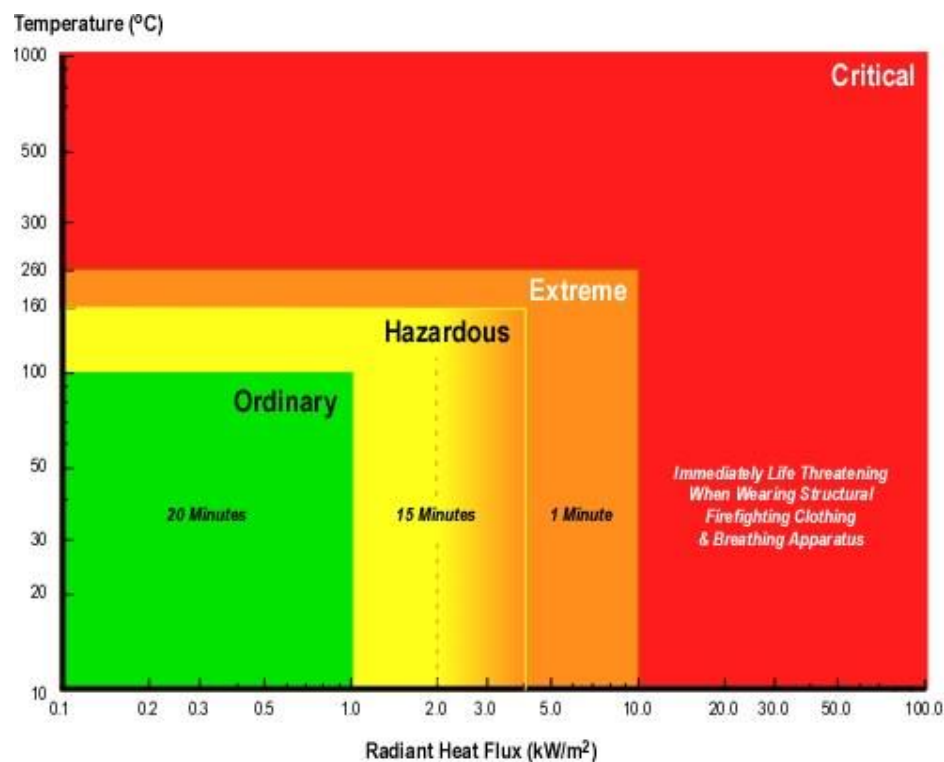


Figura 4 Limite di esposizione termica in relazione al flusso di calore radiante e alla temperatura ambiente. (Graph: NIST)

4.2 Effetto del fumo

Il fumo è letteralmente composto da centinaia di sostanze diverse. Tuttavia, l'effetto del fumo sul corpo umano può essere illustrato analizzando determinati gas chiave e grazie alle interazioni tra di essi.

Il fumo è causa di una vasta gamma di problemi per gli esseri umani:

- Il fumo è parzialmente composto da sostanze irritanti.

- Il fumo è parzialmente composto da sostanze asfissianti (CO, CO₂, HCN, ...);
- Il fumo ha un tasso di ossigeno molto basso.

I gas irritanti presenti nel fumo influiscono negativamente su occhi e polmoni. Ad alte concentrazioni, causano molto dolore. Inoltre, il fumo non consente alla luce di attraversarlo. Ciò significa che non si può vedere molto bene attraverso il fumo. Più denso è il fumo, meno si vede. Tutte queste caratteristiche rendono molto difficile per le persone camminare attraverso il fumo. Anche lo stato di salute iniziale di una potenziale vittima ha un ruolo. Gli anziani e i bambini piccoli soccombono più rapidamente agli effetti delle sostanze chimiche irritanti rispetto agli adulti in buona forma. Inutile dire che le persone con problemi alle vie respiratorie sono le prime ad essere in difficoltà.

Le persone che sono state esposte a gas irritanti possono sviluppare numerosi problemi di salute anche dopo l'esposizione. Durante le prime 24 ore dopo l'esposizione, potrebbe verificarsi un'inflammatione dei polmoni che può essere fatale. Quando tali infiammazioni sono adeguatamente trattate o prevenute del tutto, la maggior parte delle vittime mostra un completo recupero entro 3 mesi. Solo quando una vittima di un incendio lascia l'ospedale, possiamo davvero dire di aver salvato una vita. Spesso sono gli sforzi combinati dei vigili del fuoco e dei sanitari che "salvano" la vita delle vittime. I primi estraggono la vittima dagli incendi mentre gli sforzi dei secondi assicurano che rimangano vivi.

Il fumo è in parte costituito da CO. In un incendio, i livelli di CO spesso raggiungono livelli di 5.000/10.000 ppm. Queste sono concentrazioni estremamente alte. Il CO si lega all'emoglobina nel flusso sanguigno. L'emoglobina è la proteina presente nei globuli rossi che trasporta l'ossigeno. L'emoglobina può essere vista come una serie di camion che trasportano l'ossigeno dai polmoni verso il resto del corpo. Quando uno di quei camion è carico di CO, non può più trasportare ossigeno. Se troppi di questi camion trasportano CO, la fornitura di ossigeno fresco viene notevolmente ridotta. La quantità di CO è quantificata in % COHb. Alti livelli di CO nel flusso sanguigno sono la principale causa di morte per le persone intrappolate negli incendi. Per gli esseri umani, si applica la regola di Haber. Haber afferma che l'avvelenamento da CO dipende sia dal tempo di esposizione che dal livello di CO nell'atmosfera. Ciò significa che un'esposizione di cinque minuti a una concentrazione di 1.000 ppm ha gli stessi effetti dell'esposizione a 500 ppm per dieci minuti.

