

Corpo de Bombeiros Militar do Distrito Federal

Manual básico de combate a incêndio



Módulo 1
- Comportamento do fogo -

2º edição

2009

Manual básico de combate a incêndio do Corpo de Bombeiros Militar do Distrito Federal

Aprovado pela portaria nº 30, de 10 de novembro de 2006 e publicado no Boletim Geral nº 216, de 16 de novembro de 2006.

Comissão de Elaboração

TEN-CEL QOBM/Comb. RICARDO V. TÁVORA G. DE CARVALHO, mat. 00188-0
CAP QOBM/Comb. LUCIANO MAXIMIANO DA ROSA, mat. 00322-0;
CAP QOBM/Comb. MARCELO GOMES DA SILVA, mat. 00341-7;
CAP QOBM/Compl. FÁBIO CAMPOS DE BARROS, mat. 00469-3;
CAP QOBM/Compl. GEORGE CAJATY BARBOSA BRAGA, mat. 00477-4;
CAP QOBM/Comb. ALAN ALEXANDRE ARAÚJO, mat. 00354-9;
CAP QOBM/Comb. HELEN RAMALHO DE O. LANDIM, mat. 00414-6;
CAP QOBM/Comb. DEUSDETE VIEIRA DE SOUZA JÚNIOR, mat. 00404-9;
1o TEN QOBM/Comb. VANESSA SIGNALE L. MALAQUIAS, mat. 09526-6;
1o TEN QOBM/Comb. ANDRÉ TELLES CAMPOS, mat. 00532-0;
1o TEN QOBM/Comb. SINFRÔNIO LOPES PEREIRA, mat. 00570-3;
1o TEN QOBM/Comb. MARCOS QUINCOSES SPOTORNO, mat. 00565-7;
2o TEN QOBM/Comb. KARLA MARINA GOMES PEREIRA, mat. 00583-5;
2o TEN QOBM/Comb. RISSEL F. C. CARDOCH VALDEZ, mat. 00589-4;
2o TEN QOBM/Comb. MARCELO DANTAS RAMALHO, mat. 00619-X;
2o TEN KARLA REGINA BARCELLOS ALVES, mat. 00673-4;
1o SGT BM GILVAN BARBOSA RIBEIRO, mat. 04103-3;
2o SGT BM EURÍPEDES JOSÉ SILVA, mat. 04098-3;
3o SGT BM JOAQUIM PEREIRA LISBOA NETO, mat. 06162-X;
3o SGT BM HELDER DE FARIAS SALAZAR, mat. 07265-6.

Comissão de Revisão

TEN-CEL QOBM/Comb. WATERLOO C. MEIRELES FILHO, mat.00186-4;
MAJ QOBM/Comb. MÁRCIO BORGES PEREIRA, mat. 00249-6;
CAP QOBM/Comb. ALEXANDRE PINHO DE ANDRADE, mat. 00383-2;
1o TEN QOBM/Compl. FÁTIMA VALÉRIA F. FERREIRA, mat. 00597-5;
2o TEN QOBM/Comb. LÚCIO KLEBER B. DE ANDRADE, mat. 00584-3.

Revisão Ortográfica

SBM QBMG-1 SOLANGE DE CARVALHO LUSTOSA, mat. 06509-9.

Brasília-DF, 10 de novembro de 2006.

**SOSSÍGENES DE OLIVEIRA FILHO — Coronel QOBM/Comb.
Comandante-Geral do Corpo de Bombeiros Militar do Distrito Federal**

2009 – Corpo de Bombeiros Militar do Distrito Federal

Qualquer parte desta publicação pode ser reproduzida, desde que citada a fonte.

Disponível também em CD-ROM.

Apresentação da 2ª edição.

Quando o Manual básico de combate a incêndio foi criado, em 2006, tinha por objetivo nortear a conduta do bombeiro do Corpo de Bombeiros Militar do Distrito Federal nas ações de combate a incêndio urbano, atentando para os princípios basilares da segurança e da efetividade do socorro prestado.

Várias obras subsidiaram o processo de construção do conteúdo apresentado, com o intuito de fornecer o maior número possível de informações sobre as ações técnicas e táticas de combate a incêndio e sobre a experiência de outros corpos de bombeiros frente a um inimigo comum.

Nesta segunda edição, a comissão teve a oportunidade de rever os conceitos aplicados, por meio da consulta a novas literaturas, bem como aprimorar o conteúdo já existente, com base na experiência da instrução diária e nas adaptações que toda profissão requer para evoluir.

Neste contexto, não se poderia deixar de agradecer aos profissionais que, direta ou indiretamente, contribuíram para que a presente obra fosse atualizada.

Com a dedicação que lhes é peculiar, alguns militares contribuíram para esta revisão, tendo sido designados ou não para tal. Movidos pelo amor à profissão, estes militares engrandecem o nome da instituição e inspiram seus colegas.

A comissão agradece especialmente ao Coronel QOBM/Comb RRm Ivan Feregueti Góes que, mesmo em seu merecido descanso, não poupou esforços para contribuir, com sua experiência profissional e de ensino, a toda a obra aqui apresentada e de modo especial à parte tática do manual.

O presente manual será revisado sempre que necessário ao bom desempenho do bombeiro em sua missão “vidas alheias e riquezas salvar”.

Sumário

| | |
|---|------------|
| Introdução..... | 1 |
| 1. Conceituação básica | 5 |
| 2. Combustão | 9 |
| 2.1. <i>Elementos do fogo.....</i> | <i>11</i> |
| 2.2. <i>Classificação da combustão.....</i> | <i>29</i> |
| 2.2.1 <i>Quanto à liberação de produtos</i> | <i>30</i> |
| 2.2.2 <i>Quanto à velocidade da combustão</i> | <i>32</i> |
| 2.2.3 <i>Combustão espontânea</i> | <i>37</i> |
| 2.3. <i>O estudo da vela</i> | <i>38</i> |
| 2.4. <i>Explosão</i> | <i>47</i> |
| 3. Transferência de calor | 60 |
| 3.1. <i>Condução.....</i> | <i>66</i> |
| 3.2. <i>Convecção</i> | <i>74</i> |
| 3.3. <i>Radiação térmica.....</i> | <i>83</i> |
| 4. Processos de extinção do fogo | 87 |
| 4.1. <i>Processos de extinção do fogo</i> | <i>87</i> |
| 4.1.1 <i>Retirada de material</i> | <i>87</i> |
| 4.1.2 <i>Resfriamento.....</i> | <i>90</i> |
| 4.1.3 <i>Abafamento.....</i> | <i>91</i> |
| 4.1.4 <i>Quebra da reação em cadeia</i> | <i>92</i> |
| 4.2. <i>Principais agentes extintores</i> | <i>92</i> |
| 4.2.1 <i>Água</i> | <i>93</i> |
| 4.2.2 <i>Pó para extinção de incêndio.....</i> | <i>98</i> |
| 4.2.3 <i>Espuma.....</i> | <i>99</i> |
| 4.2.4 <i>Gás carbônico</i> | <i>101</i> |

| | | |
|-----------|--|------------|
| 4.3. | <i>Classes de incêndio</i> | 103 |
| 4.3.1 | <i>Classe A</i> | 104 |
| 4.3.2 | <i>Classe B</i> | 105 |
| 4.3.3 | <i>Classe C</i> | 106 |
| 4.3.4 | <i>Classe D</i> | 109 |
| 4.3.5 | <i>Observações</i> | 112 |
| 5. | Dinâmica do incêndio | 114 |
| 5.1. | <i>Fases do incêndio</i> | 114 |
| 5.2. | <i>Carga de incêndio</i> | 121 |
| 5.3. | <i>Fumaça</i> | 123 |
| 5.4. | <i>A influência dos elementos construtivos na dinâmica dos incêndios</i> | 126 |
| 5.4.1 | <i>Piso falso</i> | 127 |
| 5.4.2 | <i>Teto falso</i> | 128 |
| 5.4.3 | <i>Fachadas de vidro</i> | 132 |
| 5.4.4 | <i>Gesso acartonado</i> | 136 |
| 5.4.5 | <i>Dutos</i> | 136 |
| 6. | Comportamentos extremos do fogo..... | 140 |
| 6.1. | <i>Generalização do incêndio (Flashover)</i> | 143 |
| 6.2. | <i>Explosão da fumaça - Backdraft ou backdraught</i> | 147 |
| 6.3. | <i>Ignição da fumaça</i> | 155 |
| 6.4. | <i>Síntese dos fenômenos de explosão da fumaça e generalização do incêndio</i> | 157 |
| 6.5. | <i>Diferenças entre os comportamentos extremos do fogo</i> | 159 |
| | Bibliografia | 161 |

Introdução

Esta primeira parte do manual, denominada Módulo 1, se destina a apresentar o comportamento do incêndio, mediante a compreensão do seu principal elemento, o fogo, com seus componentes, e o processo desencadeante da combustão.

Primeiramente, são evidenciados os conceitos de fogo e incêndio, no intuito de que os bombeiros os diferenciem na missão-fim.

No estudo da combustão, são abordados os conceitos de matéria, pirólise e energia de ativação, que têm fundamental importância para que a reação venha a ocorrer, influenciando diretamente os incêndios. Conforme a quantidade de energia liberada, a combustão será classificada como viva (que é o caso das chamas propriamente ditas) ou lenta (que é o caso das incandescências ou brasas). A combustão será classificada como completa ou incompleta quanto à combinação dos seus elementos químicos. Será apresentada, também, a combustão espontânea, de ocorrência rara, porém muito importante.

O estudo da vela, experiência sugerida pelo cientista Faraday no século dezanove, é apresentado como meio facilitador para se compreender o estudo do fogo, no qual as chamas são classificadas como difusas ou pré-misturadas e uma forma de calcular a altura e a intensidade das chamas conforme o material combustível em queima. No mesmo estudo, a fumaça é caracterizada segundo sua cor – branca ou escura – conforme os efeitos que produz em um incêndio.

Mais adiante são explicitados os tipos de explosão ligados à ocorrência de incêndios, incluindo-se a explosão de gases presentes na fumaça (fenômeno conhecido como *backdraft*) e o B.L.E.V.E. (*Boiling Liquid Expanding Vapor Explosion*), que é uma explosão de recipiente decorrente da expansão do vapor causada pela ebulição do líquido

armazenado internamente, como o caso de caminhão tanque. Nesse assunto, é enfatizado que pode haver explosões tanto pela mistura ar/gás quanto pela mistura ar/poeira, exigindo-se dos bombeiros cuidados essenciais na abordagem de silos e similares.

Para compreensão da propagação dos incêndios, são abordados os conceitos de energia, calor e temperatura, bem como das formas de transferência de calor, condução, convecção e radiação térmica.

A dinâmica do incêndio mostra como os incêndios se comportam conforme suas fases – inicial, crescente, totalmente desenvolvida e final – e a influência de elementos como a carga de incêndio, a fumaça e os aspectos construtivos da edificação nesse processo, com o objetivo de que os bombeiros saibam reconhecer e utilizar essas informações a favor das ações de prevenção e combate aos incêndios.

Por fim, são apresentados os comportamentos extremos do fogo, também conhecidos como incêndios de propagação rápida, distribuídos em três grandes fenômenos: **flashover**, que é a generalização do incêndio; o **backdraft**, que é a explosão da fumaça; e a **ignição da fumaça**, que ocorre quando a fumaça encontra uma fonte de calor suficiente para deflagrá-la.

A abordagem desses assuntos visa ao aprendizado por parte dos bombeiros dos conceitos, características e riscos que decorrem desses fenômenos, a fim de que não venham a ser surpreendidos com a ocorrência de um comportamento extremo capaz de ferir e até matar quem estiver envolvido nas ações de salvamento e de combate aos incêndios estruturais.

A informação é uma das maiores aliadas do bombeiro no momento de atuar num sinistro, por isso, desde a década de 80, alguns

corpos de bombeiros europeus vêm desenvolvendo estudos para minimizar os riscos e os danos causados por esses fenômenos conhecidos como incêndios de propagação rápida. Tal preocupação decorre de diversas lesões e perdas humanas, de bombeiros em combate ou de civis, causadas por este tipo de incêndio. Segundo relatos, muitos danos aconteceram como consequência da abordagem incorreta por parte dos combatentes que, por desconhecimento, negligenciaram a própria segurança, não utilizando as técnicas adequadas a cada tipo de fenômeno. Em consequência, foram surpreendidos por situações que fugiram ao controle, sofrendo, por vezes, danos irreversíveis.

Com este manual básico, o Corpo de Bombeiros Militar do Distrito Federal tem por objetivo ensinar aos bombeiros como lidar com os comportamentos extremos do fogo de forma eficiente na preservação do patrimônio e, principalmente, da vida e da integridade das guarnições e das vítimas na ocorrência de um incêndio.

1. Conceituação básica

Para se compreender como um incêndio se processa, é necessário entender, em primeiro lugar, como o fogo ocorre, uma vez que todo incêndio está relacionado à presença de fogo.

Muitas vezes, na linguagem típica de bombeiros, há referências a incêndio, sinistro, fogo, combustão, queima e chamas de uma forma generalizada, como se todos esses elementos tivessem uma conceituação parecida ou igual. É verdade que todos eles fazem parte da rotina da missão dos corpos de bombeiros e alguns deles são até sinônimos, mas não são a mesma coisa e isso precisa estar claro.

Primeiramente, há que se lembrar que incêndio e fogo são conceitos bem distintos.

O fogo é utilizado pelo ser humano há milhares de anos que, ao longo do tempo, o incorporou à sua vida como algo necessário para o dia-a-dia, em ações como aquecimento de alimentos e do ambiente, industrialização de equipamentos, objetos e metais e outras utilizações não menos importantes, não sendo possível à humanidade disponibilizar todas as facilidades atualmente existentes se o fogo deixasse de existir.



Figura 1 – Fogo

Já **incêndio** é o fogo que foge ao controle do homem, queimando tudo aquilo que a ele não é destinado queimar; capaz de produzir danos ao patrimônio e à vida por ação das chamas, do calor e da fumaça.



O incêndio retratado ao lado causou a perda total do estabelecimento e de dois veículos estacionados em seu interior e quase a perda de uma vida humana.

Figura 2 - Incêndio em uma capotaria em Taguatinga-DF, em 2005.

Com a necessidade de estabelecer e aprimorar, ao longo dos anos, mecanismos de pronta resposta para evitar, minimizar e extinguir os incêndios, surgiram os corpos de bombeiros, organizações cuja missão primeira é combater os incêndios, também conhecidos como **sinistros**, de forma eficiente, diminuindo ou impedindo os danos por eles causados. Por isso mesmo os bombeiros precisam conhecer bem como se processa o fogo, para aprimorarem cada vez mais os recursos de combate aos incêndios (equipamentos, técnicas e táticas) de forma que sejam utilizados de maneira otimizada, visando sempre à preservação da vida e do patrimônio.

Os incêndios sempre causam prejuízos, sendo função dos bombeiros prevenir, erradicar ou diminuir seus danos, realizando suas ações de forma eficiente.

Todo incêndio considerado estrutural neste manual refere-se ao sinistro ocorrido em edificação, tais como prédios, casas, comércios, hospitais, galpões, independente do material construtivo que a compõe. Apesar de focar esse tipo de incêndio, os estudos abordados neste módulo possuem conceitos comuns aos incêndios em vegetação e em veículos, os quais facilitarão o aprendizado quando forem abordados esses tipos de ocorrência.

A **combustão (fogo)** é uma reação química que se processa entre uma substância combustível (como um pedaço de madeira, papel, tecido, borracha, etc.), ao sofrer um aquecimento, e o ar, produzindo luz e calor em uma forma de reação sustentável.

É importante frisar que fogo e combustão são sinônimos. Enquanto aquele é mais conhecido usualmente, este é bastante utilizado nos estudos científicos e ambos significam **queima**. Portanto, toda e qualquer abordagem, neste manual, sobre fogo, combustão ou queima refere-se ao mesmo processo.

Para compreender bem todo o processo da combustão, são imprescindíveis estudos específicos, ensaios laboratoriais, treinamentos e simulações (ver Figura 3), a fim de reproduzir as condições dos incêndios e a aplicação prática dos estudos. Essas atividades visam capacitar os bombeiros nas mais eficientes formas de combate a incêndios, em busca de um aprimoramento técnico-científico constante.



Figura 3 - Simulação de combate a incêndio realizado no CTO/CBMDF, em 2005.

A luz que é produzida pela combustão é conhecida como **chama**, que consiste na parte visível do fogo.

Os conceitos de combustão e chama merecem especial atenção e serão abordados de maneira aprofundada a seguir.

2. Combustão

Antes de se tratar da combustão propriamente dita, é preciso lembrar o que ocorre antes que uma substância queime, ou seja, entre em combustão.

Tudo o que existe no universo é formado de matéria, a qual pode ser definida, de uma forma simplificada, como algo que ocupa espaço e é composta por moléculas que, por sua vez, são constituídas por átomos de um ou mais elementos em uma combinação química.

Como a matéria interage entre si, substâncias são criadas, transformadas e destruídas. A matéria, porém, não pode ser destruída, apenas transformada.

A maior parte do que existe no universo é composta por moléculas que são normalmente estáveis, mantendo sua forma, a menos que algo as faça mudar de condição.

Se uma fonte de calor – que pode ser um fósforo aceso, uma fagulha ou um corpo aquecido – aproxima-se de uma substância qualquer (matéria), inicia-se aí uma reação química entre esta e o oxigênio presente no ar, com um aumento gradual de temperatura e de liberação de calor, fazendo com que as moléculas, antes estáveis, sejam quebradas.

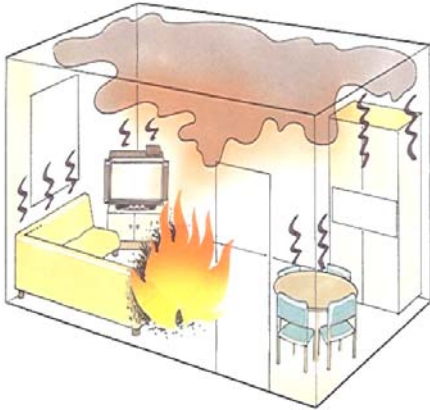
A **pirólise**, também conhecida como decomposição térmica, é o processo de quebra das moléculas que compõem uma substância em outras moléculas ou átomos, em consequência da ação do calor.

A maioria dos combustíveis sólidos e líquidos passa primeiramente para o estado gasoso antes de sua ignição, o que vale dizer que todos estarão na fase gasosa para sofrer combustão.

Os gases combustíveis despreendidos durante a pirólise influenciam sobremaneira o comportamento da queima, por causa das

moléculas e átomos que os compõem e que reagem com o oxigênio durante toda a queima, permanecendo próximo à substância decomposta.

Pirólise é a decomposição química de uma substância mediante a ação do calor.



Fonte: Explosion de Fumées – Embrasement

Figura 4 - Desenho esquemático de uma situação antes da generalização do incêndio

A Figura 4 mostra uma cena típica de incêndio, no qual os móveis ainda não atingidos pelas chamas começam a desprender gases combustíveis pelo aquecimento do ambiente. Isso significa que estão sofrendo pirólise. Se não houver interferência, em pouco tempo, os móveis se inflamam, fazendo com que todo o ambiente fique tomado pelas chamas.

A **energia de ativação** é a energia necessária para iniciar uma reação química. No caso deste estudo, é a energia mínima para fazer com que o material combustível entre em pirólise.

Essa quantidade de energia varia conforme o material combustível. Em via de regra, quanto melhor a mistura (combinação) entre o combustível e o ar, menor será a energia necessária para iniciar a combustão, ou seja, mais facilmente ocorrerá a queima.

Antes de ocorrer a combustão, as substâncias (sólidas e líquidas) sofrem pirólise, por causa da energia de ativação no material combustível.

À medida que os gases desprendidos pela pirólise se inflamam, gerando luz (chama) e calor, obtém-se o **fogo (combustão)**.

Combustão pode ser definida, então, como a reação química envolvendo uma substância combustível e um agente oxidante, normalmente o oxigênio do ar, produzindo luz e energia.

2.1. Elementos do fogo

Durante muito tempo acreditou-se que, para haver fogo, eram necessários três elementos: o oxigênio, também chamado de comburente; o calor, responsável por fornecer energia à mistura; e o combustível, constituindo-se assim o triângulo do fogo (Figura 5).

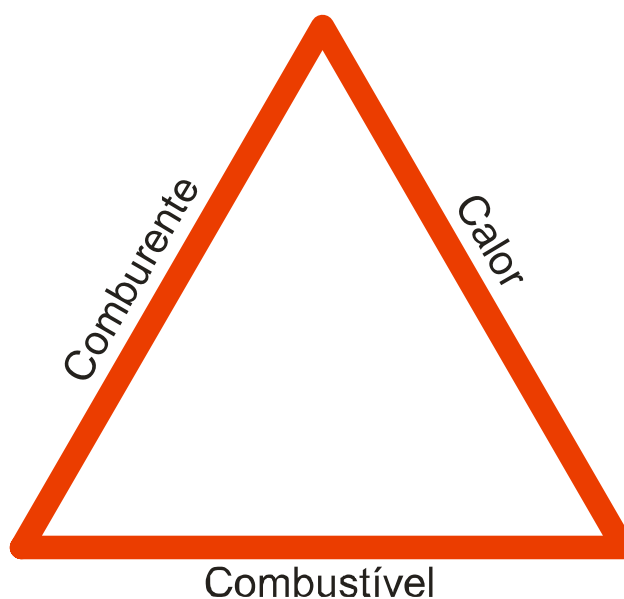


Figura 5 - Triângulo do fogo

Nos últimos anos, estudos científicos mostraram que existe uma reação química contínua entre o combustível e o comburente, a qual libera mais calor para a reação e mantém a combustão em um processo sustentável, que é a reação em cadeia.

Como será abordado mais adiante, essa reação é responsável por fornecer continuamente o calor necessário e os gases combustíveis que permitem o desenvolvimento da combustão. Alguns autores passaram, então, a admitir a inclusão desse quarto elemento e, conseqüentemente, a figura de um tetraedro (Figura 6) como a forma mais precisa para o estudo do processo de combustão.

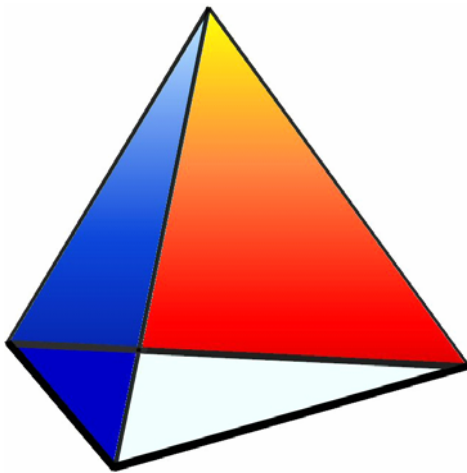


Figura 6 - Tetraedro do fogo

É possível observar a existência de quatro triângulos. As faces da pirâmide representam o **oxigênio**, o **combustível** e o **calor**. O triângulo da base representa a **reação em cadeia**, sendo a interface entre os outros três elementos.

Tetraedro do fogo é a combinação do combustível com o oxigênio, na presença de uma fonte de calor, em uma reação química em cadeia, liberando energia em forma de luz e mais calor, além de outros produtos químicos.

Na análise de ambas as figuras, é possível observar que, quando se trata de elemento propriamente dito, existem no triângulo ou

no tetraedro do fogo: o comburente, o combustível e o calor. A reação em cadeia é um processo que une estes elementos, dando sustentabilidade à reação e não um elemento em si.

A Figura 7 é capaz de representar este processo.

