Comportamento de incêndio em vários compartimentos

1 Introdução

Todo bombeiro conhece a curva de desenvolvimento do incêndio da figura 1. Esta curva representa uma possível forma pela qual um incêndio se pode desenvolver dentro de um compartimento. Para que esta curva se manifeste, devem ocorrer várias condições:

- Tem de haver combustível suficiente dentro do compartimento;
- A carga de combustível deve estar disposta de modo que um incêndio se possa desenvolver de tal forma que a sua taxa de liberação de calor (TLC) exceda o limite necessário para dar origem a um flashover.
- Deve existir ar em quantidade suficiente (ventilação) para permitir que o incêndio atinja tal taxa de liberação de calor.

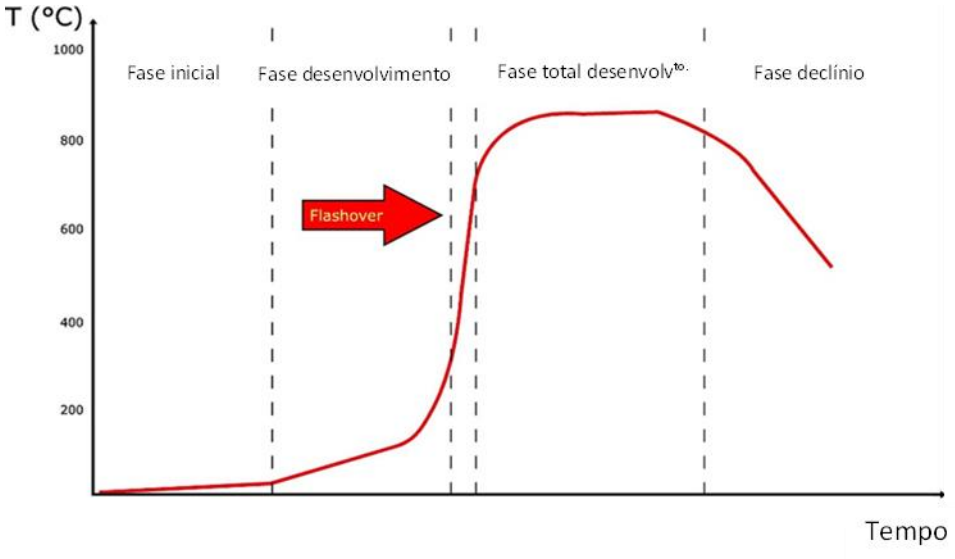

figura 1 A curva de desenvolvimento de incêndio ventilado *(Figura: Karel Lambert)*

Nem todo bombeiro entende que esta curva ilustra a evolução da temperatura em função do tempo, simultaneamente a taxa de liberação de calor é revista nas condições acima descritas. No artigo *The fire growth curve revisited* o incêndio é apresentado em 'tempo-TCL' graph [2]. O artigo analisou o impacto de diferentes variantes (ventilação, carga de combustível) sobre a TCL.

Esta curva refere-se apenas a um incêndio num único compartimento. Então, como se comportará e desenvolverá um incêndio quando existem vários compartimentos envolvidos*?*

Neste artigo, examinamos mais atenta e detalhadamente o comportamento do incêndio em vários compartimentos. O artigo não será exaustivo, nem o pretende ser, o foco vai ser colocado num incêndio que tem início numa sala e se propaga através de uma porta para uma segunda sala.

2 Fumo é do que se trata

Todo incêndio produz fumo. Sendo este crucial para a propagação do incêndio porque o próprio fumo espalha três coisas de vital importância para as equipes de combate a incêndios:

1. Propagação de energia;
2. Propagação de combustível;
3. Propagação de toxicidade.

A secção seguinte aborda com detalhe a propagação do fumo e suas consequências.