Il fumo è spesso costituito da acido cianidrico. Concentrazioni di 1.000 ppm sono possibili negli incendi. L'HCN è fino a 25 volte più velenoso del CO. L'effetto dell'HCN si aggiunge agli effetti del CO. L'HCN nel fumo fa perdere conoscenza alle vittime anche più rapidamente di quanto sarebbe senza. Ciò riduce ulteriormente il tempo a disposizione delle vittime. Infine, vale la pena notare che la regola di Haber non si applica all'HCN. Le persone non sopravvivono a lungo con livelli di HCN di 200 ppm e oltre.

Il fumo ha anche alte concentrazioni di CO₂. Questo gas provoca l'iperventilazione del corpo umano. L'azione naturale dei polmoni è quello di far uscire la CO₂ dal flusso sanguigno. L'iperventilazione rende l'inalazione degli altri gas tossici ancora più veloce.

La concentrazione di ossigeno all'interno del fumo è ridotta. A volte, non ne rimane quasi nulla del 21% originale. Bassi livelli di ossigeno sono molto pericolosi. Durante un incendio abitazione, talvolta vi è ancora sufficiente ossigeno per sostenere la vita vicino al



pavimento. All'interno dello strato di fumo, sono state misurate concentrazioni dell'1%. A ciò si aggiunge l'alta temperatura dello strato di fumo. Le persone che respirano quel tipo di fumo, spesso hanno poche possibilità di sopravvivere. Sono stati segnalati casi in cui delle persone aprendo una porta in un compartimento si sono trovate improvvisamente nel fumo che fuoriesce. Anche dopo una sola boccata di fumo vi è stata un'immediata perdita di coscienza.

Il fumo racchiude anche un certo numero di altri gas come NO_x, ma questi di solito sono di minore rilevanza.

In generale, il fumo ha tre effetti sul corpo umano:

1. I gas irritanti ostacolano gravemente l'evacuazione. Gli occhi lacrimano copiosamente e le vie aeree iniziano a far male con possibile collasso delle vittime;
2. I livelli di gas a cui sono esposte le vittime possono farli disorientare, perdere conoscenza o persino morire. CO e HCN sono i gas più significativi in questo senso;
3. Alti livelli di gas irritanti possono persino provocare la morte di una vittima anche dopo essere stata salvata dall'incendio a causa di infiammazione dei polmoni e edema polmonare.

Il 75% delle vittime che muoiono per inalazione di fumo si trovano in stanze diverse da dove ha avuto origine l'incendio. Le vittime perciò muoiono principalmente a causa degli effetti del fumo. Il professor David Purser ha sviluppato un modello per calcolare gli effetti del fumo. Si presenta con un'approssimazione della dose che una persona assorbe: la dose efficace frazionaria (FED). Con esso, afferma che mezzo secondo in un ambiente con 1000 ppm di CO è meno letale di 10 minuti in un ambiente a 100 ppm. Non appena la FED supera un valore stabilito, le vittime perdono conoscenza. Quando la FED aumenta ulteriormente vi è la morte degli esposti.

5 Prima le operazioni di salvataggio e poi l'attacco all'incendio?

I diversi paragrafi sopra illustrano come il fumo compromette la sopravvivenza di eventuali vittime. Il modo più rapido per aumentare le loro probabilità di sopravvivenza è rimuoverle dal fumo. Per raggiungere questo obiettivo, le vittime devono essere prima individuate. Questo è spesso molto difficile, specialmente in grandi compartimenti.

Un secondo modo per migliorare le probabilità di sopravvivenza delle vittime è rimuovere il fumo. Per raggiungere questo obiettivo, i vigili del fuoco devono ventilare il compartimento. Diluendo il fumo con aria fresca, la concentrazione di gas sia irritanti che tossici diminuirà mentre la concentrazione di ossigeno aumenterà. Tuttavia, l'ossigeno in più potrebbe avere conseguenze significative per l'incendio, soprattutto quando non è stato ancora spento.

La ventilazione può quindi diventare una tattica pericolosa negli interventi dei giorni nostri. Solo quando si tratta di (piccoli) incendi covanti, può essere realizzata in relativa sicurezza. Per altri incendi (ventilati e sotto ventilati) è importante che prima della ventilazione, si



inizi a spegnere. Spesso è difficile averne ragione. All'inizio dell'attacco, la posizione esatta del fuoco spesso non è (interamente) chiara. È quindi impossibile ventilare senza prima fare qualcosa per il fuoco. Altrimenti, può darsi che l'incendio cresca in modo tale che le vittime muoiano a causa degli effetti del calore.

Per salvare vite umane, il fumo deve essere rimosso. La ventilazione è la soluzione a questo problema. Ma per essere in grado di ventilare senza che l'incendio cresca in modo significativo a causa dell'ossigeno aggiunto, l'incendio deve essere prima spento. È così che possiamo salvare delle vite. A causa delle mutate condizioni di incendio (rispetto a 50 anni fa) non è più possibile realizzare i salvataggi prima dell'estinzione. Il fuoco deve essere prima spento in modo da poter ventilare e salvare vite (o salvare vite e ventilare).

Per prima cosa spegni l'incendio!

6 Bibliografia

- [1] *Merci B (2010) Active fire protection: Smoke and heat control, course of the Post graduate Studies in Fire Safety Engineering, UGent*
- [2] *Gottuk D, Lattimer B (2016) Effect of combustion conditions on species production, in SFPE Handbook of fire protection engineering*
- [3] *Purser D (2016) Combustion toxicity, in SFPE Handbook of fire protection engineering*
- [4] *Galea E (2011) Human behavior in fire, course of the Post graduate Studies in Fire Safety Engineering, UGent*
- [5] *Lambert K, Baaij S (2018) Brandverloop: Technisch bekeken, tactisch toegepast, 2^{de} editie*