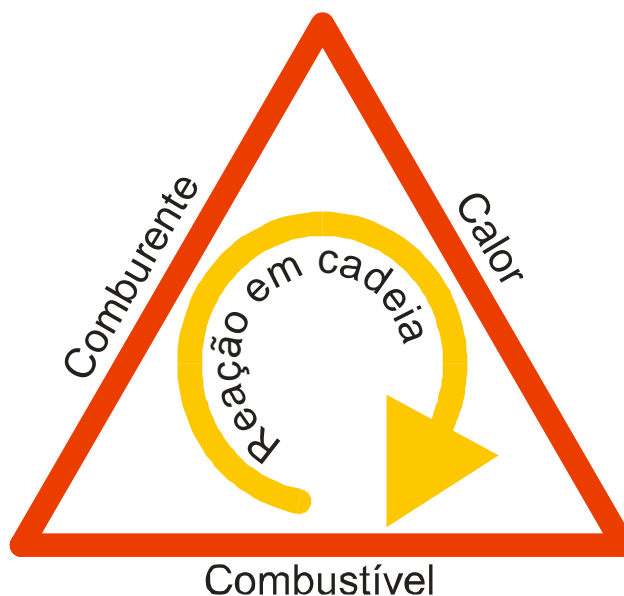


Figura 7 – Representação do fogo

É importante lembrar que, independente da figura que o representa, o fogo é extinto quando um dos seus elementos é retirado ou quando a reação que os envolve é interrompida.

Saber controlá-los é fundamental para o êxito dos bombeiros no combate ao incêndio.

O **calor**, antigamente conhecido como agente ígneo, é o componente energético do fogo e será o elemento responsável pelo início da combustão.

É o elemento que causa a vaporização do combustível (sólido ou líquido), sendo responsável por manter a temperatura da reação, que, durante a combustão, continuará havendo a liberação de mais calor. Como dito anteriormente, na maior parte dos combustíveis há uma mudança de estado para o gasoso antes de inflamar-se. Nos

combustíveis gasosos, isso não ocorre, pois já estão em condições de alcançarem a ignição.

Uma fonte de calor pode ser qualquer elemento que faça com que o combustível sólido ou líquido desprenda gases combustíveis e venha a se inflamar. Na prática, pode ser uma chama, uma fagulha (faísca ou centelha) ou ainda uma superfície aquecida.

A superfície aquecida, a qual pode ser obtida por meio de um forno de fogão que acabou de ser utilizado, de equipamento eletro-eletrônico com defeito ou, ainda, de maquinário industrial que dissipe grande quantidade de calor, costuma ser menosprezada pelos bombeiros em ocorrências envolvendo vazamento de gás ou ainda durante o combate a incêndio, contudo, tal esquecimento pode causar acidentes.

A existência de superfícies aquecidas em um ambiente com vazamento de gás pode deflagrar uma explosão no ambiente, mesmo sem a presença de chamas.

Portanto, é importante lembrar que o risco de uma fonte de calor não se resume à chama. A temperatura atingida por uma superfície aquecida é suficientemente capaz de iniciar um incêndio ou deflagrar uma explosão em muitos materiais combustíveis.

Da mesma forma, se um combustível líquido armazenado em tanque for aquecido, o calor distribuir-se-á por todo o volume de combustível. Quando estiver totalmente aquecido e houver a impossibilidade de dissipação do calor para o ambiente, ocorrerá um aumento de temperatura tal capaz de fazer com que o líquido entre em ebulição e atinja o ponto de auto-ignição.

A Tabela 1 apresenta as temperaturas estimadas das principais fontes de calor iniciadoras de incêndio.

Tabela 1 - Estimativa da temperatura de algumas fontes de calor

| Fonte de calor | Temperatura °C |
|--------------------------|----------------|
| Vela | 700 - 1400 |
| A 15 cm da chama da vela | 200 |
| Arco elétrico | 4000 |
| Chama de álcool | 1200 - 1700 |
| Chama de fósforo | 1500 |
| Chama de gás | 1000 - 1500 |
| Cigarro | 300 - 400 |
| Fósforo | 800 |
| Lâmpada | 170 - 200 |
| Madeira queimando | 1000 - 1400 |
| Oxi-acetileno | 2000 - 3000 |

Fonte: Tactical Firefighting, Paul Grimwood

Em outras palavras, pode-se dizer que, no tetraedro do fogo, o calor é responsável por:

- produzir os vapores combustíveis em materiais sólidos e líquidos (pirólise);
- causar a ignição do material combustível (sólido, líquido ou gasoso); e
- promover o crescimento e propagação das chamas, pela manutenção de um ciclo contínuo de produção de vapor de combustível e de energia para ignição desse material.

Uma fonte de calor pode ser obtida por uma fagulha, pelo contato direto da chama ou pelo aumento da temperatura ambiente.

No processo de combustão, os materiais combustíveis atingem pontos diferentes de temperatura à medida que se vão aquecendo, ou

seja, à medida que sofrem pirólise. Esses são conhecidos como **pontos de temperatura**.

O **ponto de fulgor**, também chamado de *flashpoint*, é atingido quando os vapores liberados pelo material combustível sólido ou líquido entram em ignição em contato com uma fonte externa de calor, porém ao retirá-la, as chamas não se mantêm. Isso ocorre, porque a quantidade de vapores combustíveis liberada é muito pequena.

No ponto de fulgor, a chama acende e se apaga quando a fonte de calor se aproxima e se afasta, respectivamente.

O **ponto de ignição**, também chamado de *firepoint*, é atingido quando os vapores liberados pelo material combustível entram em ignição em contato com uma fonte externa de calor, mantendo a chama mesmo com a retirada da fonte. Reações sustentáveis de combustão ocorrem quando calor suficiente, proveniente de uma reação exotérmica (reação que libera calor), é gerado nas imediações do combustível, produzindo vapores em concentração suficiente que permita o desenvolvimento auto-sustentável da combustão.

No ponto de ignição, a chama se mantém quando a fonte de calor inicial se afasta.

A **auto-ignição** de um determinado material combustível ocorre quando, em condições atmosféricas normais, este material inflama-se espontaneamente, sem a presença de uma fonte externa de calor, tais como, chama ou fagulha. Sua temperatura pode coincidir ou não com a temperatura do ponto de ignição do mesmo material.

No ponto de auto-ignição, o combustível sofre um aquecimento gradual até se inflamar sem a presença de uma fonte direta de calor.

Um material combustível é considerado inflamável quando seu ponto de fulgor é menor que 80 °C, sendo sólido, líquido ou gasoso.

A Tabela 2 apresenta a temperatura de ignição de materiais comumente presentes em incêndio como madeira, carpete, gesso e borracha.

Tabela 2 - Temperatura de ignição de alguns materiais

| Material | Temp. de ignição (°C) | Fluxo de liberação de energia (kW/m²) |
|--|------------------------------|---|
| Madeirite (0,635cm) | 390 | 16 |
| Madeirite (1,27cm) | 390 | 16 |
| Madeirite resistente ao fogo (1,27cm) | 620 | 44 |
| Compensado (6,35mm) | 298 | 10 |
| Compensado (3,175mm) | 365 | 14 |
| Compensado envernizado (3,4mm) | 400 | 17 |
| Compensado laqueado | 400 | 17 |
| Placa de fibra isolante térmico | 355 | 14 |
| Espuma rígida (2,54cm) | 435 | 20 |
| Espuma flexível (2,54cm) | 390 | 16 |
| Poliestireno (5,08cm) | 630 | 46 |
| Policarbonato (1,52mm) | 528 | 30 |
| Polímero PMMA tipo C (1,27cm) | 378 | 15 |
| Polímero PMMA <i>polycast</i> (1,59mm) | 278 | 9 |
| Carpete n.º 1 de algodão padrão | 465 | 23 |
| Carpete n.º 2 de algodão não tratado | 435 | 20 |
| Carpete n.º 2 de algodão tratado | 455 | 22 |
| Carpete mistura de nylon/algodão | 412 | 18 |
| Carpete acrílico | 300 | 10 |
| Placa de gesso comum (1,27mm) | 565 | 35 |
| Placa de gesso resistente ao fogo (1,27cm) | 510 | 28 |
| Placa de gesso com papel prensado | 412 | 18 |
| Cobertura asfáltica | 378 | 15 |
| Cobertura de fibra de vidro | 445 | 21 |
| Vidro reforçado com poliéster (2,24mm) | 390 | 16 |
| Vidro reforçado com poliéster (1,14mm) | 400 | 17 |

Fonte: J.G. Quintiere, *Principles of Fire Behavior*

O **comburente** é a substância que reage com os gases combustíveis liberados na pirólise, também conhecida como agente oxidante. Na maioria das vezes, o comburente será o oxigênio, elemento presente na atmosfera terrestre.

O oxigênio intensifica a combustão.

Na concentração normalmente presente no ar, em torno de 21%, o oxigênio permite que ocorra a livre queima das substâncias, com a presença de chamas. Se a concentração de oxigênio na reação diminuir, as chamas sofrerão diminuição ou total extinção.

Na medida em que a combustão se processa, a quantidade do comburente em um ambiente é determinante para a propagação ou para a extinção do fogo.

Se houver uma diminuição do oxigênio, ainda que por ação do incêndio, a combustão será mais lenta. Se, ao contrário, houver abundância de oxigênio, a reação química será acelerada, intensificando as chamas.

Na concentração de 15% de oxigênio no ambiente, ocorre a extinção das chamas. Entretanto, o ambiente continua bastante aquecido, bastando apenas a inserção de ar para que se inflamem novamente. Isso pode ocorrer com a entrada dos bombeiros no local para o combate.

Em um incêndio estrutural, a condição do ambiente pouco ventilado devido à delimitação das paredes e do teto exigirá maior cuidado e atenção por parte dos bombeiros, pois a quantidade de ar disponível para a queima é limitada.

Existem substâncias que também atuam como comburentes, tais como: o cloro (Cl_2), o cloreto de sódio (NaCl), o clorito de sódio (NaClO_2) e o clorato de sódio (NaClO_3), o que exige muito cuidado em ambientes onde eles se encontram.

Também pode haver ocorrência de fogo em atmosferas com ausência de oxigênio, quando os combustíveis comuns são misturados com oxidantes químicos, os quais conseguem liberar oxigênio com facilidade, como o fertilizante nitrato de amônio (NH_4NO_3), nitrato de potássio (KNO_3) e peróxido de hidrogênio (H_2O_2).

Atmosferas enriquecidas com oxigênio, como o caso de indústrias, hospitais e locais com utilização de oxi-acetileno (maçaricos) ou de aparelhos de oxigenoterapia podem apresentar, no caso de incêndio, velocidade e intensidade de queima superior ao que comumente ocorre, o que exigirá dos bombeiros também maior cuidado e atenção.

Os óleos, na presença de altos níveis de oxigênio, sofrem ignição espontânea, ou seja, entram em ignição sem a presença de uma fonte de calor. Por esse motivo, canos, dutos, instrumentos de medição e engates que transportam oxigênio devem possuir aviso de advertência de “não usar óleo”.

O Nomex^(R), material utilizado nos equipamentos de proteção individual de roupas de aproximação, também se inflama em contato com altos níveis de concentração de oxigênio independente de uma fonte de calor. Por isso, os bombeiros devem ter mais cautela na abordagem de ocorrências com atmosferas enriquecidas de oxigênio, como o caso de indústrias ou de hospitais, independente da presença de fonte de calor.

O **combustível** é o elemento definido como o campo de propagação do fogo. É todo material capaz de queimar quando aquecido e mantém a combustão.

Os combustíveis podem ser classificados conforme o seu estado físico em sólido, líquido ou gasoso. São exemplos:

- sólido: madeira, papel, tecido, borracha, etc;

- líquido: diesel, gasolina, álcool, querosene, etc; e
- gasoso: G.L.P. (gás liquefeito de petróleo), acetileno, gás natural, etc.

A maior parte dos combustíveis sólidos passa para o estado gasoso antes de alcançar a ignição, mediante a liberação dos gases pela pirólise. Exemplos de exceção dessa regra são: o enxofre, os metais alcalinos – potássio, cálcio – a cânfora e a naftalina, que queimam diretamente em sua forma sólida.

Os combustíveis líquidos necessitam sofrer vaporização ou dissolução em pequenas gotas (atomização) para que se inflamem. É possível observar que, na queima de líquido, a chama ocorre a certa distância da superfície. Essa regra é válida para os líquidos combustíveis ou inflamáveis, quando aproximados de uma fonte de calor externa.

O estado gasoso é o estado ideal para as queimas, essencialmente necessário para a combustão. Portanto, a maioria dos combustíveis sólidos e líquidos passa para o estado gasoso antes de se inflamar.

Tal fenômeno pode ser observado ao atear fogo em um pedaço de madeira, que é um combustível sólido. É possível notar que as chamas se desenvolvem a partir de uma determinada altura, não tocando sua superfície, o que significa que estão sendo queimados os gases liberados por ele (ver Figura 8).



Figura 8 – Chama envolvendo um pedaço de madeira

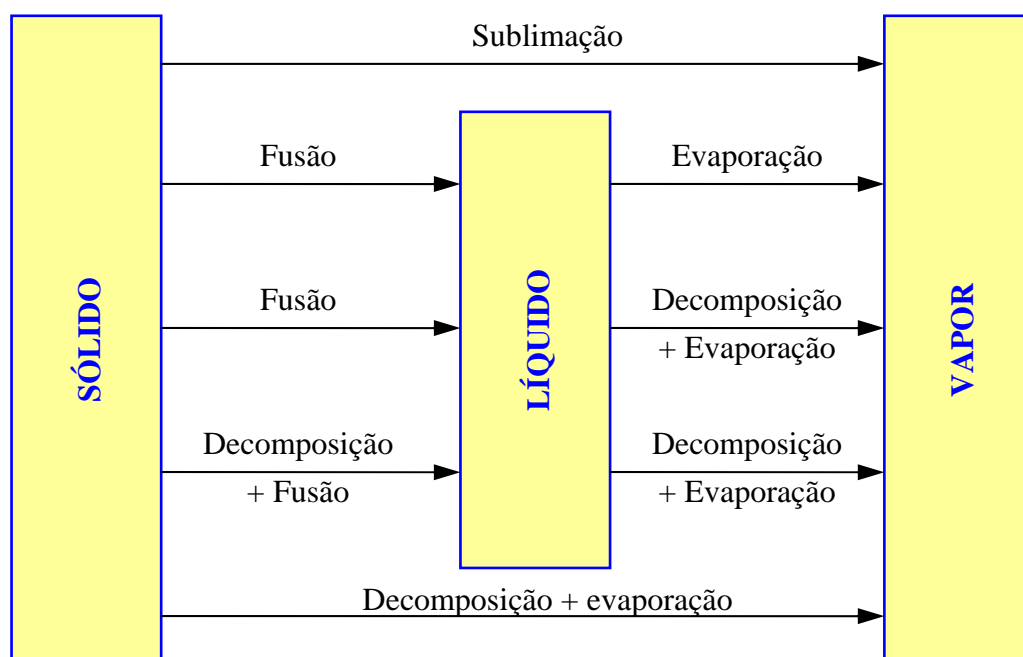
Na foto ao lado, é possível observar que a chama “envolve” a madeira, a certa distância, queimando os gases combustíveis liberados por esta e não diretamente sua superfície.

Chama-se de estado normal dos combustíveis aquele no qual o material existe sob condições normais de temperatura e pressão, ou seja, 21 °C e 1 atmosfera.

Condições acima desses valores são comuns em incêndios e fazem com que os combustíveis entrem em pirólise e, continuando a reação, atinjam o seu ponto de ignição, propagando o incêndio.

A pressão e a temperatura também influem diretamente no estado físico do combustível, bem como no desenvolvimento da combustão. Exemplo prático para se evitar tal ocorrência consiste nos bombeiros manterem um líquido armazenado ou derramado resfriado o suficiente para evitar sua evaporação, prevenindo a pirólise e a combustão desse material.

A mudança do estado físico de um material combustível pode assumir uma das formas mostradas na Figura 9:



Fonte: *An Introduction to Fire Dynamics*, D. Drysdale

Figura 9 - Principais processos de mudança de estado físico

Quanto à sua composição, os combustíveis podem ser classificados como orgânicos ou inorgânicos.

São chamadas de **combustíveis orgânicos** todas as substâncias que são ou já foram organismos vivos, como a madeira e o papel. Vale ressaltar que esse conceito se aplica também aos organismos que não necessariamente tenham sido vivos, mas que sejam compostos de elementos que já foram vivos, como os derivados de petróleo.

Os combustíveis orgânicos compostos de carbono e hidrogênio são denominados hidrocarbonetos. Outros, como o plástico e a borracha, podem conter, além de carbono e hidrogênio, outros elementos como nitrogênio, cloro, flúor e enxofre.

Os **combustíveis inorgânicos**, comumente denominados de minerais, não possuem carbono em sua estrutura molecular, sendo que geralmente não contribuem significativamente no processo de

combustão, por serem pouco combustíveis. São exemplos: o ferro, magnésio e sódio, bem como granito, quartzo e silício.

A velocidade da queima dependerá de dois fatores:

- da capacidade do combustível de combinar-se com o oxigênio sob a ação do calor, o que caracteriza sua combustibilidade; exemplo: a madeira é mais combustível que o aço; e
- da área disponível para a queima - quanto maior for a área superficial do combustível exposta ao calor, o que representa sua relação superfície versus massa, mais fácil será de se alcançar a ignição da substância e, conseqüentemente, menor será a energia de ativação necessária para fazê-la entrar em pirólise. Exemplo: se uma chama de fósforo for aproximada de um tronco de árvore, o fogo, muito provavelmente, não se sustentará; se, entretanto, for aproximado o mesmo fósforo da madeira, em igual quantidade, só que em forma de serragem, o resultado será bem diferente. Outro exemplo é o de alguns líquidos inflamáveis, como diesel, caracterizado pela dificuldade de alcançar a ignição quando se encontra em forma de poça, mas queima rapidamente se estiver na forma de spray (partículas suspensas), necessitando de uma energia bem menor para inflamar-se.

A combustibilidade de um material é a sua capacidade de reagir com o oxigênio ao ser aquecido, dependendo de sua forma e composição. Por isso alguns materiais são mais combustíveis que outros. Um mesmo material terá níveis diferentes de combustibilidade dependendo da forma em que se encontra.

A área de queima do material combustível é representada pelo coeficiente superfície-massa do objeto. A combustão da madeira pode ser tomada novamente como exemplo. Um tronco de madeira irá queimar mais lentamente que uma fogueira feita com a lenha do mesmo tronco em pedaços. A massa de madeira nas duas situações é rigorosamente a mesma, porém a superfície de madeira exposta às chamas é bem maior no caso da fogueira.

Portanto, a combustão se dá com maior facilidade nesse caso, ou seja, quanto maior for esse coeficiente, mais completa será a queima do material combustível, em razão da forma em que se apresenta no ambiente em que ocorre o incêndio.

A **reação em cadeia**, parte integrante do tetraedro do fogo, é o processo que envolve os três elementos: combustível, comburente e fonte de calor. É a reação química ocorrida na combustão que se processa pela combinação do oxigênio com os átomos e moléculas, resultantes da quebra molecular do material combustível pela ação do calor. Cada material combustível possui uma estrutura molecular própria, o que faz com que sua combinação com o oxigênio seja também variável e resulte em diferentes produtos.

O calor inicial quebra as moléculas do combustível, as quais reagem com o oxigênio, gerando mais luz e calor que, por sua vez, vão decompor outras moléculas, continuando o processo de forma sustentável.

Na maioria das vezes, as reações químicas da combustão resultarão em átomos e moléculas capazes de continuar reagindo com o oxigênio, gerando assim um processo sustentável de queima, por isso o nome reação em cadeia.

Para uma maior compreensão, será demonstrada a reação química ocorrida durante a combustão do hidrogênio.

Em uma situação hipotética, um determinado ambiente está cheio de moléculas estáveis de hidrogênio (H_2), que será o combustível; e oxigênio (O_2), que é um comburente.

Para fins didáticos, serão consideradas somente quatro moléculas de H_2 e uma de O_2 .

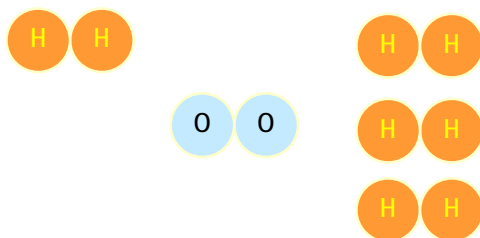


Figura 10 - Situação inicial com 4 moléculas de hidrogênio e uma de oxigênio

A formação acima é estável. Entretanto, ao sofrer aquecimento pela ação de uma fonte de calor, a molécula de hidrogênio à esquerda da figura se quebrará formando dois átomos instáveis de hidrogênio, como na figura abaixo.

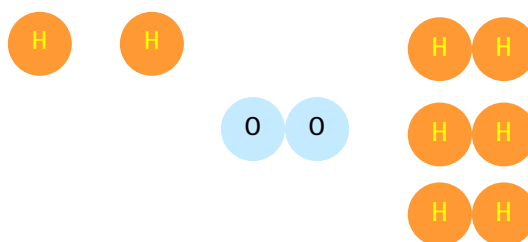


Figura 11 - Quebra do hidrogênio

Para alcançar o equilíbrio, os átomos de hidrogênio irão reagir com os átomos de oxigênio, fazendo a quebra dessa molécula. Novamente, por fins didáticos, só será considerada a reação com um átomo de hidrogênio. O outro átomo, o da esquerda na figura acima, sofrerá o mesmo processo que este, mas será desconsiderado no exemplo.

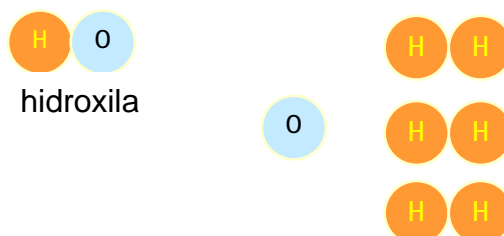


Figura 12 – Formação da hidroxila

Ao reagir com o oxigênio, o átomo de hidrogênio formou uma molécula (hidroxila) e deixou um átomo de oxigênio sozinho. Tanto a hidroxila quanto o átomo de oxigênio são instáveis e irão decompor outras moléculas de hidrogênio até alcançarem o equilíbrio.

A hidroxila irá reagir rapidamente com uma molécula de hidrogênio (H_2), produzindo uma molécula de água (H_2O) e deixando outro átomo de hidrogênio sozinho. O átomo de oxigênio liberado no passo anterior (ver Figura 12) reage com outra molécula de hidrogênio

(H₂), produzindo uma nova hidroxila (OH) e deixando sozinho outro átomo de hidrogênio.

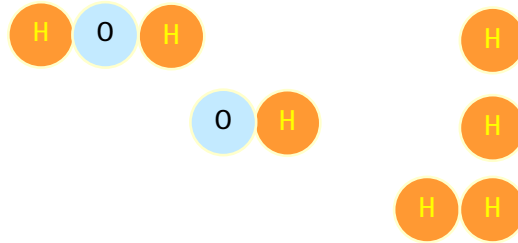


Figura 13 - Quebra de outras duas moléculas de hidrogênio

Na continuação do processo, foram deixados dois átomos de hidrogênio sozinhos, aumentando a instabilidade das moléculas da reação (ver Figura 13).

A nova hidroxila irá então quebrar outra molécula de hidrogênio para formar uma outra molécula de água, deixando sozinho outro átomo de hidrogênio, conforme a disposição abaixo (ver Figura 14).

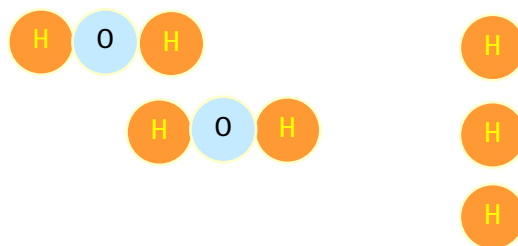


Figura 14 – Resultado da quebra: três outros átomos instáveis de hidrogênio

Como a molécula de água é estável, de sua parte não haverá mais quebras. Se os produtos dessa queima fossem somente a água, a reação seria estável. Entretanto, formaram-se também átomos instáveis de hidrogênio.

