

Como é que as pessoas morrem nos incêndios?

1 Introdução

Todos os bombeiros sabem que as pessoas morrem envoltas em chamas. No entanto, nem sempre têm uma visão real de como as pessoas morrem. Um incêndio produz fumo e calor. Ambos os componentes são uma potencial causa de morte para os seres humanos. Este artigo faz uma análise mais detalhada deste assunto, tendo também em consideração as implicações deste conhecimento para os nossos métodos de operação. A mudança de comportamento dos incêndios influencia de alguma forma estes dois fatores. Assim, como e porquê isto tem impacto?

2 Calor

Um incêndio produz energia. Essa energia é utilizada para aquecer o ambiente envolvente. O fator mais importante é a potência do incêndio ou a taxa de libertação de calor (TLC). A TLC do incêndio é tipicamente medida em kW ou MW, e, diz-nos a quantidade de energia, medida em J, produzida a cada segundo.

A TLC do incêndio é maioritariamente transferida por convecção e radiação. Uma boa estimativa é que 70% da TLC é transferida por convecção enquanto a radiação é responsável pelos restantes 30%.

2.1 Transferência de calor por convecção



figura 1 Acima da vela, pode-se sentir a parte convectiva do calor produzido pela chama. (Foto: Szymon Kokot-Góra)

A transferência de calor por convecção é responsável pela maior transferência de energia produzida pelo incêndio. O calor por convecção pode facilmente ser demonstrado pelo recurso a uma vela. Segure a mão 10cm acima da vela, como mostra a figura 1. O calor que existe é o do ar ascendente (fumo). Segurando a mão ao lado da vela, a uma distância semelhante, pode sentir a diferença entre a parte convectiva e o calor radiante.

Primeiro, o calor convectivo é transferido do incêndio para o fumo. Quanto maior a TLC do incêndio, mais quente será o fumo.

No entanto, existe outro fator que também determina o quão quente o fumo se vai tornar, a altura da camada de fumo. Um incêndio urbano numa sala de tamanho normal terá inicialmente fumo a subir 2,6 metros antes de atingir o teto. Durante esta ascensão, o ar será misturado ao fumo (ver a figura 2). O volume e a massa do fumo aumentarão continuamente durante este percurso. Quanto mais ar frio for misturado ao fumo, menor será a temperatura final deste. Portanto, o fumo que chega ao teto de um armazém de 5 metros de altura será menos quente do que numa cozinha de 2,6 metros.

Na fase seguinte de incêndio, forma-se uma camada de fumo. Suponha que está, num apartamento típico que tem cerca de um metro de espessura de camada de fumo e, de seguida, o fumo que sai desde o solo sobe apenas um metro e meio. Significa isto que menos ar é misturado e o fumo fica mais quente. Além disso, o incêndio aumentará frequentemente a sua taxa de libertação de calor em comparação com a fase inicial de desenvolvimento. Assim, é adicionado mais calor e, em simultâneo, misturado menos ar fresco. Resulta isto resulta em fumo mais quente do que no início do incêndio.

A camada de fumo quente tornou-se agora numa fonte de calor. Transferindo calor para outros objetos, estando esta cercada por paredes e teto. Esta camada de fumo é mais quente do que as paredes e o teto. Havendo uma transferência de calor por convecção do fumo para estes elementos. Enquanto o fumo estiver a sair, arrefecerá parcialmente. Em simultâneo as paredes e o teto aquecem, à medida que continuam a aquecer, absorvem cada vez menos calor da camada de fumo. A transferência de calor por convecção é de facto proporcional à diferença de temperatura (ΔT) entre a camada de fumo, as paredes e o teto. Estes elementos, por sua vez, transferem calor por radiação e condução.