2.1 Propagação do fumo

Um incêndio produz fumo. Esse fumo é composto por partículas de fuligem, aerossóis e gases. No entanto, na sua maior parte, o fumo consiste em ar. Como é que isto é na verdade?
O fumo é produzido pelo foco de incêndio. Grande parte da energia libertada (o calor) pelo incêndio é utilizada para aquecer o fumo. Assim, a TLC pelo incêndio desempenha um papel importante na propagação do fumo: quanto maior a TLC, mais "força" o incêndio tem para empurrar o fumo para longe de si mesmo, por assim dizer. A temperatura inicial do fumo depende da quantidade de ar que possa fluir para o foco do incêndio. Aqui é importante dimensão/contorno do foco do incêndio. Quanto maior este for, mais ar pode fluir. Se a TLC se mantiver constante, a temperatura emitida pelo fumo de um incêndio com uma maior dimensão/contorno, será menor.

Como o fumo é mais quente que o ar circundante, ele sobe. Isto ocorre pelo mesmo efeito que faz com que um balão de ar quente suba: o ar quente sobe. No entanto, num balão de ar quente, o ar fica preso no seu interior. Não podendo misturar-se com o ar mais frio do exterior.

Neste aspeto o fumo difere um pouco. O fumo sobe e, à medida que sobe, o ar vai-se misturando cada vez mais na nuvem de fumo. Fazendo com que várias coisas ocorram:

- A temperatura do fumo diminui. O fumo quente originado pelo incêndio mistura-se com o ar mais frio existente no seu redor;
- Isto faz com que a diferença de temperatura com o ar ao redor também diminua, e fumo suba com menor rapidez que anteriormente;
- A massa de fumo também aumenta. Afinal, grande parte do ar misturou-se com o fumo.

A temperatura do fumo, a sua velocidade de subida bem como a sua massa alteram-se à medida que este sobe (ver figura 2).

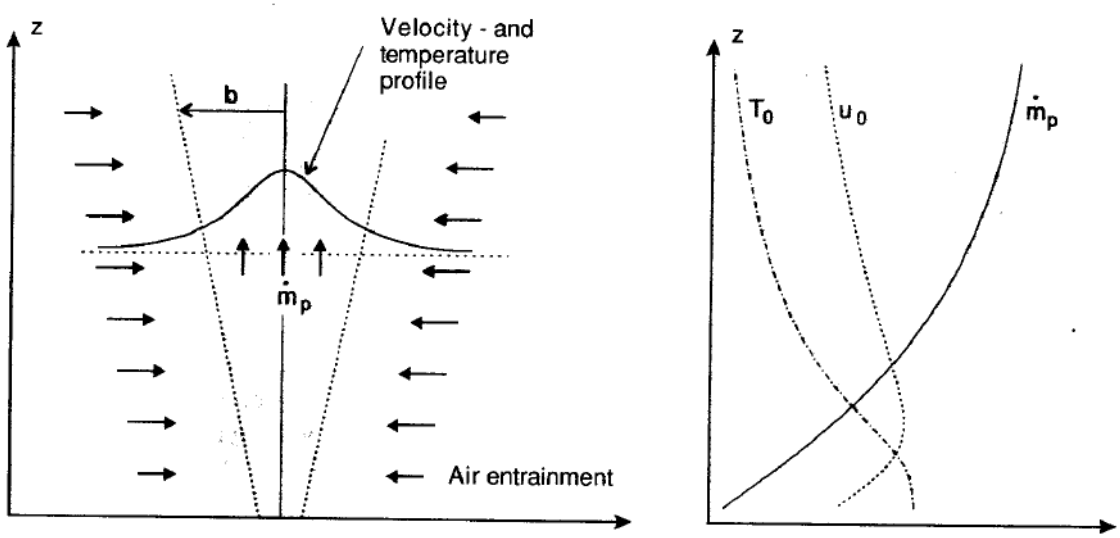

figura 2 Um esquema representativo de uma nuvem de fumo. À medida que a nuvem de fumo sobe, esta alarga-se. A temperatura e a velocidade são mais elevadas no centro diminuindo em direção ao exterior da nuvem. A temperatura (T) e a velocidade (u) diminuem à medida que o fumo sobe. A massa (m) aumenta. (Figura: [7])

Todo bombeiro sabe que um incêndio numa sala, primeiro produz uma nuvem de fumo e depois uma camada de fumo. A nuvem de fumo ao atingir o teto, espalha-se horizontalmente. Esta ação continuará a ocorrer até atingir uma parede. As paredes e o teto da sala limitam a camada de fumo. A camada de fumo tornar-se-á mais espessa (= expandir e baixar).