Desse modo, é possível observar que a reação inicial de um único átomo de hidrogênio resultou em outros três átomos. Estes, por serem instáveis, são capazes de continuar reagindo e quebrando outras

moléculas. Continuando a reação, esses 3 átomos resultarão em mais 9. Os 9 irão liberar mais 27, os quais formarão mais 81 e assim por diante. Isso é um exemplo de reação em cadeia.

Essas moléculas e átomos instáveis, também denominados íons, estão presentes no ambiente e tendem a se concentrar nas chamas e na fumaça. Durante todo esse processo de quebra, há liberação de energia em forma de calor, que faz com que a reação se sustente. Por isso, a combustão é considerada uma reação sustentável, mantendo as chamas e o calor até que haja alguma interferência no sentido de interromper esse processo.

A continuidade da reação em cadeia será diretamente influenciada pela capacidade de o material combustível absorver e reter o calor aplicado. Se ele dissipar mais calor do que absorve, a quebra molecular será interrompida e o processo de queima se extinguirá.

Diante de tudo o que foi exposto, é correto afirmar que o incêndio produzirá fumaça, contendo em seu interior átomos e moléculas em condições de continuar reagindo com o oxigênio e muito calor. Em um ambiente fechado (como um cômodo), a fumaça necessitará apenas de oxigênio para alcançar a ignição de forma rápida e violenta, o que pode ser obtido pela inserção de ar no ambiente por uma ação incorreta dos bombeiros.

2.2. Classificação da combustão

O fogo, ou combustão, geralmente envolve a liberação de luz e energia em quantidades suficientes para ser perceptível. Mas nem sempre existirá luz em uma chama. Um exemplo dessa exceção é a queima do hidrogênio, que produz apenas vapor d'água por meio da sua reação química com o oxigênio. Embora não exista chama visível, muita energia é produzida, o que faz com que seja nomeada como combustão.

A combustão pode ser classificada, quanto à sua velocidade de reação, em viva ou lenta. Quanto à formação de produtos da combustão, pode ser classificada como completa ou incompleta. Existe, ainda, a combustão espontânea, que será abordada em separado, em função de suas particularidades.

2.2.1 Quanto à liberação de produtos

Quanto aos produtos liberados, a combustão pode ser completa ou incompleta.

Combustão incompleta

Todos os produtos instáveis (íons) provenientes da reação em cadeia caracterizam uma combustão incompleta, que é a forma mais comum de combustão.

A combustão incompleta é a combustão que libera resíduos que não foram totalmente consumidos durante o processo de queima, provenientes da reação em cadeia e capazes de continuar reagindo com o ar.

Esses átomos e moléculas instáveis resultantes da quebra molecular dos combustíveis continuarão reagindo com as moléculas de oxigênio, decompondo-as e formando outras substâncias. Durante todo esse processo, haverá produção de mais chamas e calor, o que exigirá uma interferência externa para que a reação pare e as chamas sejam extintas.

Em incêndios estruturais, devido às características construtivas do ambiente (delimitado por teto e paredes), normalmente, a quantidade de oxigênio disponível para o fogo é limitada e tende a decrescer. Essa

condição fará com que as chamas sofram uma diminuição e até se apaguem.

Entretanto, mesmo com a diminuição destas, a camada gasosa presente na fumaça permanece aquecida e carregada de íons capazes de reagir com o oxigênio, o que a torna uma massa combustível, necessitando apenas de ar para reiniciar a combustão.

Se a ação dos bombeiros não for cuidadosa e dentro das técnicas de combate a incêndio apropriadas, pode haver uma explosão da fumaça, conhecida como *backdraft*, que será abordada mais adiante, expondo os bombeiros e as vítimas à morte ou a danos graves.

Se qualquer um dos elementos do fogo for retirado, o fogo será extinto. Saber controlar esse processo é muito importante para o trabalho dos bombeiros na prevenção e no combate aos incêndios.

A combustão incompleta gera resíduos que compõem a fumaça.

Combustão completa

Em algumas reações químicas pode ocorrer uma **combustão completa**, o que significa dizer que todas as moléculas do combustível reagiram completamente com as moléculas de oxigênio, tornando seus produtos estáveis. Também chamada de combustão ideal, seus produtos são apenas dióxido de carbono e água.

Como exemplo, analise-se a combustão do metano: uma molécula de metano (CH_4), ao reagir com duas moléculas de oxigênio (O_2), forma duas moléculas de água (H_2O) e uma de dióxido de carbono (CO_2) em uma combustão completa, conforme a equação:



O problema é que essa equação descreve uma situação ideal. Nos incêndios, geralmente, a mistura é muito rica em metano (ou qualquer outro combustível), havendo a formação de monóxido de carbono (CO) e não somente de dióxido (CO₂).

O monóxido, por sua vez, é instável e vai continuar reagindo com o oxigênio, quebrando outra molécula e formando outras substâncias instáveis. Isso gera uma reação em cadeia semelhante ao que ocorre com o gás hidrogênio e com a maioria dos combustíveis presentes na natureza.

Exemplos práticos de combustão completa, também conhecida como queima limpa, são as chamas obtidas pelo fogão e pelo maçarico.

Combustão completa é aquela em que o combustível reage perfeitamente com o comburente, produzindo somente água e dióxido de carbono.

É importante lembrar que combustão completa não é o mesmo que queima total. A queima total de uma substância é a situação na qual todo o material combustível presente no ambiente já foi atingido pela combustão, enquanto que a combustão completa é a combinação estequiométrica entre o combustível e o oxigênio.

2.2.2 Quanto à velocidade da combustão

Quanto à sua velocidade de reação, a combustão pode ser viva ou lenta.

Combustão viva

A combustão viva é o fogo caracterizado pela presença de chama. Pela sua influência na intensidade do incêndio, é considerada como sendo o tipo mais importante de combustão e, por causa disso, costuma receber quase todas as atenções durante o combate.



Figura 15 - Exemplo de combustão viva

É importante lembrar que só pode existir uma combustão viva quando houver um gás ou vapor queimando, ainda que proveniente de combustíveis sólidos ou líquidos, uma vez que a combustão se processa em ambiente gasoso.

O tamanho da chama não é um fator relevante para classificar a reação como combustão viva. Para que isso ocorra é necessário que uma quantidade suficientemente perceptível de energia seja liberada, ou seja, é a relação entre a energia de ativação e a unidade de volume de uma reação química que determina se a reação é fogo ou não.

No começo da combustão, esse nível de energia inicial pode ser em torno de $1.000 (10^3) \text{ kW/m}^3$, que é suficiente para aquecer 1 grama de água em $1 \text{ }^\circ\text{C}$ por segundo. Reações sustentáveis de incêndio podem atingir densidades muito maiores – algo em torno de 10^{10} kW/m^3 . A temperatura nessa zona de reação pode atingir $2000 \text{ }^\circ\text{C}$ em

combustíveis líquidos e 1000 °C em combustíveis sólidos (incandescência).

A taxa de liberação de calor em uma combustão caracteriza a potência, ou seja, a quantidade de energia liberada em um determinado intervalo de tempo (normalmente dado em kJ/s ou kW) e é uma medida quantitativa do tamanho do incêndio. Ela descreve como será liberada a energia disponível dos materiais existentes no local. Alguns exemplos de pico de taxas de liberação de calor podem ser vistos na tabela Tabela 3.

Tabela 3 - Taxa de liberação de calor de alguns materiais

| Material | Massa (kg) | Pico da taxa de liberação de calor (kW) |
|---|-------------|---|
| Cesta de lixo pequena | 0,7 - 6,1 | 4 - 18 |
| Saco de lixo com 5 kg de plástico e papel | 1,1 - 3,4 | 140 - 350 |
| Colchão de algodão | 11,8 - 13,2 | 40 - 970 |
| Móvel para TV (estante) | 31,3 - 32,7 | 120 - 290 |
| Cadeira de PVC com armação de metal | 15,4 | 270 |
| Poltrona de algodão | 17,7 - 31,8 | 290 - 370 |
| Gasolina (recipiente - diâmetro 0,61 m) | 19 | 400 |
| Árvore de natal natural seca | 5,4 - 7,3 | 500 - 650 |
| Colchão de poliuretano | 3,2 - 14,1 | 810 - 2.630 |
| Poltrona de poliuretano | 12,2 - 27,2 | 1.350 - 1.990 |
| Sofá de poliuretano | 51,3 | 3.120 |

Fonte: National Fire Protection Association (NFPA) 921

Combustão lenta

A incandescência – *smoldering* – é um processo de combustão relativamente lento que ocorre entre o oxigênio e um sólido combustível, comumente chamado de brasa.

Incandescências podem ser o início ou o fim de uma chama, ou seja, de uma combustão viva. Em todos os casos há produção de luz, calor e fumaça.



Figura 16 - Incandescência em um incêndio

A reação se desenvolve na superfície do sólido e o oxigênio se difunde para a superfície deste, a qual começa a luzir e a queimar. A luminescência é indicativa de temperaturas acima de 1000 °C.

Geralmente, há presença de incandescência na fase final dos incêndios. Ela pode tornar-se uma combustão viva se houver um aumento do fluxo de ar sobre o combustível, semelhantemente ao efeito que se deseja obter ao acender uma churrasqueira. Por isso, uma ação de ventilação mal realizada por parte dos bombeiros, durante o combate ao incêndio ou no rescaldo, poderá agravar as condições do sinistro, re-ignindo os materiais combustíveis.

Incandescências atingem altas temperaturas e estão presentes na tanto na fase inicial quanto na final de incêndios e nessa fase, oferecem risco de re-ignição dos materiais.

Um cigarro sobre uma poltrona ou colchão inicia uma combustão lenta que pode resultar em uma combustão viva e, conseqüentemente, em um incêndio.

A velocidade da reação da combustão lenta depende de muitos fatores, mas é geralmente da ordem de 10^{-2} a 10^{-3} cm/s ou aproximadamente 1 a 5 mm/minuto.

Altos níveis de monóxido de carbono (CO) estão associados a esses tipos de combustão. Mais de 10% da massa combustível é convertida em CO, o qual necessita de ar para continuar reagindo, embora a quantidade requerida seja pouca.

Em um incêndio, essa combustão, apesar de ser muito lenta, é potencialmente mortal devido à produção de monóxido de carbono.

A combustão lenta está presente no final dos incêndios e é potencialmente letal devido à produção de monóxido de carbono. Em todos os casos há produção de luz, calor e fumaça.

A incandescência geralmente ocorre em:

1. combustíveis sólidos porosos, como fumos, carvão, ou, ainda, a espuma ou algodão de colchões;
2. em combinação de combustíveis, como a mistura de tecidos com algodão ou polímeros – como o caso de sofás; e
3. em locais de descarga de combustíveis sólidos já queimados – como o caso de lixões ou carvoaria.

É importante não confundir combustão lenta com reação lenta. Em uma reação lenta, ocorrerá uma deterioração gradual e quase imperceptível do material, como o caso da oxidação, não havendo liberação significativa de calor. Um exemplo clássico de oxidação é o

ferro em processo de ferrugem (Figura 17). O oxigênio da atmosfera combina com as propriedades do ferro e gradualmente, retira as ligações que mantêm os átomos de ferro juntos. Entretanto, não há liberação de calor suficiente para classificá-lo como combustão.



Figura 17 - Material sob ação da ferrugem, que caracteriza uma reação lenta

2.2.3 Combustão espontânea

Em todas as formas de combustão apresentadas até agora, fez-se referência à presença de uma fonte externa de calor para dar início a um processo de queima. Entretanto, é importante abordar um tipo de combustão que foge a essa regra, de rara ocorrência, que não necessita de uma fonte externa de calor. É o caso da combustão espontânea.

A combustão espontânea é um processo de combustão que começa, geralmente, com uma lenta oxidação do combustível exposto ao ar. Pode ocorrer com materiais como o fósforo branco, amontoados de algodão ou em curtumes (tratamentos de peles de animais).

Nesses dois últimos, há uma decomposição orgânica do material e a reação química é relativamente lenta, o que torna difícil sua observação. Pode, em alguns casos, assemelhar-se à incandescência, o que faz com que uma combustão dessa natureza seja percebida apenas quando a situação já é grave.

A taxa de liberação de energia pela reação química compete com a habilidade do combustível de dissipar calor para o ar ambiente. Isso quer dizer que, se a reação não libera calor suficientemente para o ambiente, sua temperatura irá aumentar e, conseqüentemente, a velocidade da reação química também aumentará.

Esse processo tanto pode resultar em uma combustão viva (uma chama), quanto em uma combustão lenta (incandescência). Todo o processo pode levar horas ou dias e necessita de um conjunto crítico de condições ambientais ou de aquecimento para ser viável.

Até a atualidade não há estudos conclusivos sobre como se processa esse tipo de combustão.

2.3. O estudo da vela

No século XIX, o cientista Michael Faraday já sugeria o estudo da história química da vela, afirmando que não existia melhor exemplo para se compreender o fogo, senão pelo comportamento de uma simples vela e que praticamente todas as leis do universo passam por esse processo.



Figura 18 - A combustão de uma vela

Até hoje, o estudo da vela é um dos meios mais didáticos para a compreensão do comportamento do fogo.

Em uma vela, o calor inicial da chama no pavio faz com que a cera, em sua superfície, derreta, encharcando o pavio, o qual, por sua vez, conduz a cera derretida por ação capilar (semelhantemente ao que ocorre com as raízes de uma árvore ao puxar água do solo) à zona de reação, onde o calor da chama fará com que a cera derretida evapore e se misture ao ar, produzindo luz e mais calor.

É importante então que se compreenda que o principal elemento em queima na vela não é o pavio, mas os gases combustíveis provenientes da cera em reação com o ar, pois o pavio só queima quando atinge a zona de reação.

Se uma tela metálica (desde que não seja de alumínio, por causa da sua temperatura de fusão) atravessa a chama de uma vela, nota-se que a chama permanece em volta do pavio, provando que a chama se processa ao redor dele e que há uma zona de reação onde os gases combustíveis provenientes da cera estarão se misturando ao oxigênio.

A função da tela nesse exercício será de dissipar energia sem apagar a chama.

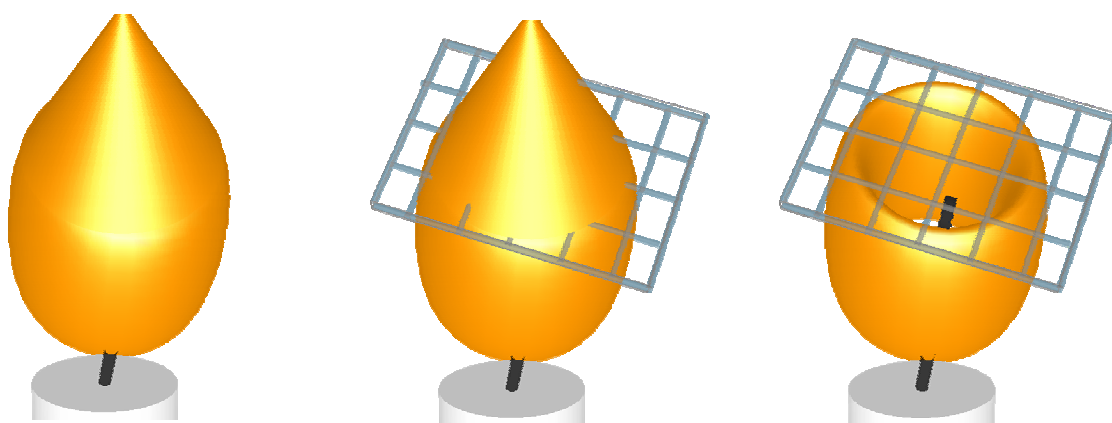


Figura 19 – Esquema da chama de uma vela quando atravessada por uma tela metálica.



Figura 20 - Chama de uma vela sob uma tela metálica

A figura mostra a combustão ao redor do pavio, provando que a combustão é uma reação gasosa.

A **zona de reação** é a área em que o combustível (na forma gasosa) irá se misturar – difundir – ao oxigênio.

A chama é uma reação totalmente gasosa.

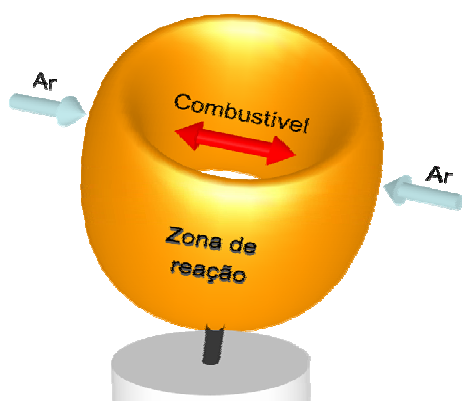


Figura 21 - Zona de reação da chama de uma vela

A figura ao lado mostra a zona de reação, que é a área onde os gases – combustível e oxigênio – são misturados, produzindo a queima.

É possível observar que quando a ponta do pavio torna-se luminescente é sinal de que ele está sendo consumido, e que,

conseqüentemente, está servindo de combustível, como é possível observar na Figura 22.



A ponta do pavio, ao ser dobrada, entra na zona de reação, apresentando luminescência. Isso significa que está queimando.

Figura 22 - Chama de uma vela com pavio dobrado

Considerando que a cera derretida é conduzida pelo pavio, é correto também afirmar que o tamanho da chama será influenciado por seu tamanho e espessura. Quanto mais longo e espesso for o pavio, mais cera derretida e, portanto, mais combustível será capaz de conduzir à zona de reação.

Na parte mais alta da chama, nota-se uma área amarela, onde a luz é mais intensa. Nela encontra-se a **chama difusa**, que é o tipo de chama no qual o combustível e o oxigênio são transportados (difundidos) de lados opostos da zona de reação (ver Figura 21), em decorrência da diferença de concentração entre os gases (combustível e comburente).

Pela Lei de Fick, difusão é o processo de movimentação de componentes químicos e outras estruturas moleculares em uma mistura – normalmente de gases – que se dá de uma zona alta para uma de baixa concentração na mistura.

Um exemplo disso é o que ocorre com uma gota de tinta dissolvendo-se em um copo com água. A tinta irá se difundir com a água até que todo o volume do copo esteja colorido. O mesmo processo ocorre entre o oxigênio e os gases combustíveis na chama. O oxigênio no ar irá se mover até a zona de reação, a uma gravidade zero. O combustível é transportado para dentro da zona de reação, do lado oposto, pelo mesmo processo e ambos se misturam pela difusão.

Chama difusa é um processo de combustão, no qual o gás combustível e o oxigênio são transportados para uma zona de reação, devido a uma diferença de concentração.

Chamas difusas representam a categoria predominante de chamas, principalmente nos incêndios. É o caso das chamas de incêndio florestal, da chama em um palito de fósforo ou, ainda, da ignição da fumaça em um incêndio estrutural.



Figura 23 - Exemplos de chama difusa (incêndio florestal, chama de um fósforo e incêndio urbano)

Na base da chama, há uma parte de coloração azulada. Nesta área, os gases produzidos pela cera estão reagindo com o oxigênio em uma melhor mistura, o que produz uma queima sem resíduo, denominada de chama do tipo pré-misturada, na qual o combustível e o

comburente são misturados antes de atingirem a zona de reação, como é possível notar na Figura 18.

A cor emitida pela chama é determinada, em parte, pelos elementos contidos na reação. É a cor emitida pelos hidrocarbonetos. Exemplo: quando misturada com o ar, uma solda de oxi-acetileno bem ajustada gera uma chama de um tom azul claro.

A chama é mais visível quando carbonos e outros sólidos ou líquidos, resultantes da combustão incompleta, são levados às áreas de altas temperaturas e incandescem indo desde o tom vermelho, até o laranja, amarelo ou branco, dependendo de sua temperatura (ver Tabela 4).

Tabela 4 - Cor associada a algumas temperaturas em incêndios

| Temperatura | Cor aparente |
|-------------|-----------------------------------|
| 550°C | primeira chama visível (vermelha) |
| 700°C | vermelho fosco |
| 900°C | vermelho vivo |
| 1100°C | laranja |
| 1400°C | branca |

Fonte: An Introduction to Fire Dynamics, D. Drysdale

A **chama pré-misturada** é um tipo de chama no qual o gás combustível e o ar (oxigênio) são misturados antes que a ignição ocorra, facilitando a queima. Equipamentos como fogão ou aparelho de oxi-acetileno são projetados para trabalharem com chama pré-misturada, produzindo uma queima limpa.

Sua combustão é caracterizada por chamas de cor azul.

No caso dos fogões, há uma entrada de ar em seu gabinete que permite a mistura entre o gás liquefeito de petróleo (GLP) e o ar antes de queimar na boca. No caso do maçarico, há a mistura entre o oxigênio e o acetileno no punho do aparelho, fornecendo ao bico a

mistura já pronta e proporcionando uma queima de altíssima temperatura. Uma máquina de combustão interna à gasolina (com ignição por centelha) ou uma máquina a diesel (com ignição por compressão) também trabalham com chamas pré-misturadas.



A chama pré-misturada produz uma queima limpa, ou seja, sem resíduos.

Figura 24 - Chama de um fogão

Chama pré-misturada é o processo de queima do combustível já misturado ao ar antes de atingir a fonte de calor e alcançar a ignição. Geralmente, possui chama de cor azul.

A chama pré-misturada aparece na ignição de sólidos e líquidos, no princípio das chamas difusas, como é possível observar na Figura 25.



Na foto ao lado, é possível observar a coloração azulada na base da chama, caracterizando a parte que é pré-misturada.

Figura 25 – Presença da chama pré-misturada na queima da madeira

As chamas pré-misturadas têm maior poder calorífico que as chamas difusas (ver Tabela 1).

Voltando à experiência da tela metálica atravessando a chama, é possível notar que, se a tela aproximar-se da base da chama, há liberação de uma fumaça branca. Se for aproximada uma chama de fósforo dessa fumaça, é possível observar que ela entra em ignição por causa dos íons liberados durante a reação em cadeia. Por isso, a fumaça branca é combustível.



Com a tela próxima à base da chama, a fumaça branca entra em ignição quando se aproxima de um fósforo aceso.

Figura 26 - Queima da fumaça branca em uma vela

O mesmo fenômeno pode ser observado ao se extinguir a chama de uma vela. Ao aproximar a fumaça que ainda está sendo liberada de uma nova chama, ocorrerá o acendimento do pavio ainda que a chama não o tenha tocado, demonstrando que a fumaça é combustível.

À medida que se aproxima a tela da parte superior da chama, nota-se que a fumaça torna-se escura. O mesmo fósforo aceso aproximado dessa fumaça se apagará. Isso porque, nessa área, os gases já foram mais queimados que na área mais baixa (onde a fumaça é branca).

Sua coloração escura é decorrente da presença de mais resíduos – fuligem – e dióxido de carbono, que dificultam a queima do palito de fósforo, apagando-o por abafamento.



A chama do palito de fósforo é extinta ao se aproximar da fumaça escura.

Figura 27 - Fumaça escura em uma vela

Nos incêndios, ocorre liberação tanto de fumaça branca quanto de fumaça escura. É natural que ambas se misturem, formando uma fumaça de tom cinzento.

Cálculo da altura de chama

Um bom modo de se estimar a altura da chama pode ser obtido por meio da expressão (G. Heskestad, *Luminous Heights of Turbulent Diffusion Flames*, *Fire Safety Journal* 5 (1983), 103-108):

$$L_f = 0,23 \dot{Q}^{2/5} - 1,02 D$$

Na qual:

L_f é a estimativa de altura da chama, dada em metros

\dot{Q} é a taxa de liberação de energia, dada em kW

D é o diâmetro do material combustível, dada em metros

De forma prática, é possível estimar a altura da chama para alguns materiais, quando da ocorrência de um incêndio, como mostrado na Tabela 5:

Tabela 5 - Estimativa da altura de chama a partir da fórmula de Heskestad

| Material | Taxa de liberação de calor (kW) | Diâmetro (m) | Altura de chama (m) |
|-----------------|--|---------------------|----------------------------|
| Madeira | 130 | 1 | 0,59 |
| Heptano | 2661 | 1 | 4,37 |
| Gasolina | 1887 | 1 | 3,68 |

Em casos reais, pode-se estimar a taxa de liberação da combustão avaliando-se a altura da chama, dados que podem ser obtidos tanto pela equação anterior, quanto pela Tabela 5.