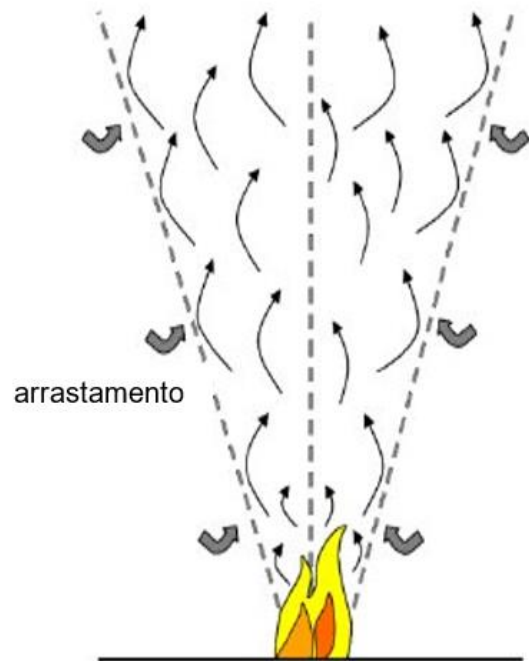


Figura 2 Enquanto o fumo aumenta, é misturado mais e mais ar. Chamando-se a isto arrastamento. (Figura: Edward Johnson)

É possível calcular o calor transferido por convecção:

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

Quando o fumo que flui através de um edifício encontra uma abertura, sai, constituindo um volume / uma massa de fumo que sai do edifício. Equivale isto a uma saída do edifício duma significativa quantidade de energia.

Quando a camada de fumo desce até cerca de meio metro do chão, os bombeiros aquando de um ataque interior ficam parcialmente envolvidos nela. A parte do corpo que está dentro do fumo absorve o calor. De facto, a área de superfície do seu corpo (A) envolvida no fumo, age da mesma forma que as paredes do edifício. A camada de fumo irá transferir calor para o EPI da equipa. A quantidade de calor transferido dependerá da diferença de temperatura entre o EPI e o fumo. Sendo transferido calor do EPI para o corpo do bombeiro por condução.

Se a camada de fumo descer até ao chão, qualquer vítima que esteja nesse espaço sentirá imediatamente os efeitos da transferência de calor para o seu corpo. As roupas que vestem oferecem pouca ou nenhuma proteção. O mesmo é válido para vítimas que estejam em pé numa janela, no fluxo de saída de gases, recebendo também calor

destes. Um problema adicional aqui é que a transferência de calor por convecção depende da velocidade da saída do fumo incluída no coeficiente de transferência de calor por convecção (h). Este coeficiente é determinado por diversas variantes, uma das quais, a velocidade. Quanto mais rápido o fumo estiver a fluir, mais calor será transferido.

Finalmente, a camada de fumo ao sair transfere muito calor por radiação, irradiando calor para objetos que se localizam abaixo desta.

2.2 Radiação

A radiação é uma forma de transferência de calor bem conhecida por todos. Pense na sensação do sol brilhando no seu rosto num dia quente de verão. Todos podem sentir o efeito do calor radiante. Numa fogueira ou lareira, isto evidenciava ainda mais, sabemos também sabem que o calor radiante aumenta à medida que a distância da fonte de calor se torna menor.

No incêndio, a principal fonte de calor radiante será o foco de incêndio, as suas chamas irradiam calor. O calor radiante move-se em linha reta. Qualquer coisa que esteja na linha de visão do incêndio (e das chamas) será aquecida.