Fazendo isto então com que a distância vertical que a nuvem de fumo percorre, desde o foco do incêndio até a camada de fumo, diminua. Originando com que menos ar se possa encontrar na nuvem de fumo ascendente. Isto, por sua vez, significa que a nuvem de fumo passa a arrefecer menos agora comparativamente aos momentos anteriores, desta forma o fumo com uma temperatura mais elevada fluirá para a camada de fumo.

A altura do teto da sala desempenha um importante papel em tudo isto. Num armazém com 8 metros de altura, a nuvem de fumo arrefecerá pelo percurso antes de entrar na camada de fumo. Assim, a espessura da camada de fumo é determinada pela área da superfície do compartimento. Esta área determina parcialmente a quantidade de fumo que pode ser armazenada na camada de fumo. Uma sala maior levará mais tempo para formar uma camada de fumo com um metro de espessura. Um compartimento grande e alto forma uma espécie de amortecedor para o fumo, por assim dizer.

O que também é importante aqui são as aberturas nas paredes. Se houver uma janela aberta, o fumo começará a sair assim que a camada de fumo atingir o topo da janela. A partir desse ponto, o fumo fluirá para a camada de fumo (da nuvem) e fluirá para fora da sala (através da janela). Quando isto acontece, existem – teoricamente – três possibilidades:

1. Mais fumo está a fluir para a camada de fumo do que para o exterior. Por sua vez esta camada continuará a descer.

2. O fumo está a sair exatamente na mesma velocidade que está a entrar. A altura da camada de fumo permanecerá a mesma.

3. Está a entrar menos fumo do que a sair. O tamanho da camada de fumo diminuirá. Podendo isto ocorrer, por exemplo, quando são abertas saídas de fumo no teto, num incêndio controlado pelo combustível.

Portanto, existem alguns parâmetros que determinam como a nuvem de fumo e a camada de fumo se comportarão:

- A TLC do incêndio;
- A circunferência (tamanho do contorno) do incêndio;
- A altura da sala;
- A área da superfície da sala;
- Presença de aberturas.

O incêndio cria um sistema muito complexo no qual tudo está em constante mudança.

A nuvem de fumo forma uma ponte entre o foco do incêndio e a camada de fumo. Através da nuvem de fumo, combustível, energia e partículas tóxicas fluem para a camada de fumo.

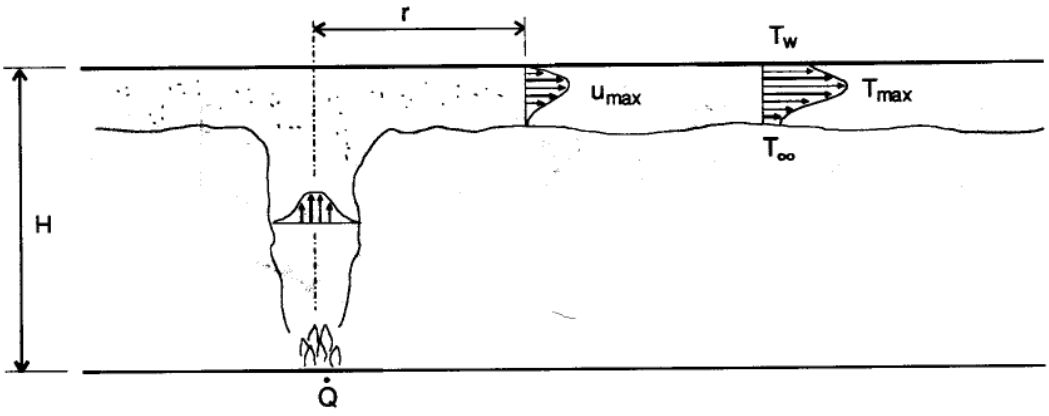

FIGURE 4.17 An idealization of the ceiling jet flow beneath a ceiling.