2.4. Explosão

Existe combustão que ocorre em uma velocidade de queima muito alta, geralmente com a presença de chamas não sustentáveis (de efeito passageiro), porém muito perigosas.

Uma explosão é o resultado de uma expansão repentina e violenta de um combustível gasoso, em decorrência da ignição da mistura entre um gás (ou vapor de gás) e o oxigênio presente no ar. Essa ignição se dá em alta velocidade, gerando uma onda de choque que se desloca em todas as direções, de forma radial.



Fonte: <http://fireforceone.com/rl/filelist.asp?parentid=611> - Explosion_fire Ball

Figura 28 – Exemplo de uma explosão

Uma explosão por combustão é uma explosão química. É o caso da maioria das explosões ocorridas em incêndios, como as decorrentes do vazamento de GLP ou da fumaça.

Como visto anteriormente, a fumaça possui, em seu interior, gases combustíveis (provenientes dos íons resultantes da reação em cadeia) que, ao se acumularem em um ambiente pouco ventilado, como no caso dos incêndios estruturais, podem sofrer uma ignição de forma súbita com a entrada de oxigênio. Essa explosão de fumaça é conhecida como *backdraft* ou *backdraught* e será abordada mais adiante.

Uma explosão pode ser classificada como uma detonação ou deflagração. Uma **detonação** ocorre quando o deslocamento do ar tem uma velocidade superior a 340 metros/segundo. Abaixo disso, há uma **deflagração**. Explosões de fumaça ou do GLP no ambiente são deflagrações e não detonações, posto que a velocidade do ar é menor que 340 m/s, ao contrário do que ocorre com a maioria dos artefatos explosivos (bombas).

É importante lembrar que, mesmo estando abaixo de 340 m/s, explosões por deflagração possuem uma onda de choque capaz de afetar a estrutura da edificação, levando à morte quem estiver no ambiente.

Sempre que houver uma mistura de gás combustível com o ar haverá o perigo de uma explosão. Por meio de análises químicas e testes científicos, determinou-se que os gases só podem alcançar a ignição quando atingem determinadas concentrações, variáveis de substância para substância.

Se não houver quantidade suficiente de gás combustível, a mistura será pobre e não haverá queima. Da mesma forma, se a concentração do gás for muito alta a mistura é denominada “muito rica” e também não irá deflagrar. Quando a mistura gás-ar cai em uma faixa na qual pode alcançar a ignição, diz-se que está dentro dos limites de explosividade ou limites inflamáveis.

Conforme se nota na Tabela 6 e na Figura 29, os níveis de um gás em um ambiente são medidos em porcentagem do volume. Conseqüentemente, haverá explosão quando houver uma proporcionalidade na mistura entre os dois elementos. Quanto mais alta for a presença de um só deles, menor o perigo de explosão.

A ocorrência de uma explosão em um ambiente depende da **faixa de inflamabilidade** da mistura do ar com o gás, que varia de substância para substância.

Tabela 6 - Limites de inflamabilidade de algumas substâncias

| | Limite inferior de inflamabilidade | | Limite superior de inflamabilidade | |
|--------------------|------------------------------------|------------------|------------------------------------|------------------|
| | %Vol | g/m ³ | %Vol | g/m ³ |
| Hidrogênio | 4.0 | 3.6 | 75 | 67 |
| Monóxido de carbon | 12.5 | 157 | 74 | 932 |
| Metano | 5.0 | 36 | 15 | 126 |
| Etano | 3.0 | 41 | 12.4 | 190 |
| Propano | 2.1 | 42 | 9.5 | 210 |
| n-Butano | 1.8 | 48 | 8.4 | 240 |
| n-Pentano | 1.4 | 46 | 7.8 | 270 |
| n-Hexano | 1.2 | 47 | 7.4 | 310 |
| n-Heptano | 1.05 | 47 | 6.7 | 320 |
| K-Octano | 0.95 | 49 | | |
| n-Nonano | 0.85 | 49 | | |
| n-Decano | 0.75 | 48 | 5.6 | 380 |
| Eteno | 2.7 | 35 | 36 | 700 |
| Propeno | 2.4 | 46 | 11 | 210 |
| Buteno-1 | 1.7 | 44 | 9.7 | 270 |
| Acetileno | 2.5 | 29 | (100) | – |
| Metanol | 6.7 | 103 | 36 | 810 |
| Etanol | 3.3 | 70 | 19 | 480 |
| n-Propanol | 2.2 | 60 | 14 | 420 |
| Acetona | 2.6 | 70 | 13 | 390 |
| Benzeno | 1.3 | 47 | 7.9 | 300 |

Fonte: An Introduction to Fire Dynamics, Douglas Drysdale

Os limites da faixa de inflamabilidade (ou explosividade) são geralmente registrados a uma pressão de 1 atmosfera ao nível do mar e a uma temperatura de 21 °C.

Se houver aumento de temperatura e de pressão, ocorrerá a redução do limite inferior e aumento do limite superior em torno de 1%, aumentando a faixa de inflamabilidade e, conseqüentemente, o risco de explosão. Em algumas misturas, o limite superior pode atingir 100% em

altas temperaturas. A diminuição da temperatura e da pressão fará o efeito inverso.

Essa variação da faixa de inflamabilidade sob condições anormais denota a importância de os bombeiros adotarem cuidados adicionais ao se depararem com emergências envolvendo gases inflamáveis armazenados em cilindros, com ou sem vazamento. Uma medida emergencial é resfriar os recipientes, a fim de manter a sua temperatura baixa.

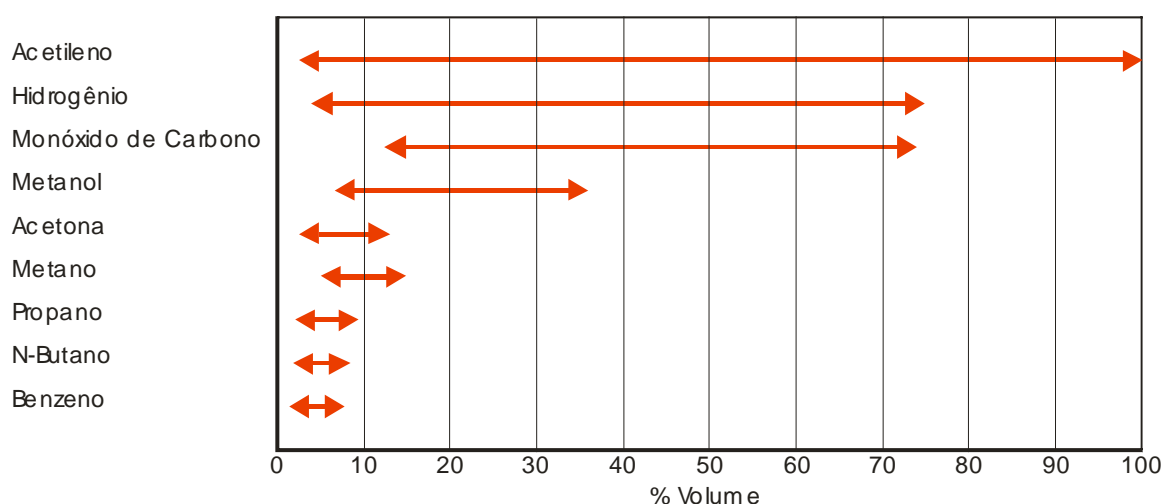


Figura 29 - Quadro comparativo da faixa de inflamabilidade de gases comuns

Como se pode notar na Figura 29, bastam somente 13% de monóxido de carbono no ambiente e calor para ocorrer uma explosão de fumaça. Isso mostra o quanto a fumaça, composta principalmente por CO, pode ser explosiva em um ambiente com uma faixa de inflamabilidade muito maior que a do GLP e quase tão alta quanto a do acetileno e do hidrogênio, considerados gases muito explosivos. Daí a importância do cuidado dos bombeiros na abordagem de incêndios estruturais, principalmente enclausurados.

A faixa de inflamabilidade do monóxido de carbono presente na fumaça é muito maior que a do GLP e quase tão grande quanto a do acetileno e do hidrogênio.

As condições do ambiente que comporta o material combustível influenciarão diretamente o risco de explosão. Um exemplo é o tanque subterrâneo de combustível de um posto de gasolina.

Se estiver cheio, não haverá risco de explosão, pois a quantidade de vapor do gás causará uma mistura muito rica. Entretanto, se o tanque estiver com pouco combustível (quase vazio), este irá secar gradualmente, liberando gás no ambiente e atingindo uma mistura ideal com o ar dentro do recipiente, atingindo sua faixa de inflamabilidade.

Basta que uma fonte de calor entre em contato com essa mistura para que ocorra uma explosão. Como o abastecimento dos tanques se dá quando estes estão vazios ou quase vazios, o perigo de uma explosão é maior quando o caminhão tanque está abastecendo os reservatórios do posto de gasolina. A energia liberada por um cigarro aceso, uma lanterna, uma campainha ou, ainda, a eletricidade estática é suficiente para deflagrar uma explosão em tais condições.

A eletricidade estática é obtida pela fricção (ainda que rápida) ou choque entre corpos de diferentes materiais, gerando uma diferença de potencial nas cargas elétricas devido à separação das superfícies em nível molecular. Elétrons de uma substância são tomados por outra e, quando quantidade suficiente é coletada, tentam equalizar o número de elétrons entre os corpos, pulando o espaço na forma de descarga elétrica.

Essa pequena, porém poderosa forma de energia pode atingir temperatura superior a 1000 °C. Apesar da alta geração de calor, a

dissipação é muito rápida, não oferecendo à maioria dos combustíveis comuns (madeira, papel, tecido) condições de inflamação, ao contrário do que ocorre com os gases provenientes dos líquidos inflamáveis armazenados, como é o caso dos reservatórios de postos de gasolina e distribuidoras.

Por esse motivo, sistemas eficientes de aterramento e medidas rígidas de segurança devem ser adotados por ocasião dos abastecimentos de combustível nos tanques.

A ignição de uma mistura de gás-ar é explosiva por causa de sua grande área superficial exposta ao calor, ou seja, seu coeficiente superfície-massa é muito alto.

As medidas de ação específicas para o combate a incêndio em ocorrências dessa natureza, bem como em outras que apresentem riscos especiais, devem ser adotadas conforme os Procedimentos Operacionais Padrão (POP) do CBMDF, específicos para os diversos tipos de ocorrência, os quais devem ser de conhecimento das guarnições de bombeiros.

Existem deflagrações que não são produzidas por gases inflamáveis, mas, sim, por poeiras inflamáveis, que também podem causar explosões, como o que ocorre com o alumínio ou com componentes orgânicos, tais como açúcar, leite em pó, grãos, plásticos, pesticidas, produtos farmacêuticos, serragem, etc.

Uma explosão dessa natureza é o produto da combustão explosiva entre a mistura de poeira combustível com o ar, a qual, ao encontrar alguma fonte de calor, vem a inflamar-se de forma rápida,

atingindo todo o ambiente. A faixa de explosividade, nesse caso, é difícil de estabelecer e depende de diversos fatores, tais como:

- tamanho das partículas em suspensão – quanto menor o tamanho das partículas, maior a explosividade por causa da sua relação superfície versus massa;
- umidade – quanto menos úmida a mistura, maior o risco de explosão;
- misturas híbridas – diferentes materiais juntos tendem a aumentar a explosividade da mistura, requerendo menos energia para deflagrá-la;
- tempo em suspensão – quanto mais tempo a poeira permanecer em suspensão no ambiente, maior será o risco de explosão;
- concentração de oxigênio – quanto maior a concentração de oxigênio na mistura, mais facilmente se dará a reação de combustão.

Em um aspecto prático, uma boa medição do risco de um ambiente cheio de poeira inflamável em suspensão é estender o próprio braço. Se não for possível enxergar sua mão, é sinal de que a situação deve ser considerada como explosiva.

Deve-se checar também se há deposição de pó nas superfícies – até 1 mm de poeira sobre a superfície é tolerado. Acima disso, deve-se dispensar atenção e cuidados maiores.

Se em um ambiente com alta concentração de poeira combustível não for possível enxergar as mãos quando os braços estão estendidos, o risco de explosão é muito grande.

De forma geral, a temperatura para deflagrar explosão em mistura de ar e poeira gira em torno de 330 a 400 °C, sendo bem maior que em mistura de ar e gás. Essa temperatura pode ser facilmente encontrada em superfícies quentes de maquinário industrial ou de fornos, que é o caso de silos.

Tabela 7 - Dados de explosividade de pós agrícolas

| Produtos | Temperatura de ignição (°C) | Energia mínima de ignição (J) | Concentração mínima explosiva (kg/m ³) |
|------------------------|-----------------------------|-------------------------------|--|
| Arroz | 440 | 0,04 | 0,045 |
| Milho | 400 | 0,04 | 0,45 |
| Trigo | 480 | 0,06 | 0,055 |
| Açúcar | 350 | 0,03 | 0,035 |
| Pó de grãos misturados | 430 | 0,03 | 0,055 |
| Farinha de soja | 520 | 0,05 | 0,035 |
| Farinha de trigo | 380 | 0,05 | 0,050 |
| Amido de milho | 380 | 0,02 | 0,040 |
| Carvão em pó | 610 | 0,06 | 0,055 |

Fonte: Explosion Investigation and Analysis, Kennedy, Patrick M. e John Kennedy

Os cuidados dos bombeiros em ambientes com mistura de ar e gás, ou de ar e poeira combustível, são geralmente de prevenção à explosão. Uma vez ocorrida, pouco se pode fazer. Na situação em que a guarnição chega ao local depois da explosão, devem ser considerados os riscos de um colapso da estrutura.

As ações a serem adotadas pelos bombeiros devem seguir o POP específico para ocorrências em ambientes com poeiras combustíveis em suspensão. Em linhas gerais, a guarnição de socorro deve:

- evacuar e isolar a área;

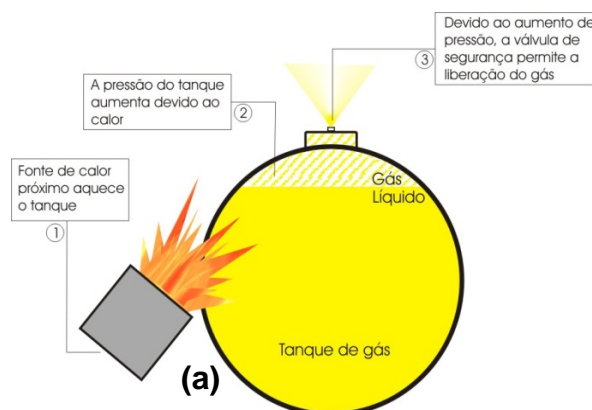
- umedecer o ambiente com pulsos curtos de jato atomizado, com cuidado para não mover a poeira; e
- desligar maquinários e equipamentos elétricos energizados.

BLEVE – Boiling liquid expanding vapor explosion

É o tipo de explosão que ocorre em recipientes que comportam líquidos, em decorrência da pressão exercida em seus lados, quando aquecido, e ferve, excedendo a capacidade do recipiente de suportar a pressão resultante.

Ainda não há um termo em português para descrever esse fenômeno, que, geralmente, ocorre quando o calor é aplicado ao recipiente, levando o líquido à fervura. A pressão do vapor irá aumentar até atingir um ponto em que o recipiente não suportará mais, causando uma fissura em sua estrutura, com a liberação do vapor de forma violenta.

A Figura 30 mostra o desenvolvimento típico de um BLEVE.



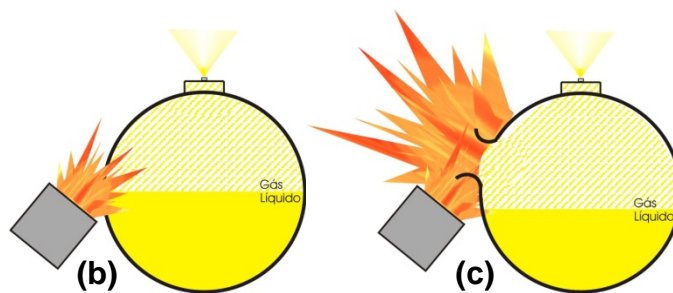


Figura 30 - Desenvolvimento de um BLEVE

As paredes do tanque são resfriadas inicialmente pelo líquido que está dentro dele (Figura 30a). Este efeito de resfriamento desaparece à medida que o líquido diminui em decorrência da sua evaporação (Figura 30b). Quando o nível do líquido está abaixo da fonte de calor (Figura 30c), a parede do recipiente torna-se enfraquecida pela ação do calor e do aumento da pressão interna, forçando a estrutura e levando à ruptura (Figura 30c).

O BLEVE pode ocorrer também quando existe um dano na estrutura do cilindro (ponto fraco), submetido a um aumento da pressão interna, ainda que o líquido não tenha ficado abaixo do ponto de contato com a fonte de calor.

O resultado de um BLEVE pode ser desde um escape mínimo do vapor pela ruptura (até a equalização da pressão interna do cilindro), até uma explosão (que libera um grande onda de impacto e calor).

Para se compreender melhor esse fenômeno, basta lembrar a pipoca: o líquido dentro da casca dura do milho é aquecido, ferve e exerce uma pressão contra esta até que se rompa, resultando em um núcleo cozido que escapou da sua casca enquanto a pressão interna se igualava à do ambiente.

Esse fenômeno pode ocorrer em recipientes que armazenam ou transportam líquidos ou gás, como os caminhões tanque (ver Figura 31) ou reservatórios quando são aquecidos.

As ações a serem adotadas pelos bombeiros devem seguir o Procedimento Operacional Padrão (POP) específico para ocorrências envolvendo tanque. Em linhas gerais, a guarnição de socorro deve:

- resfriar o tanque (à distância);
- isolar a área; e
- controlar o vazamento.



Figura 31 – Tipo de recipiente sujeito a *BLEVE*

Ocorrências envolvendo caminhões tanque ou tanques de armazenagem devem ser consideradas como risco de explosão, tanto em relação ao isolamento da área quanto à necessidade de resfriar o recipiente, por causa da possibilidade da ocorrência de um BLEVE.

Mesmo que o líquido no recipiente não seja inflamável, a sua ruptura pode ser violenta, resultando em uma força tal que lance fragmentos a grandes distâncias, acompanhado de uma forte onda de choque.

Se o líquido for inflamável, a fissura no recipiente irá exibir uma bola de fogo que piora as condições da ocorrência. Se o líquido for um tipo de produto perigoso, outras tantas variáveis adicionais devem ser observadas, como o cuidado com rede pluvial, contaminação pelo ar,

etc. Nesse caso, devem ser adotados os procedimentos relativos a produtos perigosos.

O BLEVE pode ocorrer tanto em recipientes que contenham líquidos inflamáveis, quanto com líquidos não inflamáveis.

3. Transferência de calor

Como a combustão é uma reação química que produz luz e calor, é importante que os bombeiros saibam o que é e como o calor se propaga em um ambiente, uma vez que ele possui um potencial de dano tão grande ou maior do que o da ação direta das chamas em um incêndio.

Termodinâmica é a ciência que define a relação entre energia, calor e propriedades físicas mensuráveis, como a temperatura, o que torna o seu estudo de relevante importância para se compreender o comportamento do fogo. Para uma melhor compreensão a respeito, é preciso observar os seguintes conceitos:

Energia é a expressão mais produtiva do equilíbrio termodinâmico de um sistema (ou material), apresentando-se sempre como trabalho (movimento da massa ao longo de uma distância) ou calor. Existem vários tipos de energia e suas aplicações mais comuns envolvem a transformação de um tipo para outra. Exemplos: em um veículo, energia química é convertida em trabalho para impulsionar as rodas (energia cinética) e o calor residual do bloco do motor é dissipado para o ar. Em uma reação em cadeia, energia térmica é convertida em energia química (novos produtos de combustão), que proporcionará a transferência de calor de um corpo para outro em um incêndio.

Calor é a transferência de energia devido a uma diferença de temperatura. É a energia térmica em movimento que se transporta de uma região mais quente para uma região mais fria, obedecendo à 1ª Lei da Termodinâmica (princípio da conservação da energia), na qual os materiais tendem a alcançar o equilíbrio térmico.

Pelo equilíbrio térmico, a transferência de calor de uma região mais quente para uma região mais fria ocorrerá até que ambas estejam com a mesma temperatura.

No equilíbrio, também conhecido como regime estacionário ou permanente, todo o corpo estará em uma mesma temperatura.

A transferência de calor pode ocorrer tanto entre corpos diferentes como em áreas distintas de um mesmo corpo.

O calor presente em um incêndio pode ser gerado pela transformação de outras formas de energia, como, por exemplo:

- da energia química - calor gerado pela combustão;
- da energia elétrica - calor gerado pela passagem de eletricidade por meio de um condutor, ou do próprio ar: arco voltaico, faísca, eletricidade estática e raio.
- da energia mecânica - calor gerado pelo atrito entre dois corpos; ocorre com frequência com motores em suas peças internas: rolamentos, mancais, ventoinhas, ventiladores e afins.

Existe também a energia térmica decorrente da energia nuclear, que é o calor gerado pela fissão ou fusão dos átomos, porém de raríssima ocorrência no caso de incêndios urbanos.

O calor (energia térmica) está diretamente associado com a diferença de temperatura entre dois corpos. Já a temperatura é a expressão do grau de agitação das moléculas. As moléculas estão em constante movimento e, quando aquecidas, sua velocidade aumenta, elevando também a temperatura. Algo que é “quente” tem relativamente maior temperatura comparado a outro que é “frio”.

Temperatura é a medida direta da atividade molecular, ou seja, é a medida da energia térmica. Todas as escalas utilizadas para

definir temperatura são arbitrárias e foram estabelecidas levando-se em conta a conveniência.

A Tabela 8 apresenta a relação entre quatro escalas baseadas no ponto de ebulição e congelamento da água. Duas delas – Rankine e Kelvin – estabelecem zero grau como zero absoluto.

Zero absoluto é a temperatura na qual a atividade molecular cessa, ou seja, não há movimentação das moléculas.

Tabela 8 - Pontos principais em relação à água nas escalas de temperatura mais utilizadas

| Escala | Símbolo | Ponto de ebulição | Ponto de congelamento | Zero absoluto |
|----------------|-----------|-------------------|-----------------------|---------------|
| Fahrenheit | °F | 212 | 32 | -460 |
| Rankine | °R | 672 | 492 | 0 |
| Celsius | °C | 100 | 0 | -273 |
| Kelvin | K | 373 | 273 | 0 |

Fonte: Fundamentals of Physics, Halliday, Resnick e Walker

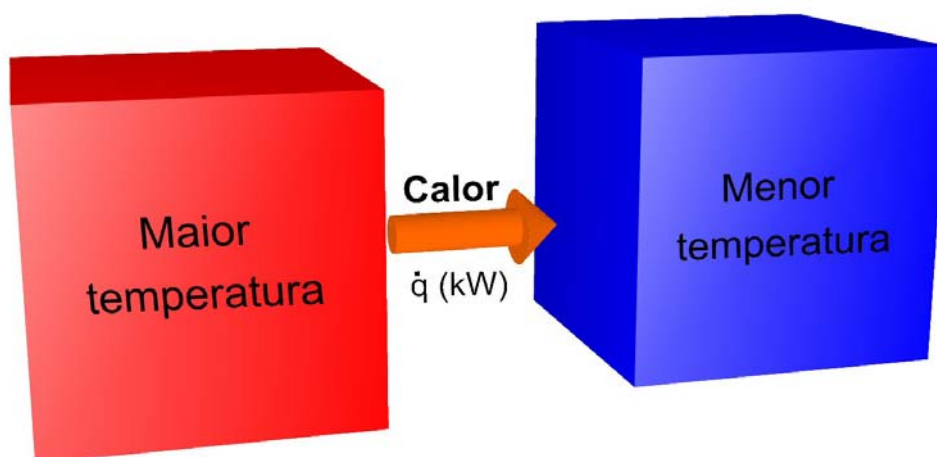


Figura 32 - Transferência de calor

A Figura 32 esquematiza o fluxo de calor do corpo mais quente para o mais frio, com a unidade representada em kilowatts. Da mesma

forma, em um incêndio, o material aquecido inicialmente (foco do incêndio) irá transferir calor para o ambiente e outros materiais próximos. Se essa ação for continuada, estes irão sofrer pirólise, podendo atingir seu ponto de ignição.