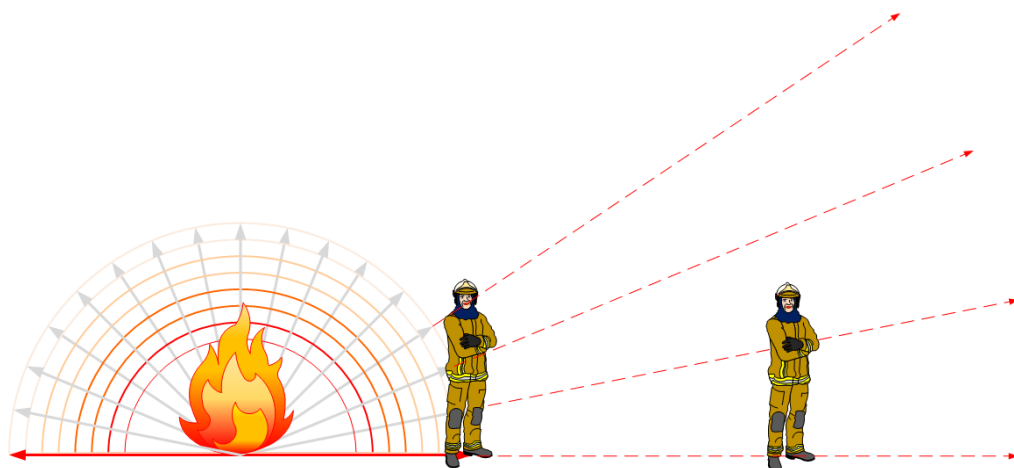


Figura 3 Os dois bombeiros da figura têm o mesmo tamanho, mesmo que tal não pareça. O bombeiro mais próximo das chamas absorverá muito mais calor radiante. Isto é ilustrado pelo número de flechas que atingem o seu corpo. Quanto mais longe da fonte de calor, menos calor radiante (setas). (Desenhado: Bart Noyens baseado numa ideia de James Mendoza de San Jose Fire Department)

A camada de fumo quente irradia também calor para os objetos na sua "linha de visão", ou seja, os objetos localizados abaixo desta. Significa isto que, na proximidade do incêndio, um sofá seja aquecido por dois lados. Obviamente, o foco de incêndio também emite calor radiante. A quantidade de calor proveniente daqui é geralmente bastante elevada; no entanto, a distância até ao sofá, por exemplo, pode ser de cinco metros. A camada de fumo estará menos quente que o foco de incêndio ou das suas chamas. No entanto, o calor radiante transferido da camada de fumo para o sofá pode ser muito

maior devido à menor distância entre os dois. Por exemplo, a camada de fumo pode facilmente chegar a meio metro do sofá.

A distância entre a fonte de calor e o objeto recetor é um parâmetro importante na transferência de calor radiante. O calor radiante (quantificado em kW/m²) é inversamente proporcional à distância ao quadrado. Significa isto que o calor radiante transferido se torna quatro vezes menor à medida que a distância da fonte de calor duplica. A proporção de calor radiante recebido relativamente ao emitido é identificada por fator de visualização. O símbolo que define o fator de visualização é Φ . A Figura 3 mostra claramente que o bombeiro que está mais próximo da fonte de calor está a receber uma maior quantidade de calor radiante do que aquele que está mais distante.

Um segundo parâmetro importante é a temperatura da fonte de calor. Para transferência de calor por convecção, a quantidade de calor transferida é determinada pela diferença de temperatura entre a fonte de calor e o recetor. Para transferência de calor radiante, o processo é mais complicado. A fonte de calor emite calor. Esta quantidade de calor emitida é diretamente proporcional à temperatura em Kelvin da quarta potência. Sendo isto um pouco mais difícil de entender. Dum modo geral, a quantidade de calor radiante torna-se 16 vezes maior quando a temperatura em Kelvin duplica. A temperatura em Kelvin é 273 mais alta do que quando indicada em graus Celsius. Uma temperatura de 400 Kelvin é igual a 127°C. Uma temperatura de 800 Kelvin corresponde a 527°C. Quando a temperatura de uma camada de fumo aumenta de 127°C para 527°C, o calor radiante proveniente dessa camada de fumo aumenta 16 vezes.

Cada objeto emite calor radiante. O sofá que está a aquecer também emite calor. Quando este atingir uma temperatura de 77°C (350K), emitirá também algum calor. É claro, no entanto, que o calor que irradia do sofá é insignificante comparativamente ao que provem da camada de fumo.

É possível calcular a transferência de calor radiante:

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

O calor radiante também pode ser emitido para as vítimas. As vítimas deitadas no chão ou em pé na varanda podem receber calor radiante proveniente da camada de fumo e das chamas. Na prática, com frequência encontramos vítimas que fugiram para uma varanda, embora já não sendo afetadas pelo fumo, o calor radiante ainda lhes pode causar ferimentos graves. Uma vítima em pé na varanda, ao lado de chamas que saem de uma grande porta de vidro, queimar-se-á. Isto por si só, é um argumento para o recurso ao ataque de transição. Ao debelar as chamas, a temperatura dos gases existentes diminui significativamente. O calor radiante rapidamente se tornar 16 vezes menor. Isto significa que a vítima pode permanecer na varanda por um período 16 vezes maior, antes de acumular a mesma quantidade de calor radiante. No entanto, é importante usar a quantidade certa de água durante esta tática. As primeiras dezenas de litros que entram no compartimento em chamas evaporam e extraem uma enorme quantidade de energia destas. Estas chamas são realmente gases superquentes. Quando a energia destes gases é extraída, diminuem consideravelmente de volume. Esta redução do volume dos gases, é por sua vez, o espaço para o vapor proveniente da água que se