figura 3 Ilustração de uma nuvem de fumo fluindo para a camada de fumo. Formando-se um jato em direção ao de teto para camada de fumo. O jato é dividido em seções com diferentes velocidades de fluxo (u) e diferentes temperaturas (T). Ambos aumentarão quando a TLC do incêndio aumentar. Ambos diminuirão quando a sala for mais alta. *(Figura: [7])*

A camada de fumo está conectada às paredes e ao teto. No início do incêndio, o interior da parede tem aproximadamente a mesma temperatura que o ambiente interior. Assim que as paredes entrarem em contato com o fumo quente, começarão a aquecer naturalmente. Parte da energia contida na camada de fumo é transferida para as paredes.

Assim que a camada de fumo descer abaixo da extremidade superior de uma abertura de porta que conecta um compartimento adjacente, o fumo começará a fluir para essa segunda sala. Esse fluxo causará uma deslocação de energia, combustível e toxicidade.

2.2 Propagação de energia

O fumo que flui pela porta de ligação voltará a subir ao teto. Todos os comentários feitos sobre a acumulação da camada de fumo (espessura, temperatura) na primeira sala, mais uma vez se aplicam na segunda sala.

Esta camada de fumo, no entanto, forma uma ameaça significativa para tudo e todos naquela segunda sala. A camada de fumo transferirá energia para todos os objetos e ocupantes que tenham uma temperatura inferior à sua.

Assim como na sala inicial, a camada de fumo vai irradiar calor para tudo que se encontre abaixo dela. Esse calor radiante pode ser bastante elevado quando a temperatura da camada de fumo também é elevada. Se houver uma quantidade de radiação suficientemente elevada, os objetos sob a camada de fumo em algum momento começarão a pirolisar. Significando isto que a camada de fumo está a originar uma formação de gases inflamáveis na segunda sala.

Deve ser dada especial atenção aos revestimentos inflamáveis de paredes e tetos. O teto está diretamente em contato com a camada de fumo quente. O fumo vai aquecer o teto por convecção. Este é um método diferente de transferência de calor em oposição à radiação. A convecção requer contato direto entre o fumo e o objeto mais frio. Portanto, se o fumo estiver a tocar o teto inflamável (madeira ou isolamento inflamável), também lá se podem formar gases inflamáveis. A pirólise dos móveis sob uma camada de fumo ainda pode ser visível para os bombeiros dentro da sala, mas, a produção de gases inflamáveis na camada de fumo, não é. Por tal motivo é muito mais traiçoeiro.

O calor da camada de fumo pode, eventualmente, causar ignição na segunda sala. A partir desse momento, seguir-se-á em breve um segundo flashover, contudo, este ocorrerá na segunda sala e não na primeira. Considera-se que o incêndio se alastrou podendo ocorrer uma maior propagação.

2.3 Propagação de combustível

O combustível em forma gasosa está a fluir para a segunda sala através da abertura da porta. Até aquele momento, a sala estava 100% cheia de ar. Agora, partículas de combustível (gases de pirólise e também gases parcialmente queimados, como CO) estão a fluir para a sala. Formando-se uma camada de fumo no teto. Devendo isto ser entendido como um reservatório de combustível gasoso. Se os objetos começarem a pirolisar na segunda sala, os gases formados também acabarão por se misturar com aquela camada de fumo.

Nalgum momento, a camada de fumo, ou certas partes dela, atingirão o limite inferior de inflamabilidade. Dependendo da temperatura da camada de fumo, o fumo inflamar-se-á em algum ponto. Podendo isto pode acontecer de várias formas:

- Chamas a sair do primeiro compartimento pela abertura da porta;
- Flameover na camada de fumo;
- Rollover no segundo compartimento.