O calor é, então, o responsável pela mudança de temperatura nos campos e é proporcional ao calor específico do corpo (c), que é a quantidade de calor por unidade de massa necessária para elevar a sua temperatura em 1° C. O calor específico é uma característica própria de cada material, com valor constante na Tabela 9.

O calor (q) pode ser calculado pela equação:

$$q = m c \Delta T$$

Na qual:

m é a massa.

c é o calor específico do material.

ΔT é a diferença de temperatura entre os corpos (ou entre as partes).

Usualmente, o calor é expresso em joules (J). São necessários 4,182 J para elevar 1 (um) grama de água a 1° C. A taxa de fluxo de calor é representado por \dot{q} e é mensurada por quilojoules por segundo (kJ/s) ou kilowatts (kW).

Tabela 9 - Propriedades térmicas de alguns materiais

| Material | Condutividade Térmica (K) (W/m-K) | Calor Específico (c) (kJ/kg-K) | Densidade (ρ) (kg/m ³) | Difusividade Térmica (α) (m ² /s) |
|----------------------|-----------------------------------|--------------------------------|---|---|
| Cobre | 387 | 0,380 | 8940 | 1,14 x 10 ⁻⁴ |
| Aço doce | 45,8 | 0,460 | 7850 | 1,26 x 10 ⁻⁵ |
| Tijolo comum | 0,69 | 0,840 | 1600 | 5,2 x 10 ⁻⁷ |
| Concreto | 0,8 - 1,4 | 0,880 | 1900 - 2300 | 5,7 x 10 ⁻⁷ |
| Vidro | 0,76 | 0,840 | 2700 | 3,3 x 10 ⁻⁷ |
| Gesso | 0,48 | 0,840 | 1440 | 4,1 x 10 ⁻⁷ |
| Polímero (PMMA) | 0,19 | 1,420 | 1190 | 1,1 x 10 ⁻⁷ |
| Carvalho | 0,17 | 2,380 | 800 | 8,9 x 10 ⁻⁸ |
| Pinho amarelo | 0,14 | 2,850 | 640 | 8,3 x 10 ⁻⁸ |
| Asbesto | 0,15 | 1,050 | 577 | 2,5 x 10 ⁻⁷ |
| Papelão isolante | 0,041 | 2,090 | 229 | 8,6 x 10 ⁻⁸ |
| Espuma (poliuretano) | 0,034 | 1,400 | 20 | 1,2 x 10 ⁻⁶ |
| Ar | 0,026 | 1,040 | 1,1 | 2,2 x 10 ⁻⁵ |

Fonte: Principles of Fire Behavior, D. Drysdale

Um corpo não possui calor, mas, sim, temperatura.

Em uma reação, o calor pode ser liberado ou absorvido.

Quando o calor é liberado, a reação é denominada **exotérmica**. Exemplo: quando se aplica pressão em um gás, este libera calor para o ambiente e se transforma em líquido, como o caso do GLP envasado e do CO₂ em um aparelho extintor. Se for aplicada mais pressão, continuará havendo liberação de calor e ele solidificar-se-á, como o caso do CO₂ que se transforma em gelo seco.

Quando o calor é absorvido, a reação é denominada **endotérmica**. Exemplo: a aplicação de calor em um corpo sólido, como o gelo, fará com que ele absorva o calor aplicado e se transforme em

água. Continuando o aquecimento, a água continuará absorvendo calor e se transformará em vapor, mudando seu estado para gasoso.

Formas de transferência de calor

Como o calor é a energia que pode causar, propagar e intensificar incêndios, conhecer como é transmitido de um corpo ou de uma área para outra é essencial para saber como controlar um incêndio. O controle é o primeiro passo para extingui-lo.

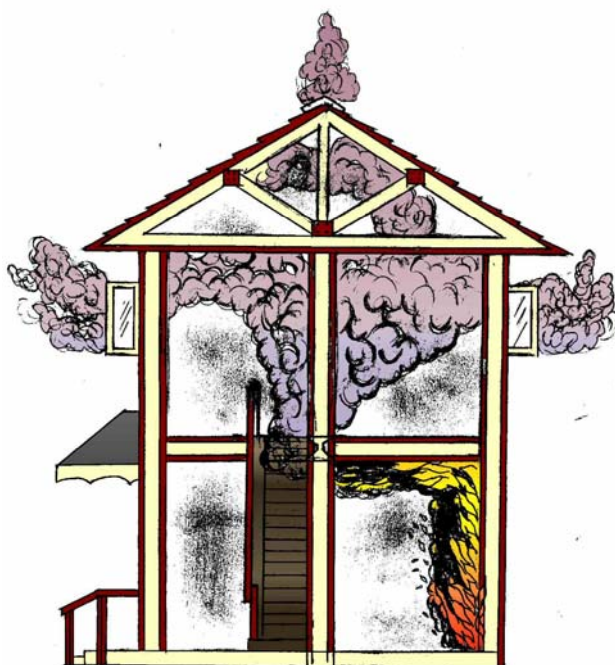
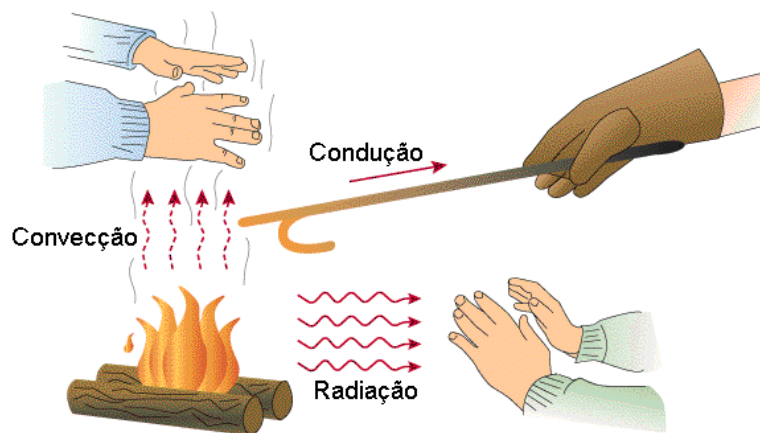


Figura 33 - Um incêndio se propaga e se intensifica pela transferência de calor

A transferência de calor de um corpo para outro ou entre áreas diferentes de um mesmo corpo será influenciada:

1. pelo tipo de material combustível que está sendo aquecido;
2. pela capacidade do material combustível de reter calor; e
3. pela distância da fonte de calor até o material combustível.

Existem três formas básicas de transferência de calor: condução, convecção e radiação.



Fonte: <http://www.physics.brocku.ca/courses/1p93/Heat/>

Figura 34 - Formas de transferência de calor

Apesar de, em um incêndio, ocorrerem muito frequentemente as três formas, geralmente, uma delas predomina sobre as outras em um determinado estágio ou região do incêndio.

3.1. Condução

É a transferência de calor por meio do contato direto entre as moléculas do material, em corpos sólidos. Nesse processo, o calor passa de molécula a molécula, mas nenhuma delas é transportada com o calor.



Neste exemplo, o calor absorvido pela face interna da parede irá fluir para a face externa, por condução.

Figura 35 – Transferência de calor por condução através da parede

Um corpo sólido (como uma barra de metal, por exemplo), sendo aquecido em uma de suas extremidades sofrerá condução. O calor será transportado da extremidade mais quente em direção à extremidade mais fria. Suas moléculas, ao serem aquecidas, agitam-se e chocam-se com as vizinhas, transmitindo calor como uma onda de energia. E assim o movimento continua sucessivamente, até que o corpo atinja o equilíbrio.

É importante frisar que as moléculas do corpo se agitam, porém não saem do lugar em que se encontram, ou seja, não se deslocam. Nesse processo, ocorre a transferência de calor, tanto pela agitação das moléculas quanto pelo movimento dos elétrons livres no metal.

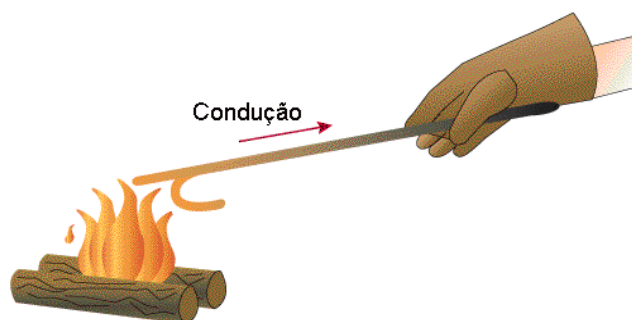


Figura 36 - Transferência de calor por condução

A quantidade de calor se movendo através da barra metálica será diretamente proporcional ao tempo de exposição ao calor, à sua seção transversal e à diferença de temperaturas entre as suas extremidades e inversamente proporcional ao seu comprimento, ou seja, quanto maior a diferença de temperatura entre as extremidades, maior será a transferência de calor.

Em um incêndio, quanto mais intensas forem as chamas, mais calor tende a ser dissipado para os materiais próximos, agravando o sinistro, o que implica afirmar que, quanto mais tempo exposto, mais calor fluirá pela barra. Dessa forma, o tempo resposta em um incêndio é fundamental para um socorro eficiente.

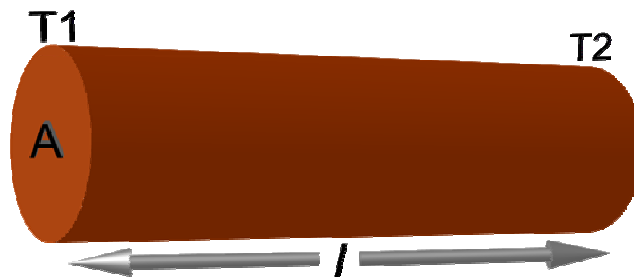


Figura 37 - Condução de calor em um sólido

No início de 1800, Joseph Fourier formulou a lei da condução de calor, que estabelece que o calor fluindo através da matéria pode ser calculado pela expressão:

$$\dot{q} = kA \frac{(T_2 - T_1)}{l}$$

Na qual:

k é a condutividade térmica (pode ser observada na Tabela 9).

A é a área através da qual o calor é transferido.

T_2 e T_1 são as temperaturas nas diferentes faces do corpo (zona quente e zona fria).

l é a espessura (ou o comprimento) do corpo.

Quanto maior a diferença de temperatura entre os corpos (ou áreas) maior será a transferência de calor.

A equação acima estabelece que o fluxo de calor entre duas temperaturas em um sólido também é proporcional a uma característica do sólido, conhecida como condutividade térmica (k). Da mesma forma, quanto maior a área, maior será o calor passando por ela. Caso análogo acontece com o cálculo do fluxo de água passando por um cano.

Condutividade térmica é a característica do material que representa a sua resistência à condução de calor. Devido à sua composição, os materiais conduzem mais ou menos calor quando expostos a uma mesma fonte externa de aquecimento.

Quanto maior o coeficiente de condutividade térmica de um material, mais facilmente este conduzirá calor.

Analisando a Tabela 9, conclui-se que os metais são bons condutores de calor, enquanto o concreto e o plástico são bons isolantes térmicos. Por esse motivo, é considerada de grande importância a

condutividade térmica do material pelo qual o calor será conduzido (transferido). Uma parede feita de tijolos conseguirá reter calor em um ambiente por muito mais tempo que uma parede de metal, comum em um *trailer* ou navio.

O tempo de exposição do material ao calor, como já foi dito, também é determinante para a quantidade de calor a ser transferida. Se este for maior que a capacidade do material de dissipar calor para o ambiente, haverá aquecimento e, conseqüentemente, o incêndio se propagará mais facilmente.

Quanto maior o tempo de exposição dos materiais ao calor, maiores as chances do incêndio se propagar.

Se dois ou mais corpos estão em contato, o calor é conduzido por meio deles como se o conjunto fosse um só corpo, respeitando-se a condutividade de cada material componente.

Materiais que contêm espaços vazios (em forma de bolsas de ar) em sua estrutura, tal como a celulose e a lã mineral, são bons isolantes térmicos, pela dificuldade que o calor enfrenta para atravessar esses espaços, por causa da baixa condutividade térmica do ar.

Com a equação e os valores constantes na Tabela 9, e ainda lembrando que a taxa de fluxo de calor (q'') é a quantidade de calor fluindo sobre uma unidade de área, o cálculo para a taxa de fluxo de calor seguirá a seguinte equação:

$$q'' = \dot{q} / A$$

$$\dot{q} = q'' \cdot A = kA \frac{(T_2 - T_1)}{l}$$

$$q'' = k \frac{(T_2 - T_1)}{l}$$

Logo, é possível então estimar, em um incêndio em um cômodo, qual o fluxo de calor que está passando por uma parede de tijolos de 12 cm de espessura (medida comum em construções), na qual a temperatura em um dos lados da parede é de 22 °C (temperatura ambiente) e do outro é de 330 °C. Essa temperatura é facilmente atingida em um incêndio estrutural.

$$q'' = 0,69(330 - 22) / 0,12$$

$$q'' = 1771 \text{ W} = \mathbf{1,771 \text{ kW/m}^2}$$

Em um outro exemplo, se forem consideradas as mesmas temperaturas e espessura da parede, só que agora sendo esta feita em aço, obter-se-á o seguinte valor:

$$q'' = 45,8(330 - 22) / 0,12$$

$$q'' = 117553,3 \text{ W} = \mathbf{117,553 \text{ kW/m}^2}$$

Como se pode notar, a uma mesma diferença de temperatura e com mesma espessura de parede, a taxa de fluxo de calor por condução na parede de aço será 66 (sessenta e seis) vezes maior que a encontrada na parede de tijolos.

Em casos reais, a transferência de calor se dá em todas as direções, simultaneamente, enquanto nesses exemplos calculou-se o fluxo de calor em uma direção apenas. Camadas de diferentes materiais, suas diferentes formas e o tempo de exposição à fonte de calor são fatores que irão aumentar a complexidade desse processo. Em virtude disso, os cálculos do fluxo de calor em incêndios reais, normalmente, são obtidos pelo emprego de modelos próprios para processamento computacional.

Geralmente, a transferência de calor é instável (regime transiente) e leva algum tempo para o calor penetrar através da parede. Uma estimativa empírica de quanto tempo levará para a outra face do corpo sofrer aumento de temperatura pode ser dada pela expressão:

$$t = l^2 / 16 \alpha$$

Na qual:

t é o tempo de penetração térmica (dado em segundos).

l é a espessura da parede (dada em metros).

α é o coeficiente de difusividade térmica.

Isso significa que a onda de calor levará o tempo calculado pela fórmula acima para penetrar e atravessar a parede.

Nas mesmas condições do exemplo anterior, com uma parede de 12 cm, é possível obter para os diferentes materiais:

Parede de tijolo:

$$\text{Tempo} = (0,12)^2 / 16 \times 5,2 \times 10^{-7}$$

$$\text{Tempo} = 1730 \text{ s} \cong \mathbf{28 \text{ minutos}}$$

Parede de aço:

$$\text{Tempo} = (0,12)^2 / 16 \times 1,26 \times 10^{-5}$$

$$\text{Tempo} = 71 \text{ s} \cong \mathbf{1 \text{ minuto}}$$

Note-se que o tempo que o fluxo de calor leva para atravessar uma parede de tijolos é 28 (vinte e oito) vezes maior que o tempo de atravessar uma parede de aço, igualando a sua temperatura.

Tomando-se, novamente, o exemplo da parede de tijolos. Se for calculado o tempo de penetração do calor em três espessuras diferentes, sendo uma com 10 cm, outra com 20 cm e a última com 30 cm de espessura, obtém-se os valores abaixo:

- Tempo da parede com 10 cm = 1.201 s = 20 minutos
- Tempo da parede com 20 cm = 4.800 s = 80 minutos
- Tempo da parede com 30 cm = 10.817 s = 180 minutos

Por esse motivo, os cálculos para dimensionamento de paredes e portas corta-fogo são importantes para os estudos dos sistemas de engenharia contra incêndio e pânico, quando o assunto é resistência ao calor proveniente do incêndio, como forma de se evitar sua propagação.

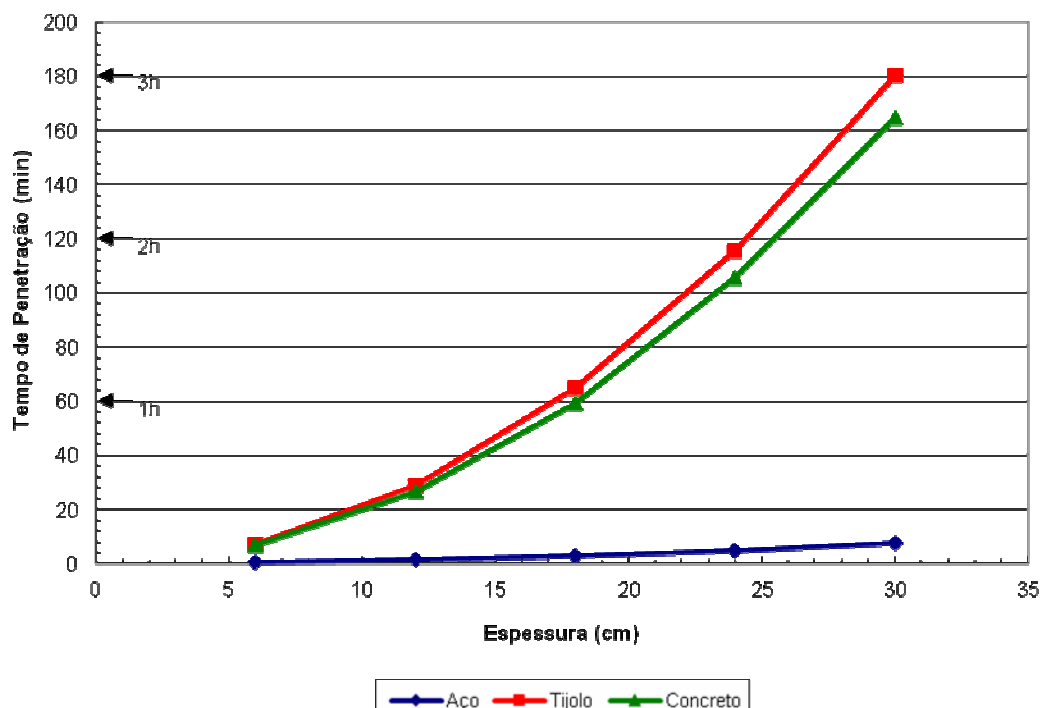


Figura 38 - Tempo de penetração do calor em função da espessura de paredes feitas de tijolo, concreto e aço

Observa-se, conforme o gráfico presente na Figura 38 que o concreto e o tijolo possuem comportamentos semelhantes no que diz respeito ao tempo de penetração do calor, ao contrário do aço, capaz de transferir a mesma quantidade de calor em questão de minutos.

3.2. Convecção

Em um fluido em movimento, a transferência de seu calor até uma superfície sólida ou para outro fluido é chamada de convecção. Um fluido é qualquer material que possa escoar. Trata-se sempre de um líquido ou de um gás (ar, fumaça, gás combustível, etc.).

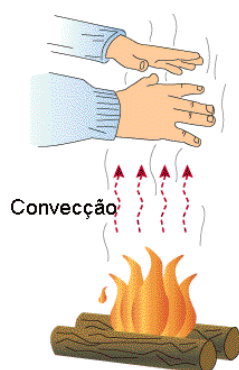


Figura 39 - Transferência de calor por convecção

A convecção é a forma de transferência de calor que ocorre em fluidos – meio líquido ou gasoso.

Nesse tipo de transferência, o calor flui pelo contato direto entre as moléculas do fluido. A convecção envolve três processos distintos: a condução de calor, a diferença de densidade e a mudança de fase (estado físico).

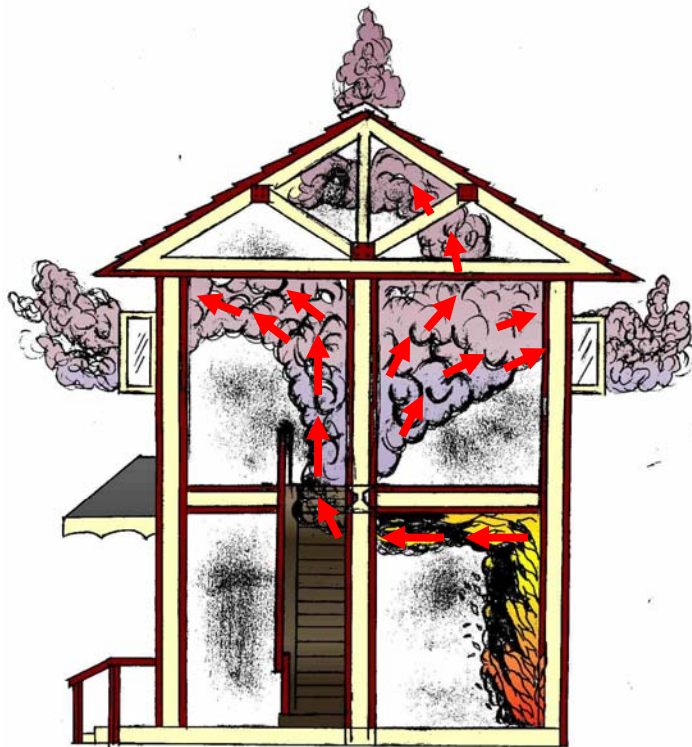


Figura 40 - Transferência de calor pela convecção da fumaça

Na Figura 40, é mostrado que a fumaça transfere calor da base do fogo para a parte mais alta da edificação (teto e pavimentos superiores) sem que tenha havido contato direto com as chamas.

Quando o fluido é aquecido, sua agitação molecular aumenta, elevando o número de colisões entre as moléculas. Com isso, as moléculas mais externas são empurradas para fora e alcançam o espaço ao redor, expandindo-se. Nesse processo de expansão, o fluido se torna menos denso e, portanto, mais leve que o ar, fazendo com que ele suba, atingindo as áreas mais altas.

Na convecção, as moléculas aquecidas se chocam umas com as outras, tornando o fluido menos denso (portanto, mais leve) e sobem, distribuindo o calor pelo ambiente. Esse é o movimento natural da fumaça, normalmente presente nos incêndios.