está a evaporar se possa expandir e ocupar. Se mais água for lançada na sala depois desta ação, evapora principalmente nas paredes e no teto. Desta vez, não haverá volume que esteja a contrair, apenas a ser formada uma quantidade extra de vapor. Este excesso de vapor espalhar-se-á por toda parte e pode prejudicar gravemente os bombeiros e até prejudicar as vítimas. Fechar a agulheta imediatamente após as chamas terem sido debeladas é, assim, muito importante.

3 Fumo

A produção de fumo depende do tipo de incêndio, ao observar os incêndios por este ponto de vista, podemos definir três tipos de incêndios: incêndios em chamas, incêndios ventilados e incêndios infraventilados. Um incêndio fumegante é definido como um processo de combustão lenta com baixas temperaturas e sem chamas. Incêndios fumegantes e incêndios infraventilados produzem geralmente grandes quantidades de gases (10 vezes mais que os incêndios ventilados). A produção de fumo é muito menor em incêndios ventilados. Ao lidar com incêndios fumegantes, depende muito da sua dimensão e de como este se desenvolve. Por exemplo, um cigarro pode cair nalgum local, iniciar um incêndio fumegante, mas esse incêndio poderá não crescer. Enquanto a área de superfície do incêndio fumegante se mantiver de pequena dimensão, a produção de gases também se manterá baixa.

O fumo é uma mistura de gases, partículas sólidas (fuligem) e partículas líquidas em suspensão. Diferentes gases estão também a ser produzidos. CO₂ e CO são dois gases importantes no fumo, juntamente com os gases de pirólise. Quando o nitrogênio está presente no combustível do incêndio, são também formadas substâncias como HCN. Por fim, haverá com frequência uma parte residual de oxigénio no fumo. O nível de oxigénio no fumo será obviamente muito menor do que os 21% por norma existentes no ar. O fumo subirá em forma de plumas em direção ao teto, concentrando-se numa camada. A composição desta camada de fumo não é fixa. Está constantemente a mudar. Dentro dela, em determinadas partes existirá alguma combustão, dependendo isto da temperatura e do oxigénio disponível. O nível de CO na camada de fumo é diretamente proporcional à temperatura nos incêndios controlados pelo combustível e é inversamente proporcional à temperatura nos incêndios controlados pela ventilação. Os diferentes níveis dos gases na camada de fumo estão a mudar constantemente. Sendo um fenómeno muito complexo.

4 Efeitos no corpo humano

4.1 Efeito do calor

Quando a nossa pele é aquecida, primeiro sentimos uma sensação agradável. Pensemos novamente no sol irradiando calor sobre a pele, todos sabemos o que é uma queimadura solar. Cada um de nós teve queimaduras de primeiro grau por ficar muito tempo ao sol. Esta agradável sensação pode resultar em queimaduras devido à longa exposição. O calor radiante proveniente do sol num dia quente de verão é de cerca de 1kW/m². A exposição prolongada a este nível de radiação pode levar a queimaduras de primeiro grau.



A temperatura da pele pode ser ainda mais aquecida, podendo isto ocorrer por transferência de calor, convecção ou radiação, conforme acima explicado. O limiar da dor humana é de cerca de 43°C. Quando a pele é aquecida além deste ponto, será sentida dor. Quanto mais alta a temperatura e maior a área da superfície que estiver a queimar, mais dor será causada. Esta dor pode até fazer com que as pessoas saltem pelas janelas, mesmo quando é certo que não sobrevivem à queda.

As queimaduras de primeiro grau, com a vermelhidão típica da pele, ocorrerão quando a temperatura da pele atingir 48°C. A uma temperatura de 55°C, começarão a formar-se queimaduras de segundo grau. Este tipo de queimaduras é caracterizado por bolhas. A temperaturas mais elevadas, ocorrerão queimaduras de terceiro grau. Significando isto que a pele é completamente destruída.