Cada um destes fenómenos necessita de combustível para ocorrer. É por isso que a distribuição de combustível do primeiro para o segundo compartimento (e a "produção" de combustível no segundo compartimento) é tão importante.
Cada um destes fenómenos produz localmente energia. Onde quer que haja chamas, o calor é liberado. A camada de fumo será (temporariamente) aquecida em certas partes. Fazendo isto também, com que a transferência de calor (por radiação e convecção) aumente. É formado um ciclo de autorreforço para propagar energia e combustível. Temperaturas mais altas levarão a mais pirólise (= mais combustível). Quando há combustível suficiente, pode ocorrer ignição, o que, por sua vez, leva a mais energia.

O artigo "Como as pessoas morrem nos incêndios?" [9] explica que a radiação é proporcional à temperatura absoluta à quarta potência. Este princípio determina que as chamas (em certas partes da camada de fumo) emitem 16 vezes mais calor radiante do que o fumo com uma temperatura de 200°C. Então, quando partes da camada de fumo se inflamam, a radiação aumenta repentinamente 16 vezes.

2.4 Propagação de toxicidade.

O terceiro problema relacionado à propagação do fumo é a propagação de partículas tóxicas. Para as equipes de bombeiros, isto não representa um problema direto, pois geralmente estão equipados com ARICA. Mesmo que a concentração de gás tóxico atinja níveis significativos, desde que tenham ar no cilindro, podem respirar bem. O mesmo não se aplica às vítimas no interior do compartimento. Os ocupantes do prédio podem estar localizados noutros compartimentos, mas quando a porta está aberta, o fumo transfere uma grande quantidade de substâncias tóxicas para lá. Estudos da UL mostraram que isto eleva muito rapidamente a níveis letais de toxicidade. Numa residência padrão, a expectativa é que os ocupantes presos num compartimento incendiado tenham apenas 5 minutos de sobrevivência.

No entanto, quando essas vítimas ficam presas noutra sala com a porta fechada, o tempo que leva para que as condições se tornem inviáveis é de até trinta minutos. Isto também tem implicações táticas para as equipes de busca e resgate num incêndio doméstico: quando uma equipe está num compartimento cheio de fumo pesado (por exemplo, cozinha ou sala de estar), deve ter cuidado ao abrir as portas. É bem possível que possam abrir a porta de uma sala cheia de fumo, para um quarto que estava até então limpo de fumo. Assim que a porta tenha sido aberta, o fumo fluirá para o quarto, onde pode haver uma potencial vítima bem e ainda viva. Afinal, dentro do quarto ainda resta ar de qualidade suficiente. Esta situação alterar-se-á rapidamente quando a porta se abrir e deixar de existir uma barreira que segure o fumo. Podendo dar origem a as ações da equipa de bombeiros no interior coloquem em risco a segurança da vítima. Representando assim o oposto do que a busca e resgate tem como objetivo.

Quando uma equipa de busca ao abrir a porta para uma sala, se apercebe que estava livre de fumo até então, poderá ser uma boa ideia fechar de imediato essa porta novamente. Quaisquer ocupantes dentro desta sala não estão em perigo imediato. Deixar as vítimas naquela sala, talvez com um bombeiro para as informar e tranquilizar, pode ser uma boa opção. Simultaneamente, o incêndio pode ser dominado e a maior parte do fumo possa ser limpa com recurso a ventiladores VPP. Desta forma, as vítimas poderiam ser evacuadas por salas nas quais a maior parte do fumo tenha sido removida. É imperativo que as