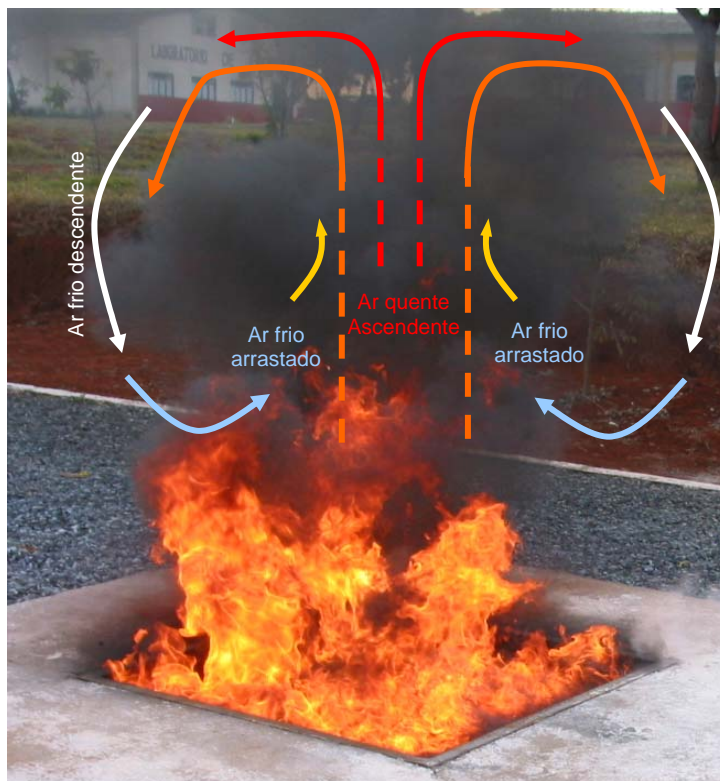


Figura 41 - Convecção da fumaça

Por isso o ar aquecido sobe, enquanto o ar frio desce. A separação entre os dois meios chama-se **balanço térmico**. Quanto mais aquecido o ar, mais rápida e violenta será a ascensão da fumaça e dos gases quentes. Em um ambiente aberto, o ar aquecido continuará subindo até atingir o equilíbrio com a atmosfera.



Fonte: 7/18/02 Thursday from Wild Basin. Photo by Bob McDonald – estes.on-line.com/cam/BigElkFire/default.asp

Figura 42 - Comportamento da fumaça em ambiente aberto

A tendência natural da fumaça de um incêndio é subir!

Em ambientes fechados, os gases aquecidos ficam dispostos em camadas de temperatura crescente do piso ao teto. Próximo ao piso, toda a área horizontal apresenta temperatura semelhante, que é muito inferior à temperatura próximo ao teto.

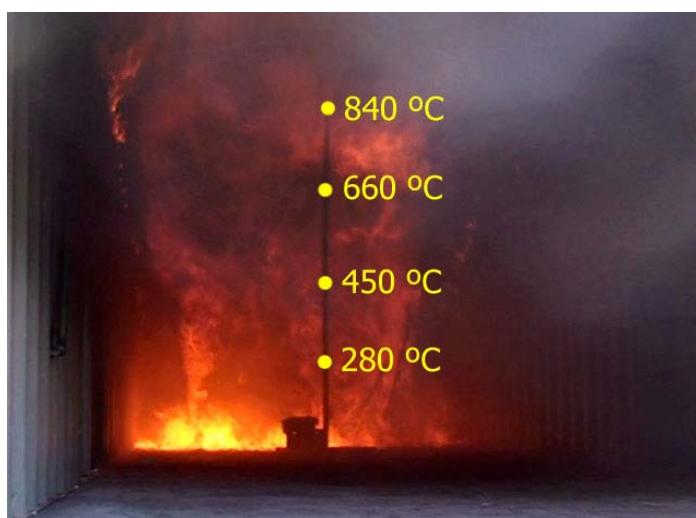


Figura 43 – Temperatura na camada de fumaça a 4 metros de distância do foco (0,5m, 1,0m, 1,5m e 2,0m de altura)

Quando se aplica água na proporção adequada ao incêndio, o calor é absorvido e forma-se vapor, o qual sobe por efeito da convecção, e a temperatura do ambiente cai, mantendo-se o balanço térmico. Essa situação propicia mais conforto para o bombeiro e um rescaldo mais fácil e rápido.

Quando se usa água além da necessária, forma-se vapor excessivo, que não consegue subir e acumula-se no ambiente. A visibilidade diminui, e a temperatura aumenta próximo ao piso, dificultando o trabalho dos bombeiros e o rescaldo. Se isso ocorrer (temperatura mais alta em baixo), a extinção dos focos restantes será dificultada, o que contraria o senso comum.

A aplicação de muita água atrasa a extinção do incêndio.

Nas situações em que o movimento do fluido é induzido por um ventilador ou outro dispositivo qualquer, se dá uma convecção forçada. Nesse caso, o percurso do fluido aquecido será afetado e poderá transmitir calor para materiais que se encontrem na rota de escape da fumaça. O uso de ventiladores e outros dispositivos de ventilação tática devem ser adotados com cuidado e são assuntos presentes no Módulo 3 deste manual.

O movimento ascendente do fluido aquecido (nos processos de convecção natural ou forçada) torna-se particularmente perigoso em incêndios em edificações que possuam mais de um pavimento, com a presença de corredores verticais contínuos (fossos de elevadores ou tubulações).

Perigo semelhante ocorre com as escadas, por permitirem que a fumaça suba de um pavimento para o outro. Uma forma simples de

lembrar do perigo das escadas para a convecção é: se uma pessoa consegue acessar o pavimento superior por uma escada, a fumaça também pode e, certamente, o fará.

Esse processo pode ocasionar a propagação de incêndio em pavimentos descontínuos, aparentemente sem relação com o foco de incêndio original, pela movimentação da fumaça dentro do ambiente.

Como a fumaça é um bom meio de propagação do calor por convecção e estará presente nos incêndios, é necessário que os bombeiros envidem esforços no sentido de não permitir que a massa aquecida atinja outras superfícies ou ambientes preservados durante a ação de combate a incêndio.

Logo eles não devem permitir que sua atenção esteja voltada somente para a ação das chamas, uma vez que, freqüentemente, os danos causados pela convecção – ação do calor e da fuligem – são muito maiores que os danos causados pela ação direta das chamas.

Em uma situação típica de convecção natural, há o exemplo da corrente de ar quente sobre uma superfície de água congelada. A transferência de calor por condução nessa superfície depende da diferença de temperatura, ΔT , próxima a ela. Pela lei da condução, a transferência de calor, proveniente do ar sobre a superfície gelada, é dada pela equação:

$$\dot{q} = kA \frac{(T_2 - T_1)}{l}$$

Na qual l é a distância entre as temperaturas correspondentes a $\Delta T = (T_2 - T_1)$.

O fluxo de calor, até um anteparo sobre a superfície congelada, é dado por:

$$q'' = \dot{q}/A = k \Delta T/l$$

Tendo em vista que a corrente de ar encontra-se em movimento e não possui dimensões definidas como os materiais sólidos, a expressão de Fourier não permite que seja calculada a quantidade de calor transferida em função do contato entre dois fluidos ou entre um fluido e um sólido.

Portanto, a avaliação de como se dá a transferência de calor entre esses dois meios depende de dois processos básicos que estão presentes: as características do movimento do ar em torno da superfície de água gelada e como o calor é transportado pelo fluxo de ar. A solução analítica para esse problema, ainda que considerada apenas uma direção, é de razoável complexidade.

De maneira sucinta, será apresentado neste manual somente o parâmetro que reúne esses efeitos, o coeficiente de transferência de calor convectivo, representado por h . Daqui por diante, a equação que determina o fluxo de calor por convecção em uma superfície é dada por:

$$q'' = h(T_2 - T_1)$$

Como no caso da condução, as soluções de problemas reais de convecção são obtidas com o emprego de processamento computacional de métodos numéricos específicos. Para os objetivos deste trabalho, são apresentadas soluções empíricas para situações típicas presentes nos incêndios. A tabela a seguir mostra o coeficiente de transferência de calor convectivo em algumas condições ambientais:

Tabela 10 - Coeficiente de transferência de calor convectivo em algumas condições ambientais

| Condição do fluido | h (W/m ² °C) |
|--|---------------------------|
| Fluxo normal de ar para cima | 5-10 |
| Chama de um fósforo | -30 |
| Chama superficial turbulenta de líquido inflamável | -20 |
| Chama afetando o teto | 5-50 |
| Vento com velocidade de 2 m/s | -10 |
| Vento com velocidade de 35 m/s | -75 |

Fonte: Principles of Fire Behavior, J. G. Quintiere

Convecção é a transferência de calor nos fluidos, pelo movimento de massa de um meio líquido ou gasoso, causada pela diferença de densidade entre moléculas quentes e frias, fazendo com que as partículas aquecidas subam e as frias desçam.

É importante não confundir a convecção com a Lei de Fick, falada anteriormente na chama difusa. Enquanto esta trata da difusão dos gases (combustível e comburente), saindo de uma zona de alta para uma zona de baixa concentração; na convecção há apenas diferença de densidade, com a ocorrência de deslocamento ascendente de fluido aquecido, o que não ocorre com a difusão.

O fluxo de calor convectivo será maior em ambientes confinados (em compartimentos como cômodos ou interior de veículos), devido ao **empuxo** e à delimitação de espaço feita por teto e paredes laterais, que faz com que a fumaça se acumule.

Empuxo é a força que atua para cima, em qualquer corpo que esteja total ou parcialmente imerso em um fluido. Essa força será igual ao peso do fluido que foi deslocado pelo corpo (Princípio de Arquimedes).

Pelos dois aspectos acima citados, a parte mais alta do cômodo estará a uma temperatura bem mais alta do que próximo ao solo, influenciando, sobremaneira, o comportamento dos bombeiros durante o combate a incêndio quanto à:

- necessidade do uso completo e correto do equipamento de proteção individual;
- necessidade de escoamento da fumaça acumulada no ambiente;
- entrada e trabalho agachado ou ajoelhado;
- utilização do jato apropriado na fumaça a fim de que a temperatura do ambiente seja estabilizada dentro da técnica adequada antes de alcançar o foco do incêndio. Tal procedimento encontra-se presente no Módulo 3 deste manual.

Uma das características do fluido é a tendência a ocupar todo espaço disponível. Por isso, cuidado para onde a fumaça está indo em um incêndio!

3.3. Radiação térmica

É a transferência de calor por meio de ondas eletromagnéticas, que se deslocam em todas as direções, em linha reta e à velocidade da luz, a partir da chama. Essas ondas podem ser refletidas ou absorvidas por uma superfície, abrangendo desde os raios ultravioletas até os infravermelhos.



Figura 44 - Transferência de calor por radiação térmica

A radiação é a única forma de transferência de calor que não depende de meio material para se propagar e pode aquecer até mesmo os objetos mais distantes em um ambiente. Um exemplo clássico é o sol, que aquece a terra apesar da distância entre os dois.

A radiação é a forma de transferência de calor por meio de ondas eletromagnéticas.

Todos os corpos que se encontram a uma temperatura superior ao zero absoluto emitem radiação, normalmente, em pequena quantidade. A expressão que determina a intensidade de calor por radiação emitida por um corpo, a equação de Stefan-Boltzmann, é dada por:

$$\dot{q} = \sigma \varepsilon (T)^4$$

Na qual o σ é a constante de Stefan-Boltzmann, de valor fixo ($6,7 \times 10^{-12} \text{ W/K}^4$) e ε a emissividade, característica de cada tipo de material, que varia de 0 a 1. Portanto, em virtude da baixa ordem de grandeza da constante, apenas em temperaturas elevadas, um objeto pode irradiar uma quantidade significativa de calor.

Em um incêndio, o calor será irradiado em todas as direções. O material que estiver em seu caminho irá absorver o calor fornecido pelas

ondas e terá sua temperatura elevada, o que poderá causar a pirólise, ou, até mesmo, fazer com que atinja seu ponto de ignição.

Para que se manifestem os efeitos da radiação térmica, é necessário que:

- a fonte de calor esteja com temperatura elevada o suficiente para produzir um fluxo de calor significativo;
- os materiais ainda não atingidos sejam capazes de absorver calor; e
- os materiais retenham o calor, sem dissipá-lo (nas mesmas proporções) para o ambiente.

A intensidade da propagação do calor por radiação irá aumentar ou diminuir à medida que os materiais estejam mais próximos ou mais distantes da fonte de calor, respectivamente. Portanto, a regra prática em um combate a incêndio é: quanto maior a distância entre a fonte de calor e os outros materiais, menor será a transferência de calor por radiação.

O afastamento ou retirada dos materiais combustíveis de um ambiente incendiado pode representar uma importante ação no combate a incêndios.

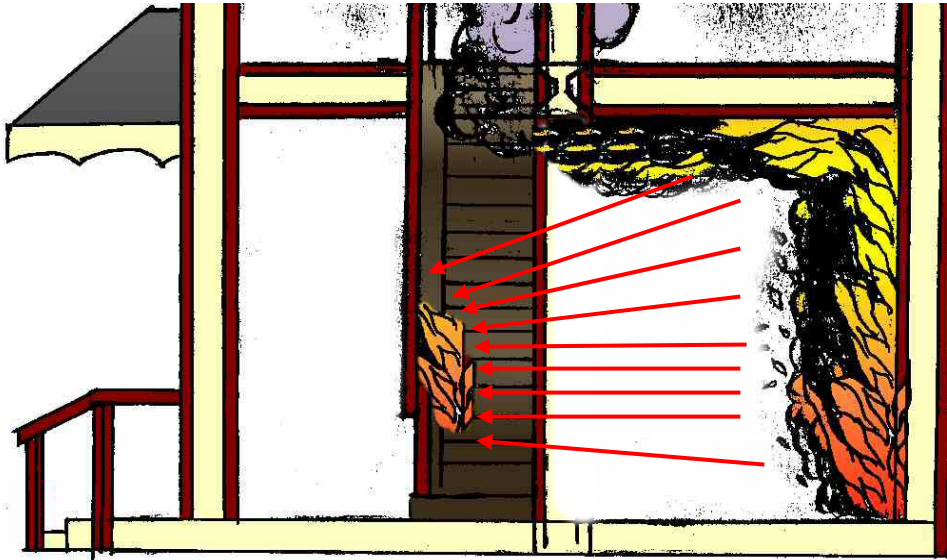


Figura 45 - Transferência de calor por radiação para um ponto distante do foco

A Figura 45 mostra a ação das ondas eletromagnéticas, a partir das chamas, em direção à escada.

Em um incêndio, a fumaça transfere calor por convecção e radiação. Se o incêndio ocorre em um cômodo, o calor da fumaça e dos gases acaba sendo limitado pela presença das paredes e do teto. A seguir, o calor do teto é irradiado para baixo, fazendo com que a mobília sofra pirólise e atinja seu ponto de ignição, inflamando os materiais de uma forma generalizada (*flashover*).

4. Processos de extinção do fogo

4.1. Processos de extinção do fogo

Como visto anteriormente, a combustão se processa por meio do triângulo ou tetraedro do fogo. Conseqüentemente, os métodos ou processos de extinção de incêndio são baseados na retirada de um ou mais elementos que o compõe. Se um dos lados da figura for quebrado, a combustão será interrompida e o incêndio poderá ser extinto.

Retirando-se um ou mais elementos do fogo, o incêndio extinguir-se-á.

Baseado nesses princípios, processos ou métodos foram desenvolvidos, ao longo dos anos, para a extinção de incêndios, sendo eles:

- a retirada ou controle de material;
- o resfriamento;
- o abafamento; e
- a quebra da reação em cadeia.

4.1.1 Retirada de material

A retirada ou controle de material é o processo conhecido como isolamento das chamas ou como proteção dos bens (também conhecido como salvatagem).

O método consiste em promover ações de retirada ou de controle do material combustível ainda não atingido pela combustão.

Esse método pode envolver desde ações simples e rápidas por parte dos bombeiros, como a retirada de botijão de gás liquefeito de

petróleo (GLP) de dentro de um ambiente sinistrado, até medidas mais complexas, como a drenagem do líquido combustível de um reservatório em chamas, que necessita de equipamentos e cuidados especiais.

Em todos os casos, a retirada de material é um método que exige bastante cuidado, pois implica na atuação próxima ao combustível ainda preservado pelo incêndio, que pode vir a ignir se houver aproximação de uma fonte de calor apropriada. Se isso ocorrer enquanto o bombeiro estiver próximo ou em contato direto com o material combustível, ficará exposto a um risco considerável. Por isso, toda ação de retirada de material, por mais simples que pareça ser, deve ser feita com o equipamento de proteção individual (EPI) completo.

Exemplos de retirada de material:

- remover a mobília ainda não atingida do ambiente em chamas;
- afastar a mobília da parede aquecida para que não venha a ignir os materiais próximos – isso é válido, principalmente, em edificações geminadas (que compartilham uma mesma parede);
- fazer um aceiro (área de segurança feita para evitar a propagação de um incêndio) em redor da área atingida pelas chamas; e
- retirar o botijão de GLP de dentro do ambiente sinistrado.

Exemplos de controle de material:

- fechar portas de cômodos ainda não atingidos pelas chamas;
- deixar fechadas as janelas do pavimento superior ao incêndio – isso impedirá ou dificultará o contato entre o

material combustível destes pavimentos com a fonte de calor proveniente da fumaça; e

- fechar o registro da central de GLP da edificação.

Com o processo de retirada de material, o incêndio será controlado pela falta de combustível disponível para a queima.

Existem casos em que não é possível realizar a retirada de material, geralmente, em virtude do peso ou dimensões elevadas do bem, do risco de agravamento das condições do incêndio com a retirada do material ou da insuficiência de pessoal para cumprir a missão com rapidez e eficiência. Para se resolver tal problema, existe o método denominado salvatagem, assunto que será abordado no Módulo 3.

A guarnição de combate a incêndio deve atentar que é importantíssimo não confundir a retirada de material com o rescaldo. Enquanto a retirada de material é um processo de extinção do incêndio que preserva os combustíveis ainda não atingidos pelas chamas, o rescaldo é uma fase do combate ao incêndio (assunto a ser abordado no Módulo 4 deste manual) que ocorre quando as chamas já foram debeladas, a fim de assegurar que não haverá reignição dos materiais.

Nessa fase, deve ser dispensado um grande cuidado por parte de todas as guarnições de bombeiros com a preservação da cena do sinistro, movendo o mínimo possível de materiais, comburidos ou não, do ambiente incendiado para auxiliar nos trabalhos de perícia de incêndio.

4.1.2 Resfriamento

Consiste no combate ao incêndio por meio da retirada do calor envolvido no processo de combustão. É o método mais utilizado pelos bombeiros, que usam agentes extintores para reduzir a temperatura do incêndio a limites abaixo do ponto de ignição dos materiais combustíveis existentes.



Figura 46 - Resfriamento utilizando água

Apesar de ser feita, na maioria das vezes, com uso de água, uma ação de ventilação tática também constitui uma ação de resfriamento. Isso porque, ao escoar a fumaça do local sinistrado, se remove também calor do ambiente.



Figura 47 - Resfriamento utilizando ventilação

Em todos os casos, ao retirar calor do ambiente sinistrado, evita-se que os outros materiais combustíveis atinjam seu ponto de ignição, restringindo as chamas somente ao combustível já afetado.

O resfriamento extingue o fogo ao retirar calor do ambiente sinistrado, interrompendo a combustão.

4.1.3 Abafamento

É o método que atua na diminuição do oxigênio na reação até uma concentração que não permita mais combustão. Esse processo também inclui ações que isolam o combustível do comburente, evitando que o oxigênio presente no ar reaja com os gases produzidos pelo material combustível.

Em regra geral, quanto menor o tamanho do foco do incêndio, mais fácil será utilizar o abafamento.

Exemplo de ações de abafamento:

- tampar uma panela em chamas;
- lançar cobertor sobre um material incendiado;
- cobrir com espuma determinado líquido em chamas, formando uma espécie de manta;
- “bater” nas chamas com um abafador.

O abafamento diminui ou isola o oxigênio na reação.

4.1.4 Quebra da reação em cadeia

É o processo que se vale da introdução de substâncias inibidoras da capacidade reativa do comburente com o combustível, impedindo a formação de novos íons (radicais livres produzidos pela combustão).

Nesse método, substâncias químicas (como o *Halon*), especialmente projetadas para tal, irão reagir com os íons liberados pela reação em cadeia, impedindo-os de continuar a quebra das moléculas do combustível.

4.2. Principais agentes extintores

Os agentes extintores são substâncias encontradas na natureza ou criadas pelo homem, com a finalidade de extinguir um incêndio conforme o aproveitamento de propriedades físicas ou químicas, visando sempre a retirada de um dos elementos que compõem o fogo.

Os agentes extintores são produtos que, para serem comercializados no Brasil, precisam de aprovação do Sistema Brasileiro de Certificação, cujo órgão principal é o Instituto Nacional de Metrologia e Qualidade Industrial (INMETRO).

Os requisitos técnicos mínimos exigidos para os agentes extintores, bem como para os aparelhos extintores, encontram-se nas Normas Brasileiras (NBR) aprovadas pela Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT).

Os agentes extintores certificados no Brasil e que serão abordados neste manual são:

- água - NBR 11.715;
- espuma mecânica - NBR 11.751;

- pós para extinção de incêndio - NBR 10.721; e
- gás carbônico - NBR 11.716.

As normas citadas acima referem-se apenas ao emprego desses agentes em aparelhos extintores de incêndio.

4.2.1 Água

A água, na sua forma líquida, é o agente extintor mais utilizado nos combates a incêndios e, durante muito tempo, foi o único recurso utilizado na extinção dos incêndios. Sua grande utilização se deve à sua disponibilidade na natureza e às suas propriedades físicas e químicas.

A grande eficiência da água no combate ao fogo é decorrente basicamente de duas propriedades:

- a mudança de estado físico de líquido para vapor a 100 °C – a passagem da água para estado de vapor reduz a concentração do comburente (oxigênio) no fogo; e

A passagem da água para o estado de vapor reduz a concentração de oxigênio no ambiente e remove o calor da combustão, atuando eficientemente por abafamento e resfriamento.

- o alto calor latente de vaporização – a constante física que define a mudança de estado (de líquido para vapor) é capaz de absorver o calor da combustão a uma taxa de aproximadamente 40 kJ/mol, cujo valor é bastante alto se comparado com os demais líquidos. Isso quer dizer que, para cada mol de molécula de água, consegue-se absorver 40 kJ de calor da combustão.

Apesar de a capacidade da água tornar insustentável a combustão pela retirada de calor da reação, é importante lembrar que, ao sofrer esse processo, ela se transforma em vapor, no qual cada litro de água se transforma em 1.700 (mil e setecentos) litros de vapor.

Cada litro de água, no estado líquido, transforma-se em 1.700 litros de vapor!

Se for adotado o método de ataque indireto (técnica de combate a ser abordada no Módulo 3 deste manual), o vapor d'água será essencial para a extinção do incêndio por abafamento. Se, entretanto, houver presença humana no ambiente, seja de bombeiros ou de vítimas, as condições de sobrevivência serão agravadas, aumentando o risco de queimaduras e desconforto extremo. Exceto nesse método, é necessário que as ações de combate evitem uma grande produção de vapor no ambiente.

Tão importante quanto conhecer as propriedades da água é saber utilizá-la de forma racional no combate aos incêndios. O seu excesso causa tanta ou maior destruição que as chamas, a fumaça e o calor.

A água utilizada em um combate a incêndio que não se transforma em vapor é desperdiçada, acumulando-se no ambiente e causando mais danos que benefícios.

A água desperdiçada em um combate a incêndio costuma:

- danificar mobília, equipamentos e outros ambientes que não tinham sido afetados pelo calor ou pelas chamas, aumentando o dano patrimonial;

- necessitar de ações de esgotamento posteriores ou durante o combate a incêndio; e
- acumular-se em um ambiente de forma que possa causar uma sobrecarga estrutural da edificação (por causa da pressão da coluna d'água sobre o piso e as paredes) ou acidentes (encobrindo buracos e outros riscos para os bombeiros ao adentrarem no ambiente).

A água apresenta algumas desvantagens no combate a incêndio decorrentes de suas propriedades físicas. São elas:

- alta tensão superficial - dificulta o recobrimento da superfície em chamas e prejudica a penetração no material em combustão;
- baixa viscosidade – provoca o escoamento rápido (a água permanece pouco tempo sobre a superfície do material); e
- densidade relativamente alta - prejudica o combate em líquidos inflamáveis de densidade menor que a da água, fazendo com que ela não permaneça sobre a superfície do líquido em chamas.