É claro que há uma diferença de temperatura entre a pele de alguém e a do fumo, por exemplo. Devido à transferência de calor (radiante e / ou convectiva), a pele aquece.

Dum modo geral os bombeiros enfrentam transferência de calor por convecção e por radiação. Costumam trabalhar dentro do fumo a uma temperatura específica e sendo simultaneamente expostos a uma certa quantidade de calor radiante (medido em kW/m²). A organização norte-americana NIST formulou um gráfico que indica o efeito de ambas as formas de transferência de calor. O gráfico também tem em consideração o efeito protetor dos EPIs.

O gráfico do NIST é, obviamente, um modelo simplificado da realidade. Ainda assim, proporciona uma boa estimativa inicial de quanto tempo é seguro para os bombeiros operarem em determinadas condições antes de sofrerem queimaduras.



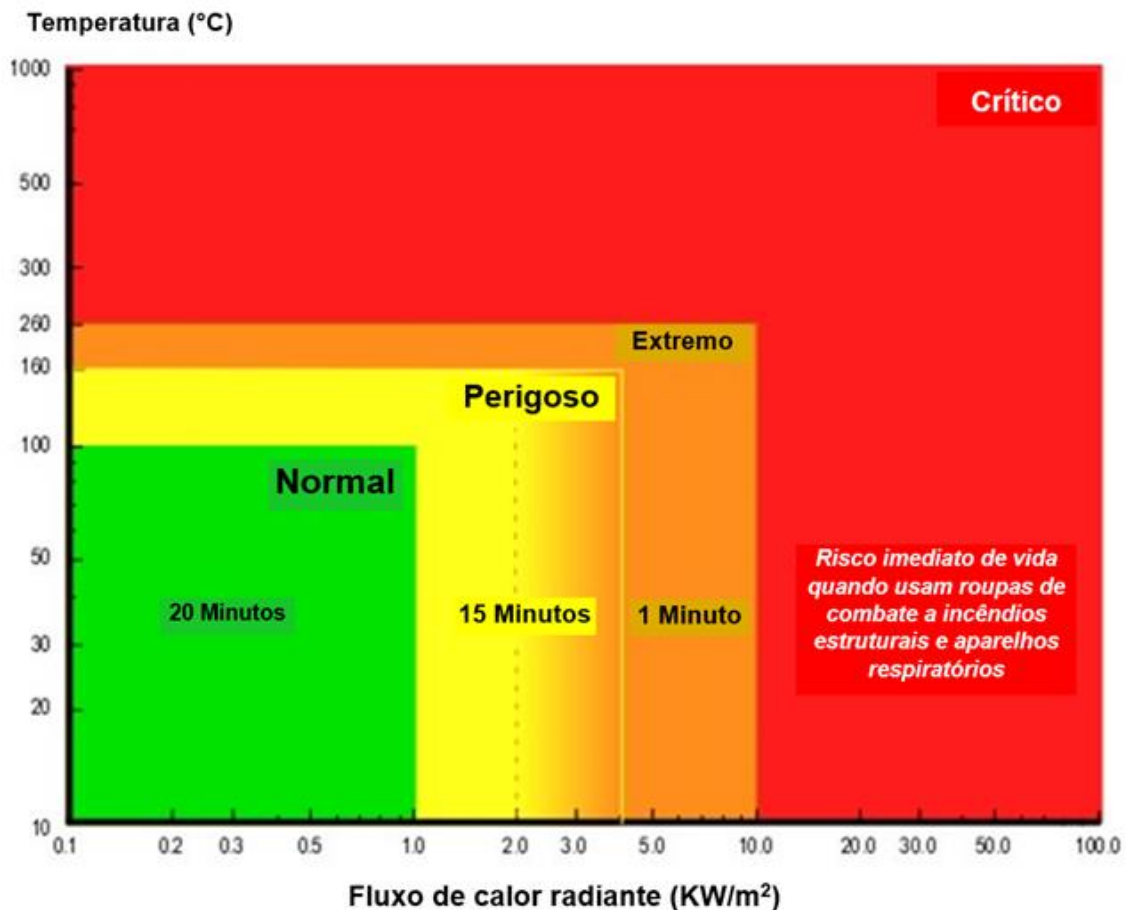


Figura 4 Limite de exposição térmica relativamente ao fluxo de calor radiante e temperatura ambiente. (Gráfico: NIST)

4.2 Efeitos do fumo

O fumo é literalmente composto por centenas de diferentes substâncias. Ainda assim, o seu efeito no corpo humano pode ser ilustrado observando-se certos gases-chave e a interação entre esses gases.