equipas de busca e salvamento comuniquem claramente com as suas chefias ao implementar esta tática.
Tenha em mente que nem sempre será possível manter as vítimas num compartimento por um longo período de tempo. Por vezes demora um pouco até que o incêndio possa ser controlado. Neste caso, mais fumo se poderia espalhar para os compartimentos adjacentes. Mesmo quando exista uma porta resistente ao fogo que separe os quartos, ainda haverá algum fumo que se infiltra. A maioria das portas resistentes ao fogo não são completamente estanques ao fumo. Ao corpo de bombeiros de Bruxelas uma vez aconteceu o seguinte, num incêndio no 12º andar de um prédio alto, um apartamento estava quase totalmente tomado pelo incêndio. As equipas de bombeiros enfrentaram uma variedade de problemas diferentes (abastecimento de água defeituoso, carga de combustível muito elevada no apartamento com objetos a bloquearem parcialmente a porta, …). Devido a todos estes problemas, levou muito tempo até que o corpo de bombeiros conseguisse extinguir o incêndio. Do outro lado do corredor do 12º andar, uma mãe estava presa no seu apartamento juntamente com quatro filhos pequenos. O corredor estava completamente cheio de fumo negro e denso. A ideia inicial era mantê-los no seu apartamento e fazer com que eles "saíssem" do incêndio. No entanto passados 45 minutos, o fumo tinha-se infiltrado em níveis tão elevados que eles tiveram de ser evacuados. Tendo isto sido realizado com recurso a máscaras de resgate (ver figura 4).

Existem diferentes tipos de máscaras disponíveis. Alguns operam utilizando filtros, outros utilizam um cilindro com ar comprimido. Ao usar máscaras com filtro, deve haver oxigénio suficiente no fumo para evacuar as pessoas com segurança. Isto não é necessário ao utilizar um ARICA. Se a temperatura do fumo for suficientemente baixa, as pessoas podem evacuar mesmo com fumo muito denso utilizando tais máscaras de resgate.

figura 4 Uma máscara de resgate que pode ser colocada na cabeça da vítima. Devendo ser conectado um regulador ou válvula de chamada, de preferência com uma mangueira extralonga para que tanto a vítima quanto o bombeiro se possam se movimentar facilmente um ao lado do outro. *(Foto: Pieter Maes)*

É possível que uma equipe de busca abra uma porta numa sala com menos fumo do que onde estavam originalmente, mas ainda o suficiente para causar problemas de segurança para possíveis vítimas no interior. As coisas raramente são questões claras, pretas ou brancas no combate a incêndios. As equipas de busca terão que avaliar com as melhores das suas habilidades qual a tática que vão empregar.

3 Segundo compartimento em chamas: algumas curvas possíveis

Os bombeiros conhecem muito bem a curva de temperatura de um incêndio em compartimento ventilado. Esse é o gráfico mostrado na figura 1. Como é que esse gráfico se altera quando o incêndio se propaga para uma segunda sala?

A Figura 5 ilustra novamente o incêndio da figura 1 com uma linha vermelha. Esta linha vermelha representa, por exemplo, o comportamento do incêndio num quarto. Como a porta do quarto está aberta, o fumo fluirá desse quarto para o quarto adjacente (por exemplo, uma sala de estar). Assim que a camada de fumo descer abaixo do topo da abertura da porta, formar-se-á um fluxo. Conforme acima descrito, o fumo quente irradiará calor para todos os objetos que se encontram por baixo dele. O sofá da sala será aquecido desta forma.

Após ocorrer o flashover no primeiro compartimento, as chamas do quarto sairão pela porta da sala de estar, começando a subir significativamente as temperaturas neste local. Dando também origem a um aumento drástico da radiação (proporcional à quarta potência da temperatura absoluta). Isto fará com que um incêndio se inicie na sala de estar. Este segundo incêndio é ilustrado pela linha azul. Esta linha também tem um estágio de crescimento e também transita a flashover. É muito importante que os bombeiros percebam que estes dois incêndios em compartimentos distintos podem estar em estágios diferentes. O incêndio do quarto pode estar totalmente desenvolvido (pós flashover) enquanto o da sala ainda pode estar em fase de crescimento (pré flashover). Um incêndio totalmente desenvolvido num compartimento não significa que o flashover não possa ocorrer noutro compartimento. Por outras palavras, enquanto progride em direção a um incêndio totalmente desenvolvido, o flashover pode ocorrer na sala pela qual a equipe de ataque está a progredir.