A água utilizada em incêndios conduz eletricidade por possuir sais minerais em sua composição, o que a torna inadequada para incêndios envolvendo equipamentos energizados por causa do risco de choque elétrico. A água também não é indicada para debelar incêndios classe D, uma vez que o oxigênio presente em sua composição promove violenta reação exotérmica (liberação de calor) ao entrar em contato com metais pirofóricos.

Saber qual a quantidade de água necessária para realizar a extinção de um determinado incêndio é um dado de interesse de todo

comandante de socorro. Diante disso, vários estudos e ensaios são realizados com o objetivo de se obter um valor que possa ser aplicado às infinitas possibilidades de incêndio.

Primeiramente, os estudos tentam descobrir a quantidade de calor liberado de um incêndio em determinado experimento, seja em pequena ou grande escala, por meio de um equipamento chamado calorímetro. A Tabela 3 mostra o calor liberado por diferentes objetos e valores obtidos por meio de ensaios com essa metodologia.

Nessa estimativa, não está se tratando da capacidade extintora da água. O exemplo é baseado em uma estimativa teórica, ao relacionar a quantidade de calor que pode ser absorvida com a utilização de 1000 litros de água em um determinado ambiente. Isso porque a eficiência da utilização da água dependerá de diversos fatores, tais como: tipo de jato, tamanho da gota, compartimentação do ambiente, ventilação, dentre outros. A capacidade extintora dos agentes será abordada mais adiante.

Sabe-se que a massa molar de uma substância é a grandeza que relaciona a massa de uma molécula com a quantidade de matéria (dada em mols). No caso da água, cada mol vale 18 gramas. Como dito anteriormente, o calor latente de vaporização da água vale 40 kJ para cada mol, o que significa que são necessários 18 gramas de água para absorver 40 kJ de calor liberado na combustão (40 kJ/18 gramas), considerando que toda água utilizada no combate será convertida em vapor.

O cálculo será feito para cada 1.000 litros de água. Esse valor equivale a 1.000 kg, já que a densidade da água a 25 °C é praticamente 1,0 g/ml. Sabe-se que a quantidade de calor latente de vaporização da água (Q_L) é obtida pela seguinte fórmula:

$$Q_L = m.L$$

Sendo o calor latente de vaporização da água (L) de 40kJ/mol, ou seja, 40.000 J por 18 gramas de água, e que a referida massa de água (m) é 1000 kg, tem-se que:

$$Q_L = 1.000 . (40.000/0,018)$$
$$Q_L = 2 222,2 \times 10^3 \text{ kJ ou } Q_L = 2 222 \text{ MJ}$$

Entretanto, é necessário considerar a quantidade de energia (ou calor) necessária para transformar essa água em vapor. Como a temperatura antes do incêndio era de 25°C, e como a água se transforma em vapor a uma temperatura de 100 °C:

$$q = m.c. (T_{\text{final}} - T_{\text{inicial}}),$$

Na qual q é a quantidade de calor, m a massa, c é o calor específico e T a temperatura.

Para o caso da água c vale 4,18 kJ/kg°C.

$$q = 1.000 . 4,218 . (100 - 25)$$
$$q = 316,3 \times 10^3 \text{ kJ ou } q = 316 \text{ MJ}$$

Portanto, a quantidade de calor absorvida (Q_T) nesse processo será:

$$Q_T = 2222 - 316 = 1906 \text{ MJ}$$

Assim, nas condições acima, 1.000 litros de água conseguem absorver 1906 MJ.

Para estabelecer uma relação desse valor com o calor liberado em um ambiente, será adotado como padrão o calor liberado por 1 kg de madeira, que é de 18,6 MJ. Logo, 1906 MJ correspondem ao calor liberado por 102 kg de madeira.

Enfim, se fosse possível utilizar 1.000 litros de água com 100% de sua eficiência (condição ideal), o combate seria capaz de absorver uma quantidade de calor liberada por uma queima total de aproximadamente 100 kg de madeira.

4.2.2 Pó para extinção de incêndio

Durante muito tempo, o pó utilizado no combate a incêndio era conhecido como pó químico seco, porém, desde o início da década de 90, passou a ser chamado de pó para extinção de incêndio.

De acordo com a NFPA, esse material é definido como um pó composto de partículas muito pequenas, normalmente de bicarbonato de sódio ou potássio, para aparelhos extintores destinados a combater incêndios em combustíveis sólidos e líquidos (ou gases) inflamáveis, e de fosfatomonoamônico para extintores ditos polivalentes, ou seja, para incêndios em sólidos, líquidos (ou gases) e equipamentos elétricos energizados.

Em todos os tipos, são utilizadas substâncias que evitam o “empedramento” e a absorção de umidade, proporcionando a fluidez adequada ao pó.

O pó, quando aplicado diretamente sobre a chama, promove a extinção quase de uma só vez pelas seguintes propriedades extintoras:

- abafamento – a decomposição térmica do pó no fogo promove a liberação do dióxido de carbono e de vapor d'água, que isolam o comburente da reação;
- resfriamento – o pó absorve calor liberado durante a combustão;
- proteção contra a radiação das chamas – o pó produz uma nuvem sobre as chamas, protegendo o combustível do calor irradiado;
- quebra da reação em cadeia – estudos sugerem que a quebra da reação em cadeia na chama é a principal propriedade extintora do pó, o qual interfere, por meio de suas partículas, na concentração de radicais livres (íons provenientes da reação em cadeia) presentes na combustão, diminuindo seu poder de reação com o comburente e, conseqüentemente, extinguindo as chamas.

4.2.3 Espuma

A espuma surgiu da necessidade de encontrar um agente extintor que suprisse as desvantagens encontradas quando da utilização da água na extinção dos incêndios, principalmente naqueles envolvendo líquidos derivados de petróleo.

A solução encontrada foi o emprego de agentes tensoativos na água, a fim de melhorar sua propriedade extintora. Os agentes tensoativos são aditivos empregados para diminuir a tensão superficial da água, melhorando a propriedade de espalhamento sobre a superfície em chamas e a penetração no material.

As espumas líquidas se assemelham a bolhas. São sistemas constituídos por uma fase contínua líquida (na superfície) e uma

dispersão gasosa (no interior), apresentando uma estrutura formada pelo agrupamento de várias células (bolhas) originadas a partir da introdução de agentes tensoativos e ar na água.

Entretanto, cabe ressaltar que uma bolha possui alta área superficial e conseqüentemente, alta energia de superfície, o que a torna termodinamicamente instável. Em outras palavras, quanto maior for uma bolha, menor será a sua estabilidade térmica e também mecânica.

As espumas apresentam densidade muito menor que da água. Assim as espumas espalham-se sobre a superfície do material em combustão, isolando-o do contato com o oxigênio atmosférico. Essa é uma das razões que a torna mais eficiente do que a água no combate a incêndios que envolvem líquidos inflamáveis.

As espumas mecânicas utilizadas em combate a incêndio são formadas a partir da dosagem do agente surfactante (tensoativo), ou líquido gerador de espuma na água, no qual, por um processo mecânico, o ar é introduzido na mistura.

A espuma mais eficiente para a extinção de incêndios em líquidos inflamáveis é à base de um concentrado conhecido como AFFF (*aqueous film-forming foam* – espuma formadora de filme aquoso), que forma uma película sobre a superfície em chamas. O processo de extinção da espuma gerada a partir de concentrados de AFFF consiste em isolar o combustível líquido em chamas do oxigênio do ar, evitando, assim, a liberação de vapores inflamáveis.



Figura 48 - Espuma AFFF

Cabe ressaltar, por fim, que o concentrado AFFF é eficiente no combate a incêndios de hidrocarbonetos derivados de petróleo, tais como gasolina e diesel. Porém, em combustíveis polares, como o álcool, o concentrado AFFF deve ter, em sua composição, a presença de uma substância denominada de polissacarídeo, a qual evitará o ataque do álcool à espuma.

Comercialmente, as espumas são geradas a partir de soluções aquosas de 1 a 6 por cento do concentrado (volume do concentrado em relação ao volume da solução desejada). O operador da viatura deverá seguir as orientações fornecidas pelo fabricante do líquido gerador de espuma.

Para exemplificar, ao preparar uma solução a partir de um concentrado 6% de AFFF, o operador deverá introduzir 60 ml do concentrado em um recipiente e acrescentar água até completar o volume de 1000 ml (1 litro).

Semelhantemente à água, a espuma também não é indicada para incêndios em equipamentos energizados e em metais combustíveis.

4.2.4 Gás carbônico

O dióxido de carbono (CO_2), também conhecido como anidrido carbônico ou gás carbônico, é um gás inerte, sendo um agente

extintor de grande utilização que atua principalmente por abafamento, por promover a retirada ou a diluição do oxigênio presente na combustão e por resfriamento.

É um gás sem cheiro, sem cor e não conduz eletricidade, sendo recomendado na extinção de incêndios em líquidos ou gases inflamáveis e equipamentos elétricos energizados. Apesar de agir eficientemente por abafamento, não é recomendado para incêndios em combustíveis sólidos, por causa da dificuldade de penetração no combustível e pelo baixo poder de resfriamento, comparando-se com o da água.

Possui a grande vantagem de não deixar resíduo, o que o torna adequado para ambientes com equipamentos ou maquinários sensíveis à umidade, como centros de processamento de dados e computadores.

Por outro lado, a partir de uma concentração de 9% por volume, o gás carbônico causa inconsciência e até a morte por asfixia, o que restringe o seu uso em ambientes fechados ou com a presença humana.

O gás carbônico é uma vez e meio mais pesado que o ar.

Um quilo de gás carbônico liquefeito produz 500 litros de gás.

Incêndios envolvendo agentes oxidantes, como o nitrato de celulose ou o permanganato de potássio, que contêm oxigênio em sua estrutura, não podem ser extintos por gás carbônico, tendo em vista possuírem seu próprio suprimento de comburente.

Metais de elementos químicos como sódio, potássio, magnésio, titânio, zircônio e os hidretos metálicos têm a característica de decompor o gás carbônico, sendo ineficaz a sua utilização nesses casos. Esses elementos são chamados de materiais combustíveis, tratados especificamente nos casos de incêndios classe D mais adiante.

O gás carbônico pode ser encontrado em aparelhos extintores portáteis ou em sistemas fixos (baterias).

4.3. Classes de incêndio

Apesar de ocorrerem as mesmas reações químicas (inclusive a reação em cadeia) na combustão dos diferentes materiais, os incêndios são classificados conforme o tipo de material combustível neles predominante. Conhecer as classes de incêndio auxilia tanto o trabalho dos bombeiros na adoção da melhor técnica de combate, combinada com o agente extintor mais adequado, quanto a primeira resposta por parte da população, quanto ao uso dos aparelhos extintores nos princípios de incêndio.

Os materiais combustíveis são classificados como:

- sólidos comuns;
- líquidos ou gases inflamáveis;
- equipamentos elétricos energizados; e
- metais combustíveis.

Saber o quê está queimando sempre será essencial para a escolha da melhor técnica e do agente extintor mais adequado ao combate ao incêndio.

4.3.1 Classe A



CLASSE A

Esta classe de incêndio representa a combustão de todos os combustíveis sólidos comuns, como madeira, papel, tecido, borracha, pneu, plástico, etc.

A queima desse tipo de combustível deixa resíduos de cinzas e carvão e se dá volumetricamente (em largura, comprimento e profundidade).

O método de extinção mais eficiente para essa classe é o resfriamento, com a utilização de água, apesar de alguns pós para extinção de incêndio de alta capacidade extintora e espumas também conseguirem o mesmo efeito.

Tabela 11 - Adequação dos agentes extintores para a classe A conforme o INMETRO

| Agente extintor | Adequação conforme o INMETRO |
|------------------------------|------------------------------|
| Água | Sim |
| Espuma mecânica | Sim |
| Pó para extinção de incêndio | Sim, desde que do tipo ABC |
| Gás carbônico | Não |

4.3.2 Classe B



Esta classe de incêndio representa a queima de líquidos ou gases inflamáveis:

- combustíveis líquidos: gasolina, álcool, diesel, querosene;
- tintas e solventes;
- óleos e gorduras de cozinha, utilizadas para confecção de alimentos; e
- resinas e óleos vegetais (provenientes do armazenamento de algodão, por exemplo).

Sua queima não deixa resíduo e se dá superficialmente (em largura e comprimento).

Os métodos mais utilizados para extinguir incêndios em líquidos inflamáveis são o abafamento (pelo uso de espumas) e a quebra da reação em cadeia (com o uso de pós para extinção de incêndio).

Incêndios envolvendo a queima de gases inflamáveis geralmente são extintos com a retirada (ou controle) do material combustível – como, por exemplo, fechar o registro do botijão ou da canalização de GLP. Isso porque a combustão dos gases se dá de forma muito rápida, não havendo tempo hábil para a atuação do agente extintor sobre o combustível.

Tabela 12 - Adequação dos agentes extintores para a classe B conforme o INMETRO

| Agente extintor | Adequação conforme o INMETRO |
|------------------------------|------------------------------|
| Água | Não |
| Espuma mecânica | Sim |
| Pó para extinção de incêndio | Sim |
| Gás carbônico | Sim |

4.3.3 Classe C



Representa a queima de equipamentos que se encontram energizados, constituindo os materiais elétricos energizados, oferecendo especial risco ao bombeiro pela condutividade elétrica.

Nesse tipo de incêndio, a sua principal característica – presença de energia elétrica – será, na maioria das vezes, a grande responsável por iniciar ou propagar o incêndio para outros materiais, geralmente combustíveis sólidos, líquidos ou gases inflamáveis.

A primeira ação em um incêndio desta classe deve ser cortar o fornecimento da energia elétrica.

A ação de cortar a energia elétrica fará com que o incêndio passe a ser classificado como A ou B. Com isso, o incêndio poderá ser extinto utilizando as técnicas e os agentes extintores mais adequados a essas classes.

Não sendo possível cortar a energia elétrica para o combate ao incêndio, os cuidados devem ser voltados para que o agente extintor não seja condutor elétrico preferencialmente. Se isso também não for possível, deve-se calcular as distâncias, os cuidados e os riscos do combate e escolher um agente extintor com baixa condutividade elétrica.

Tabela 13 - Adequação dos agentes extintores para a classe C, conforme o INMETRO

| Agente extintor | Adequação conforme o INMETRO |
|------------------------------|------------------------------|
| Água | Não |
| Espuma | Não |
| Pó para extinção de incêndio | Sim |
| Gás carbônico | Sim |

Apesar de a água não ser adequada para o combate a incêndios da Classe C, pode ser que seja o único agente extintor disponível na cena do incêndio, obrigando os bombeiros a utilizá-la. Devido à alta constante dielétrica, que oferece certa “resistência” à passagem da corrente elétrica conforme a distância e o potencial elétrico emitido, pode-se utilizar esse agente nesses tipos de incêndio, com as seguintes restrições:

- desde que respeitadas as distâncias estabelecidas conforme a Tabela 14; e
- desde que em fontes de baixa tensão – até 600 volts.

Tabela 14 - Relação do tipo de jato e a distância de segurança para utilização da água em incêndios classe C

| Tipo de jato | Esguicho (polegada) | Distância de segurança |
|--------------------|---------------------|------------------------|
| Neblinado | 1½ ou 2½ | 3 metros |
| Sólido ou compacto | 1½ | 6 metros |
| Sólido ou compacto | 2½ | 10 metros |

Como é possível observar na tabela, o jato neblinado oferece mais segurança nas ações envolvendo eletricidade que o jato sólido ou compacto. O seu uso deve ser feito por meio de esguichos que garantam as distâncias de segurança acima relacionadas, excluindo-se os aplicadores de neblina.

A certificação de agentes extintores para classe C é feita apenas para os aparelhos extintores de incêndio. O extintor é montado em um dispositivo (vide Figura 49) em estrutura metálica e todo o conjunto é submetido a uma tensão de 100 kV.

Estabelecida a tensão, o extintor é descarregado com o auxílio de dispositivo automático contra um anteparo feito em chapa metálica colocado à distância de 250 mm. Enquanto o agente extintor é projetado contra o anteparo, não pode haver descarga elétrica.

Caso ocorra a descarga elétrica, fica caracterizado que a condutividade elétrica do agente extintor em teste não oferece segurança ao operador que o manuseie no combate a princípios de incêndio em equipamentos elétricos energizados.

Na Figura 49, é apresentada o diagrama do dispositivo de teste classe C, no qual se mede a existência de corrente elétrica passando pelo agente extintor ao atingir a placa alvo, à direita da figura.

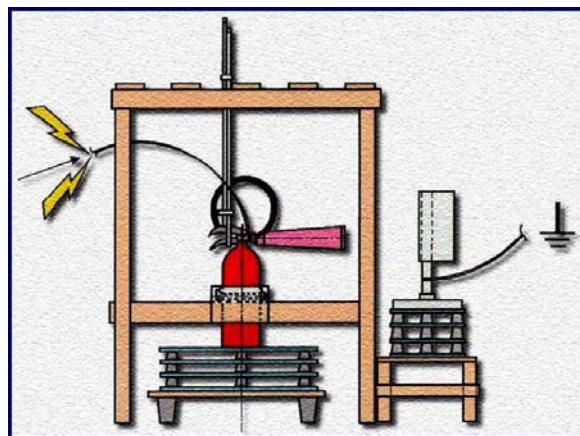


Figura 49 - Esquema do dispositivo de teste classe C para extintores de incêndio, segundo a NBR 12992

4.3.4 Classe D



CLASSE D

Esta classe de incêndio representa a queima de metais combustíveis, em sua maioria, alcalinos. A maior parte desses elementos queima de forma violenta, produzindo muito calor e luz brilhante.

Em geral, os materiais pirofóricos, aqueles que se inflamam espontaneamente, são associados aos incêndios classe D, uma vez que os agentes extintores dessa classe são adequados para ambos.

Sua queima atinge altas temperaturas e reage com agentes extintores que contenham água em seu interior, o que exige pós especiais para extinção de incêndio, que irão agir por abafamento e quebra da reação em cadeia.

Os elementos mais conhecidos são: magnésio, selênio, antimônio, lítio, potássio, alumínio fragmentado, zinco, titânio, sódio, urânio, zircônio, tório, plutônio e cálcio.

Em alguns casos, a utilização de água nesses metais irá agravar o quadro do incêndio, podendo causar reações violentas. Em outros, a mera presença do oxigênio no ar causará a reação. Cada metal deve ser avaliado em suas características antes de qualquer combate.

Esses metais não são encontrados em abundância nas edificações, mas podem fazer parte de processos industriais ou edificações que servem como depósitos ou galpões. A sua existência

deve ser do conhecimento dos bombeiros do quartel da área de atuação.

Tal processo é viável por meio dos serviços técnicos presentes nas organizações bombeiro militar, por ocasião das vistorias técnicas realizadas nas edificações. Ao ter ciência que determinada indústria manipula ou armazena esse tipo de material, a tropa deve ser alertada sobre os produtos e preparada, por meio de treinamentos e cuidados específicos, para uma ação emergencial.

Tabela 15 – Exemplos de alguns metais e suas principais utilizações

| Elemento | Principal utilização |
|-----------------|--|
| Antimônio | ligas de estanho; revestimentos de cabos, moldes, soldaduras, tubos; e fogos de artifício, fulminantes e balas tracejantes. |
| Lítio | lubrificantes (graxas) de alto desempenho; e baterias. |
| Magnésio | flashes fotográficos; artefatos pirotécnicos e bombas incendiárias; e construção de aviões, mísseis e foguetes. |
| Potássio | fertilizantes (sais de potássio); medicamentos e sabões (carbonato de potássio - K_2CO_3); fotografias (brometo de potássio - KBr); e explosivos (nitrato de potássio - KNO_3). |
| Selênio | fabricação de células fotoelétricas; câmeras de TV e máquinas xerográficas; baterias solares e retificadores; banhos fotográficos; vulcanização da borracha; fabricação de retificadores de selênio; e fabricação de hidrocarbonetos proveniente do petróleo. |
| Sódio | iluminação pública. |
| Titânio | componente de liga para alumínio, molibdênio, manganês; componente de liga para ferro e outros metais; fabricação de aviões, mísseis e naves espaciais; próteses ósseas e implantes dentários; e tintas. |
| Zinco | ligas de latão e para soldas; tipografia; baterias e soldas; produção de peças fundidas sob pressão; indústria automobilística, de equipamentos elétricos e outras; e revestimento (galvanização) de peças de aço. |
| Zircônio | reatores nucleares; indústrias químicas; confecção de ímãs supercondutores; indústrias de cerâmica e vidro; e laboratórios. |

Outros metais que não são classificados como combustíveis podem queimar se estiverem em forma de limalha ou pó.

Ao se depararem com produtos químicos, os bombeiros devem considerar o que prescreve o manual da Associação Brasileira da Indústria Química (ABIQUIM) antes de aplicar água sobre o incêndio.

4.3.5 Observações



CLASSE K

A norma americana, NFPA, prevê incêndios Classe K, que representam a queima de óleos e gorduras de cozinha. Apesar de envolver líquidos inflamáveis, incorrendo naturalmente na Classe B, essa classificação ocorre com o objetivo de enfatizar os riscos e a necessidade da prevenção de incêndios por meio de campanhas educativas específicas e desenvolvimento de agentes extintores adequados, uma vez que é causa comum de incêndios nos Estados Unidos. O combate se faz da mesma forma que os de Classe B e essa classificação não é adotada oficialmente no Brasil.

5. Dinâmica do incêndio

É o comportamento do incêndio quanto à sua propagação em um ambiente, confinado ou não, dentro das suas fases. A dinâmica do incêndio é diretamente influenciada pelos diversos fatores, variáveis caso a caso, tais como: a temperatura atingida no ambiente, projeto arquitetônico da edificação, o comportamento da fumaça e a carga de incêndio.

5.1. Fases do incêndio

O processo de queima em um incêndio ocorre em estágios ou fases claramente definidos, seja de um incêndio estrutural, em veículo ou florestal.

Reconhecendo as diferentes fases, os bombeiros podem compreender melhor todo o desenvolvimento e combater o incêndio em diferentes níveis, com as táticas e ferramentas mais adequadas a cada etapa. Se o bombeiro conhece bem as fases e as técnicas adequadas para atuar em cada uma delas o incêndio será debelado com eficiência.

As fases do incêndio são descritas como: inicial, crescente, totalmente desenvolvida e final; serão abordadas enfatizando as características de ambiente delimitado por teto e paredes, típicas de um incêndio estrutural. Isso vale também para um ambiente interior de um automóvel.

I. Fase inicial

Inicia-se após a ignição de algum material combustível. É a fase em que o combustível e o oxigênio presentes no ambiente são abundantes. A temperatura permanece relativamente baixa em um espaço de tempo maior e abrange a eclosão do incêndio, o qual fica

restrito ao foco inicial. O desenvolvimento do incêndio está limitado ao objeto inicialmente ignido (foco do incêndio) e às suas proximidades.

II. Fase crescente

O início desta fase abrange a incubação do incêndio. Em incêndios confinados, à medida que a combustão progride, a parte mais alta do ambiente (nível do teto) é preenchida, por convecção, com fumaça e gases quentes gerados pela combustão. O volume das chamas aumenta e a concentração de oxigênio começa a baixar para 20%.

A propagação dependerá muito da quantidade e forma do material combustível no ambiente. No início dessa fase, a temperatura ainda não é muito alta, mas há um aumento exponencial na quantidade de liberação de calor em um curto período de tempo, fazendo com que todos os materiais presentes no ambiente venham a sofrer pirólise.

Nessa fase, a temperatura sobe de 50 °C para 800 °C, aproximadamente, em um espaço de tempo relativamente curto. O tamanho e forma do ambiente também influenciarão o comportamento do fogo: quanto menor o ambiente, mais facilmente se desenvolverá o incêndio. Da mesma forma, quanto mais fechado (com poucas aberturas naturais para ventilação, como janelas e portas, por exemplo), mais calor será irradiado para o material combustível ainda não atingido.