O fumo origina uma ampla gama de problemas para os seres humanos, consistindo:

- Parcialmente em substâncias irritantes;
- Parcialmente em asfixiantes (CO, CO₂, HCN, ...);
- Tendo baixos níveis de oxigénio.

Os gases irritantes do fumo afetam negativamente os olhos e os pulmões. Em altas concentrações, causam dor genuína. Além disso, o fumo não permite que a luz viaje através dele. Significando que não se pode ver muito bem através do fumo. Quanto mais espesso este for, menor visão se tem. Todas estas características tornam muito difícil as pessoas conseguirem passar pelo fumo. A saúde física duma potencial vítima de incêndio também desempenha o seu papel. Idosos e crianças pequenas, sucumbirão mais rapidamente aos efeitos de substâncias irritantes químicas do que adultos em boa forma. Escusado será dizer que as pessoas com doença reativa das vias aéreas experimentam

problemas físicos muito mais rapidamente quando expostas do que uma pessoa com saúde normal.

As pessoas que foram expostas a gases irritantes podem desenvolver vários problemas de saúde mesmo após o término da exposição. Ainda não estão completamente fora de perigo, depois de terem sido removidas do fumo. Durante as primeiras 24 horas após a exposição, pode ocorrer uma inflamação dos pulmões, que pode ser fatal. Quando estas inflamações são adequadamente tratadas ou prevenidas por completo, a maioria das vítimas tem uma recuperação completa em 3 meses. Somente quando uma vítima de incêndio urbano sai do hospital, se pode realmente considerar que salvamos uma vida. Muitas vezes, são os esforços combinados do corpo de bombeiros que "salvam" a vida das vítimas de incêndio e os serviços médicos que garantem que elas permaneçam vivas.

O fumo é também parcialmente composto por CO. Numa situação de incêndio, os níveis de CO costumam atingir 5000 a 10000ppm. Sendo estas concentrações muito elevadas. O CO liga-se à hemoglobina na corrente sanguínea. A hemoglobina é a proteína nos glóbulos vermelhos que transporta oxigênio podendo esta ser vista como um conjunto de camiões que transportam oxigênio dos pulmões para o resto do corpo. Quando um destes camiões é carregado com CO, não pode mais transportar oxigênio. Se muitos destes camiões transportam CO, o suprimento de oxigênio fresco é bastante reduzido. A quantidade de CO é quantificada em %COHb. Altos níveis de CO na corrente sanguínea são a principal causa de morte de pessoas retidas em incêndios urbanos. Para seres humanos, aplica-se a regra de Haber. Haber afirma que o envenenamento por CO depende do tempo de exposição e do nível de CO na atmosfera. Significa isto que uma exposição de cinco minutos a uma concentração de 1000ppm tem os mesmos efeitos que uma exposição a 500ppm por dez minutos.

O fumo geralmente também contém cianeto de hidrogênio. São possíveis concentrações de 1000ppm nos TO de incêndio. O HCN é também um gás tóxico, e é até 25 vezes mais venenoso que o CO. O efeito do HCN deve ser adicionado aos efeitos do CO. O HCN no fumo fará com que as vítimas percam a consciência ainda mais rapidamente do que seria o caso sem HCN. Isto reduz ainda mais o tempo que estas têm para serem resgatadas. Por fim, vale evidenciar que a regra de Haber não se aplica à HCN. As pessoas não sobreviverão por muito tempo com níveis de HCN de 200ppm ou até mais.

O fumo também possui altas concentrações de CO₂. Este gás faz com que o corpo humano hiperventile. O objetivo natural do nosso corpo é colocar o CO₂ fora da corrente sanguínea. No entanto, a hiperventilação faz com que os outros gases tóxicos sejam inalados ainda mais rapidamente.