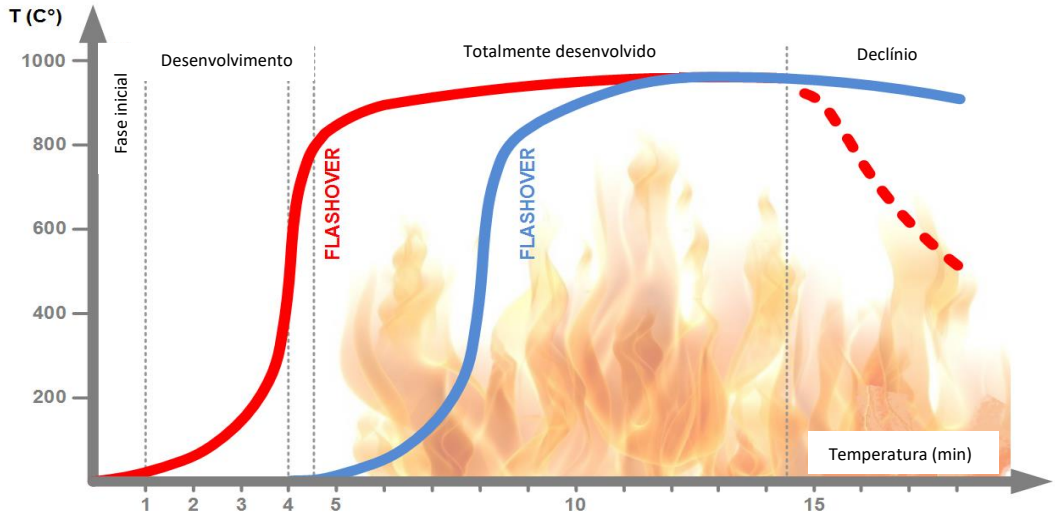

figura 5 Desenvolvimento de incêndio em vários compartimentos. A linha vermelha representa o desenvolvimento do incêndio na sala onde este teve origem. Durante o estágio totalmente desenvolvido, as chamas saem da sala através de uma abertura de porta, entrando numa segunda sala. O calor radiante dessas chamas dará origem a um segundo incêndio (linha azul). Após alguns minutos, este incêndio secundário progredirá a flashover. (Desenho*: Bart Noyens & Karel Lambert)*

Passado um certo período, acabará a carga de combustível na primeira sala, diminuído consequentemente a intensidade do incêndio, entrando no estágio de declínio. No entanto, o incêndio na sala de estar, ainda se está a desenvolver ferozmente. Este incêndio está no estágio totalmente desenvolvido. Uma vez mais, estes dois incêndios estão-se a manifestar de formas diferentes (também parecerão diferentes).

Podemos também observar a curva TLC, que ilustra a potência ou TLC que é acumulada durante o incêndio. Estas curvas são totalmente diferentes daquelas da figura 5. O importante a se notar é que: as duas temperaturas não podem ser somadas, enquanto que as duas TLC podem!

A linha laranja na figura 6 ilustra a TLC do incêndio no quarto (linha vermelha na figura 5), desenvolvendo-se do estágio inicial para o estágio de crescimento e depois para o estágio totalmente desenvolvido. O estágio de declínio não é representado. A progressão da TLC é representada de forma simplificada. Uma vez que o incêndio atinge o estágio totalmente desenvolvido, a TLC permanece a mesma. O incêndio tornou-se controlado pela ventilação e a TLC é determinada pela quantidade de ar que possa fluir para este compartimento.