Foi reduzida a concentração de oxigênio dentro do fumo. Por vezes, quase não resta oxigênio dos 21% originais. Baixos níveis de oxigênio são muito perigosos. Durante um incêndio numa casa, dum modo geral, o nível de oxigênio existente ainda permite manter a sobrevivência junto do solo. Dentro da camada de fumo, foram medidas concentrações de 1%. Adicionando a este fator, a alta temperatura da camada de fumo. As pessoas que respiram este tipo de fumo têm geralmente poucas possibilidades de sobrevivência. Existiram casos relatados em que as pessoas abrem a porta de um compartimento de incêndio e de repente vêm-se envolvidas no pesado fumo que está a sair. Apenas com um único suspiro dentro do fumo, sucumbem e caem inconscientes no solo.



O fumo possui vários outros gases, como NO_x, mas estes geralmente têm menor significado.

De um modo geral, o fumo tem três efeitos no corpo humano:

1. Gases irritantes dificultam severamente a locomoção. Os olhos ficam lacrimejantes e as vias aéreas começam a doer. Isto pode até causar o colapso das vítimas.
2. Os níveis de gases aos quais as vítimas estão expostas podem causar desorientação, perda de consciência ou até a morte. CO e HCN são os gases mais importantes a este respeito.
3. Altos níveis de gases irritantes podem até resultar na morte das vítimas após terem sido resgatadas do incêndio, causando inflamação nos pulmões e edema pulmonar.

75% das vítimas que morrem por inalação de fumos são encontradas em salas que não são onde os incêndios tiveram origem. Portanto, as vítimas morrem principalmente por causa dos efeitos do fumo. O professor David Purser desenvolveu um modelo para calcular os efeitos do fumo. Ele apresenta uma aproximação da dose que uma pessoa absorve: a dose efetiva fracionada (DEF). Com esta, ele afirma que meio segundo num ambiente de 1000ppm de CO não é tão ruim quanto 10 minutos num ambiente de 100ppm. Assim que a DEF ultrapassa um valor definido, as vítimas perdem a consciência. Quando a DEF aumenta ainda mais, elas morrem.

5 Primeiro salvar as vítimas, depois extinguir o incêndio?

Os parágrafos acima explicam como as vítimas são comprometidas pelos efeitos do fumo. A forma mais rápida de aumentar as suas possibilidades de sobrevivência é remover as vítimas do fumo. Para conseguir isto, primeiro as vítimas têm de ser encontradas. Sendo isto dum modo geral muito difícil, especialmente em compartimentos de maior dimensão.

Uma segunda forma de melhorar as possibilidades de sobrevivência das vítimas é removendo o fumo. Para atingir este objetivo, o corpo de bombeiros deve ventilar. Ao diluir o fumo com ar fresco, a concentração de gases irritantes e tóxicos diminui enquanto a concentração de oxigénio aumenta. Este oxigénio extra, no entanto, pode ter consequências drásticas para o incêndio, especialmente quando ele ainda não foi extinto.

A ventilação pode, portanto, tornar-se uma tática perigosa num teatro de operações dum incêndio dos dias de hoje. Somente quando se está perante (pequenos) incêndios fumegantes, isto pode ser feito com relativa segurança. Para outros incêndios (ventilados e infraventilados), é importante que, antes da ventilação, seja iniciada a extinção. Muitas vezes, é difícil garantir que o esforço de extinção seja bem-sucedido. No início do ataque, a localização exata do incêndio de um modo geral não é (totalmente) clara. É então impossível ventilar sem antes fazer algo sobre o incêndio. Caso contrário, pode ser que este cresça de tal forma que as vítimas perecem devido aos efeitos do calor.



Para salvar vidas humanas, é preciso remover o fumo. A ventilação é a solução para este problema. Mas, para poder ventilar sem que o incêndio cresça significativamente devido ao oxigénio adicionado, o incêndio deve ser primeiro dominado. É assim que podemos salvar vidas. Devido a mudanças nas condições de incêndio (em oposição há 50 anos atrás), não podemos mais economizar antes de extinguir. O incêndio deve ser primeiro extinto para que possamos ventilar e salvar vidas (ou salvar vidas e ventilar).

Primeiro, extinga o incêndio!

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*