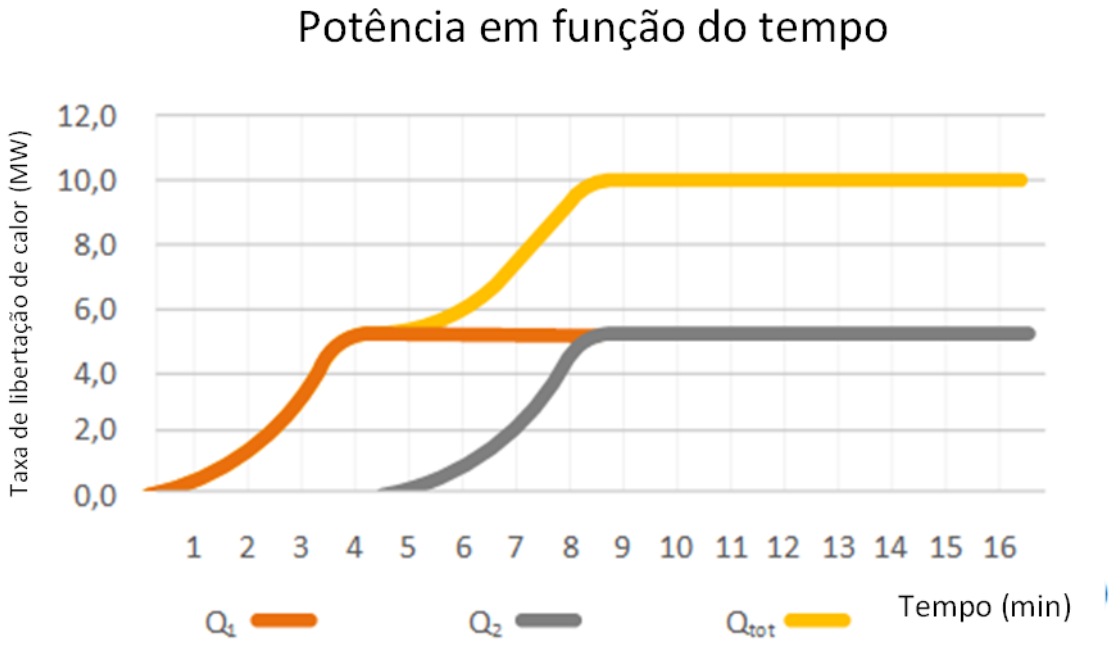

figura 6 Uma representação simplificada da acumulação da TLC num incêndio que se propaga até um segundo compartimento. Duas TLC diferentes que podem ser somadas. (Figura*: Bart Noyens & Karel Lambert)*

A linha cinza ilustra a TLC na segunda sala (a linha azul da figura 5). Aqui também, a TLC permanece igual após o flashover. O gráfico não é totalmente preciso. Na realidade, provavelmente o flashover na sala de estar terá um efeito sobre o incêndio no quarto. Uma (grande) quantidade de oxigénio necessária para o incêndio no quarto será consumida pelo incêndio na sala. Para simplificar, isto é ignorado nesta representação.

A linha amarela representa a TLC total que está a ser construída. A linha amarela é a soma das duas outras linhas. Quando ambos os incêndios produzem uma TLC de 5 MW, então, é alcançado um total de 10 MW de TLC.

Embora a temperatura seja uma grandeza física familiar aos bombeiros, a quantidade de poder extintor que temos nas nossas mangueiras é apresentada como TLC ou potência. É importante para nossa própria segurança que tenhamos sempre mais poder de extinção do que a TLC do incêndio. O objetivo não é ter o mesmo.

4 Observações finais

O comportamento do incêndio num único compartimento é amplamente conhecido pelos bombeiros. As regras que se aplicam a um incêndio em vários compartimentos são muito mais complicadas. Este artigo tenta apresentar as regras mais importantes de forma simplificada. O objetivo não é cobrir totalmente o assunto, portanto o leitor deve ter em mente de que certas simplificações foram feitas, e, que a realidade é ainda mais complexa do que aqui foi apresentado.

5 Bibliografia

[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