No final dessa fase, todos os materiais presentes no ambiente atingirão seu ponto de ignição, imergindo o ambiente inteiro em chamas, também conhecido como *flashover*. O calor se espalha para cima e para fora do combustível inicial por convecção e condução.

III. Fase totalmente desenvolvida

Também chamada de estágio de queima livre ou estável, é nela que o incêndio torna-se mais forte, usando mais e mais oxigênio e combustível. Nessa fase, sua temperatura continuará se elevando acima de 800 °C, o que já foi provado em testes reais de incêndio em ambientes fechados (Karlsson, B e Quintiere, J. G., *Enclosure Fire Dynamics*).

O acúmulo de fumaça e gases quentes é intensificado. A concentração de oxigênio baixa para 18%, com grandes diferenças entre os níveis do piso e do teto.

Enquanto no piso a concentração de oxigênio é quase normal e a temperatura ainda é confortável, no teto a camada de gás combustível e temperatura aumentam rapidamente. Daí a importância do combate ser feito de joelhos ou agachado. A transição entre a fase crescente e esta pode ocorrer quando o suprimento de combustível ou oxigênio começa a ser limitado.

Na literatura brasileira sobre combate a incêndio, a fase totalmente desenvolvida abrange basicamente a propagação do incêndio, destacando-se que:

- se o incêndio ocorrer em ambiente fechado, todo ele se inflama, ficando o incêndio dependente da quantidade de oxigênio; e
- se o incêndio ocorrer em ambiente aberto, a massa gasosa poderá se dispersar, ficando o incêndio dependente da quantidade de combustível.

Os incêndios são controlados pela disponibilidade de combustível ou de ar.

Inicialmente, todo incêndio se comporta com características de incêndio bem ventilado, porque o oxigênio está plenamente disponível, ainda que esteja ocorrendo em um ambiente fechado (ou compartimentado). Conseqüentemente, desenvolve-se controlado pela queima do combustível.

Em geral, esses incêndios possuem duas camadas distintas: uma de ar na parte inferior e outra de fumaça na parte superior (Figura 50). Nesse caso, os produtos da combustão serão praticamente os mesmos daqueles provenientes da queima do mesmo material em local aberto.

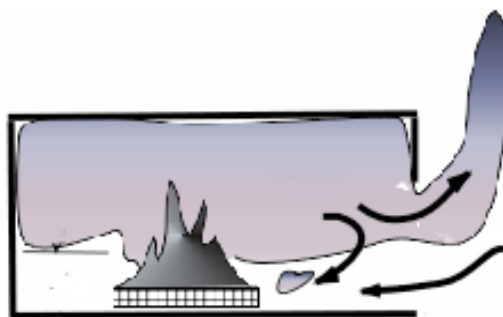


Figura 50 - Situação de incêndio limitado pelo combustível

Em ambientes limitados, o incêndio aos poucos diminuirá a quantidade de oxigênio e passará a ter velocidade, produção de calor e extinção controlados pelo oxigênio disponível, ou seja, ele será controlado pela ventilação. Em geral, esses incêndios apresentam apenas uma camada, a de fumaça, que preenche praticamente todo o ambiente. Nos incêndios controlados pela ventilação, a combustão dentro do compartimento será incompleta.

O incêndio subventilado é aquele cuja liberação de calor é controlada pela disponibilidade de ar.

Para um incêndio totalmente desenvolvido ser controlado pela disponibilidade de combustível, em um cômodo de 6m x 6m, por

exemplo, seria necessário abrir o equivalente a toda uma parede. Daí percebe-se que a maioria dos incêndios estruturais é controlada pela disponibilidade de ar, mesmo quando há janelas e portas abertas. Quando não há aberturas, o incêndio subventilado é chamado de confinado.

A maioria dos incêndios estruturais é controlada pela disponibilidade de ar, mesmo quando há janelas e portas abertas.

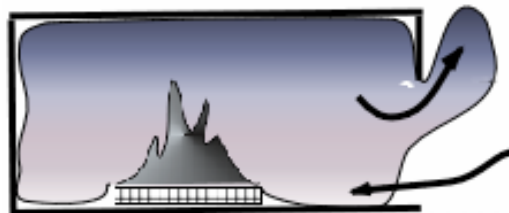


Figura 51 - Situação de incêndio limitado pela ventilação

A velocidade de queima estará limitada pela quantidade de ar que entra no compartimento. Essa circunstância resultará na saída do combustível não queimado e dos outros produtos da combustão incompleta do ambiente, propagando-se para os espaços adjacentes. Os incêndios controlados pela ventilação podem produzir quantidades maciças de monóxido de carbono, o que os tornam potencialmente letais.

Enquanto uma combustão viva pode ocorrer em concentrações tão baixas quanto 15% de oxigênio no ar em temperatura ambiente (21° C), sob condições de temperatura após a generalização do incêndio (*flashover*), a combustão na camada de fumaça pode continuar a ocorrer até próximo de 0% de oxigênio. Quanto maior for a temperatura do ambiente, menor será a necessidade de oxigênio.

Uma combustão lenta (incandescência), uma vez iniciada, pode continuar com baixa concentração de oxigênio, mesmo quando o ambiente está com temperaturas relativamente baixas. Essa condição mostra que a madeira e outros materiais podem continuar sendo consumidos, mesmo quando o ambiente está com uma concentração baixa de oxigênio. Combustíveis aquecidos envolvidos sob uma camada de produtos da combustão, com baixa concentração de oxigênio na parte superior do ambiente, também podem ser consumidos.

IV. Fase final

Também chamada de estágio de brasa ou decrescente, seu início ocorre quando o incêndio já consumiu a maior parte do oxigênio e combustível presente no ambiente. As chamas tendem a diminuir e buscar oxigênio disponível por qualquer abertura. A concentração de oxigênio baixa para 16%. Se a concentração baixar para 15% ou menos, as chamas extinguir-se-ão, permanecendo somente brasas.

A temperatura no teto ainda é muito elevada e o ambiente é rico em gases quentes e fumaça, podendo conter gases perigosos, como o metano. Há pouca ou nenhuma visibilidade no local. Ocorre uma diminuição linear da temperatura, o que significa que o ambiente estará resfriando, porém muito lentamente e com pouco oxigênio.

Se não houver ventilação, a temperatura do ambiente diminuirá gradualmente até que as chamas e incandescências se apaguem.

Se houver, porém, uma entrada de ar no ambiente causada, por exemplo, pelo arrombamento por parte dos bombeiros de forma precipitada, a massa gasosa presente na fumaça poderá ignir de forma rápida e violenta, produzindo muito calor e uma onda de choque, expondo a vida dos bombeiros ao risco de morte ou a danos graves. Essa fase abrange a extinção do incêndio.

Todo o combustível praticamente foi consumido e há chamas pequenas e separadas umas das outras. Há também o surgimento de incandescências. Nesta fase, o incêndio dependerá da quantidade de material combustível ainda não ignido.

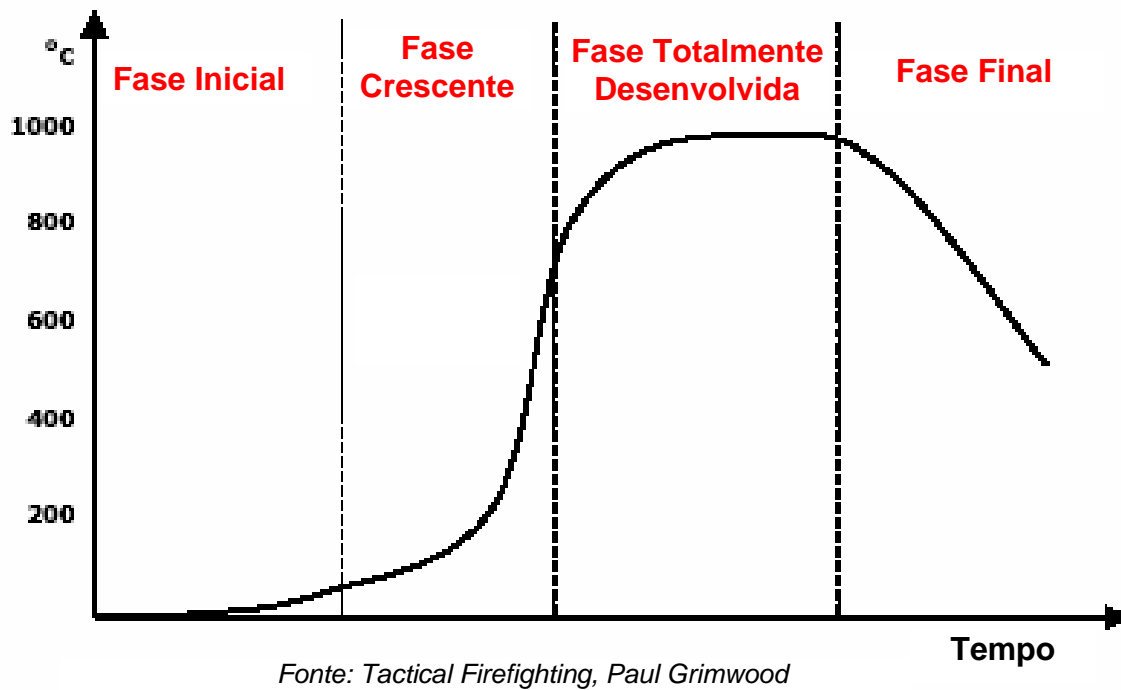


Figura 52 - Gráfico da temperatura versus tempo das fases de um incêndio

Tabela 16 - Características das fases de um incêndio

| Fases do Incêndio | | | |
|--|---|--|--|
| Fase Inicial | Fase Crescente | Fase Totalmente Desenvolvida | Fase Final |
| <ul style="list-style-type: none"> • chamas restritas ao foco inicial; • combustível "ilimitado"; • oxigênio em abundância; • temperatura ambiente; • duração de curto espaço de tempo. | <ul style="list-style-type: none"> • chamas se propagando para os materiais próximos; • combustível ainda em abundância; • diminuição da quantidade de oxigênio; • aumento exponencial da temperatura; • ascensão da massa gasosa por ação da convecção. | <ul style="list-style-type: none"> • generalização do incêndio, com a ignição de todos os materiais presentes no ambiente; • combustível limitado; • oxigênio restrito e diminuindo; • grandes diferenças de temperatura entre o teto e o piso; • calor irradiado do teto em direção ao piso. | <ul style="list-style-type: none"> • diminuição ou extinção das chamas; • combustível não disponível; • baixa concentração de oxigênio; • temperatura muito alta, diminuindo lentamente; • presença de muita fumaça e incandescência; • risco de ignição da fumaça se injetado ar no ambiente. |

5.2. Carga de incêndio

É a quantidade total de material combustível existente em um prédio, espaço ou área passível de ser atingida pelo fogo, incluindo materiais de acabamento e decoração, expressos em unidades de calor ou em peso equivalente de madeira.

Na prática, é tudo aquilo que serve como combustível. Logo, uma sala de cinema tem muito mais carga de incêndio que a portaria de um edifício, ainda que de mesmas dimensões e área. A carga de incêndio de uma indústria de móveis é maior que um galpão utilizado para estocar ferragens.

Carga de incêndio típica de:

- Uma sala de estar — jogo de sofá, estante, TV, aparelho de som, mesa de centro e de canto, tapete, etc.

- Um quarto — cama, guarda-roupa, criado-mudo, TV, etc.
- Compartimento de passageiro de um veículo — bancos estofados, painel em plástico, forro de tecido no teto, carpete, etc.

A carga de incêndio também pode ser definida como a carga de incêndio por metro quadrado de área de um ambiente, ou seja, como carga de incêndio específica, expressa em MJ/m².

$$Q_{t'} = (\sum_i M_i \Delta H_{ef,i}) / A_t$$

Onde M_i é a massa do objeto i , $\Delta H_{ef,i}$ o calor efetivo de combustão do objeto e A_t a área total da superfície no ambiente onde estão os objetos.

Tabela 17 – Carga de incêndio típica de diferentes ocupações

| Tipo de ocupação | Carga de incêndio específica (MJ/m ²) |
|--------------------|---|
| Biblioteca | 2.250 |
| Escola | 410 |
| Hospital | 440 |
| Prisão | 440 |
| Residência | 920 |
| Quarto de hotel | 460 |
| Escritório | 670 |
| Loja de brinquedos | 1.100 |
| Loja de ferramenta | 600 |

Fonte: Hadjisophocleous, G.V. e Richardson, J.K., *Water Flow Demands for Firefighting*

Tabela 18 – Classificação das edificações quanto à carga de incêndio

| Risco | Carga de incêndio (MJ/m ²) |
|-------|--|
| Baixo | Até 300 |
| Médio | Entre 300 e 1200 |
| Alto | Acima de 1200 |

Fonte: Decreto Estadual n 46.076/01 do Estado de São Paulo

5.3. Fumaça

A fumaça é um fator de grande influência na dinâmica do incêndio, de acordo com as suas características e seu potencial de dano.

Antigamente, qualificava-se a fumaça basicamente como um produto da combustão, que dificultava muito os trabalhos dos bombeiros por ser opaca, atrapalhando a visibilidade, e por ser tóxica, o que a tornava perigosa quando inalada.

Com estudos mais recentes, foram valorizadas outras três características: quente, móvel e inflamável, além das duas já conhecidas: opaca e tóxica.

Características da fumaça:

1. Quente, porque a combustão libera calor, transmitindo-o a outras áreas que ainda não foram atingidas. Como já tratado na convecção, a fumaça será a grande responsável por propagar o incêndio ao atingir pavimentos superiores (por meio de dutos, fossos e escadas) e acumular-se no ambiente.

2. Opaca, uma vez que seus produtos - principalmente a fuligem – permanecem suspensos na massa gasosa, dificultando a visibilidade tanto para bombeiros, quanto para as vítimas, o que exige técnicas de entrada segura em ambientes que estejam inundados por fumaça.

3. Móvel, porque é um fluido que está sofrendo um empuxo constante, movimentando-se em qualquer espaço possível e podendo, como já dito, atingir diferentes ambientes por meio de fossos, dutos, aberturas ou qualquer outro espaço que possa ocupar. Daí o cuidado que os bombeiros devem ter com elevadores, sistemas de ventilação e escadas. Essa característica da fumaça também explica porque ocorrem

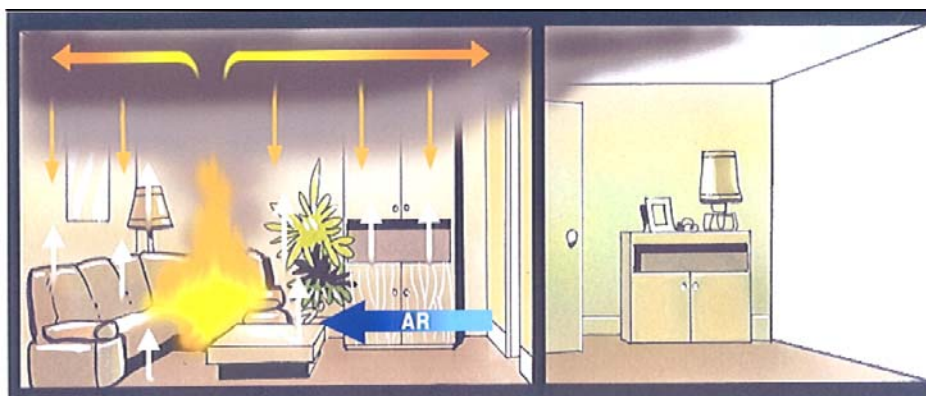
incêndios que atingem pavimentos não consecutivos em um incêndio estrutural.

4. Inflamável, por possuir íons provenientes da reação em cadeia da combustão em seu interior capazes de reagir com o oxigênio, o que a torna uma massa combustível gasosa.

5. Tóxica, pois seus produtos são asfixiantes e irritantes, prejudicando a respiração dos bombeiros e das vítimas, assunto que será aprofundado no Módulo 2 deste manual.

O conceito atual de fumaça não desabona o antigo, somente o complementa de maneira vital para a segurança e trabalho dos bombeiros no combate a incêndio.

Em ambiente fechado, como um compartimento, a fumaça tende a subir, atingir o teto e espalhar-se horizontalmente até ser limitada pelas paredes, acumulando-se nessa área.



Fonte: *Le guide national de référence Explosion de Fumées – Embraselement Généralisé Éclair*
Figura 53 – Movimento da fumaça em um ambiente fechado

A partir daí, a fumaça começará a descer para o piso. Em todo esse processo, qualquer rota de saída pode fazer com que se movimente através desta, podendo ser tanto por uma janela, quanto por

um duto de ar condicionado, uma escada, ou mesmo um fosso de elevador.

Se não houver uma rota de escape eficiente, o incêndio fará com que a fumaça desça para o piso, tomando todo o espaço e comprimindo o ar no interior do ambiente.

Cientes das características da fumaça e dos riscos que ela representa em um incêndio, os bombeiros podem adotar medidas simples e de suma importância durante as ações de combate, que garantam a segurança tanto para si próprios, quanto para as vítimas, tais como:

- resfriar a camada gasosa com o jato d'água apropriado e a técnica adequada;
- estabelecer meios que permitam o escoamento da fumaça (ventilação tática);
- monitorar os pavimentos da edificação, principalmente acima do foco do incêndio;
- ter cuidados com espaços vazios, como fossos, dutos, escadas, etc.; e
- utilizar o equipamento completo de proteção individual e respiratória.

Durante muito tempo, os bombeiros eram treinados e instruídos para atacar a base do fogo como primeira medida do combate ao incêndio. O fato de que a fumaça pode também pegar fogo ou explodir só foi considerado recentemente, com o estudo da reação em cadeia.

Consequentemente, há a necessidade de uma mudança no comportamento dos bombeiros quanto ao combate, direcionando sua atenção, primeiramente, aos gases inflamáveis presentes na fumaça.

Como utilizar as técnicas de forma eficiente é assunto do Módulo 3 deste manual.

5.4. A influência dos elementos construtivos na dinâmica dos incêndios.

Cada edificação possui características arquitetônicas e estruturais próprias e seus elementos influenciam diretamente a dinâmica de um incêndio, tanto separadamente quanto em conjunto.

Alguns fatores que afetam o comportamento de um incêndio e devem ser observados pelos bombeiros, a fim de se compreender as variações na dinâmica do incêndio e para efetuar um combate eficiente, são:

- o tamanho e o número de aberturas de ventilação (janelas e portas) do ambiente sinistrado – quanto menor o tamanho e o número de aberturas (ou ainda se estiverem fechadas), mais fumaça acumular-se-á no ambiente;
- o volume do ambiente (altura, largura e comprimento) – quanto maior o espaço disponível, maior a quantidade de fumaça acumulada em seu interior;
- o número de compartimentos em que o ambiente está dividido – quanto mais compartimentado o ambiente, menor quantidade de fumaça espalhar-se-á e mais fácil será o seu combate;
- as propriedades térmicas das paredes do compartimento – quanto melhor isolante térmico for o material das paredes e teto, menor quantidade de calor é irradiada para outros ambientes; e
- o tamanho, a composição e a localização dos materiais combustíveis existentes no ambiente (carga de incêndio)

– quanto maior a carga de incêndio de um ambiente, mais fumaça é produzida e maior o potencial de dano do incêndio.

Além desses fatores, alguns elementos construtivos são comuns em muitas edificações e ainda não despertam a atenção devida dos bombeiros, tais como piso falso e teto falso.

5.4.1 Piso falso

É a elevação do piso, com a finalidade de permitir a acomodação e passagem de cabeamento, principalmente de transmissão de dados, comunicação e de eletricidade, o que o torna muito comum em ambientes com vários computadores ou de centro de processamento de dados.

Sua altura varia de 15 a 120 centímetros e um incêndio atingindo essa área pode apresentar risco de queda dos bombeiros no momento do combate ou durante a busca de vítimas.

Geralmente, é feito em placas de madeira sobre estrutura metálica.



Figura 54 - Exemplo de piso falso

5.4.2 Teto falso

Teto falso ou forro é um rebaixamento do teto, como se pode ver na Figura 40. Com altura variável, ele forma um vão entre o teto e o forro.

Algumas edificações possuem esse espaço como sótão e costumam guardar materiais e mobílias, o que aumenta a carga de incêndio do ambiente, agravando as condições do incêndio.



Fonte: NISTIR 6923 - *Simulation of the Dynamics of a Fire in a One-Story Restaurant*

Figura 55 - Teto falso servindo como depósito de material

A Figura 55 mostra um forro sendo utilizado como depósito de materiais em um restaurante no Texas, EUA, em 2000, onde ocorreu um incêndio que vitimou fatalmente dois bombeiros. As condições do sinistro foram, sobremaneira, agravadas por essa situação.

Em outras edificações, o forro estará fixado junto à laje, não havendo espaço entre eles. Saber se existe ou não um vão entre esses dois elementos geralmente só será possível nas ações de reconhecimento do sinistro, antes do combate, por parte dos bombeiros.

Como a fumaça é móvel e quente, existe uma grande probabilidade desse espaço ser tomado por ela, agravando as condições do incêndio, pela livre propagação do calor para áreas não atingidas.

O risco que um teto falso (ou forro) oferece em um incêndio é devido, principalmente, à possibilidade de a fumaça acumular-se e movimentar-se em seu interior.

Existem vários tipos de forros. Alguns são de alto custo, portanto, não tão comuns, tais como: o de poliuretano, de metal perfurado e o de lã mineral. Geralmente, são utilizados em teatros, *shoppings*, aeroportos e locais que necessitam de cuidados quanto à propagação do som.

Todos eles apresentam característica incombustível, ou seja, que não ajudam a propagar o incêndio. Entretanto, o risco que eles oferecem para o acúmulo da fumaça em seu interior é o mesmo.



Figura 56 - Exemplo de forro de metal perfurado

Os tipos mais comuns de forro são de PVC, de madeira, de gesso e de fibra de madeira.

PVC – Cloreto de polivinila

Apesar de não ignir facilmente, o PVC deforma com um mínimo de calor, derretendo e fazendo cair gotas de polímero quente sobre os bombeiros, com risco grave de queimadura.

O uso completo do EPI é imprescindível em todas as ações de combate a incêndio!



Figura 57 - Exemplo de forro de PVC

Madeira

O forro de madeira, tipo paulista, é combustível e, normalmente, permite uma fácil e rápida propagação do incêndio, pois aumenta a carga de incêndio do ambiente, dificultando a extinção do sinistro.

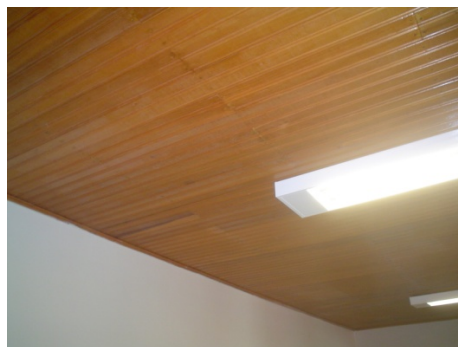


Figura 58 - Exemplo de forro de madeira

Gesso

O gesso também é muito utilizado tanto em residências quanto em edificações comerciais. Ele é incombustível, porém trinca quando aquecido e produz pedaços cortantes ao ser quebrado, podendo

desprender-se do teto e ferir os bombeiros, mesmo na fase do rescaldo. Por ser muito parecido com o material de acabamento das paredes, quase não é percebido visualmente pelos bombeiros antes de se decompor.

Fibra de madeira

O forro de fibra de madeira prensada foi muito utilizado até a década de noventa, devido ao seu baixo custo em relação ao gesso, feito em forma de placas fixadas a estruturas metálicas ou de madeira.

É combustível, o que agrava, sobremaneira, a propagação do incêndio. O inglês Paul Grimwood, no seu livro *Tactical Firefighting*, cita, em destaque, a necessidade de os bombeiros conhecerem as edificações de sua área de atuação que possuem esse tipo de forro, a fim de se prepararem para um provável comportamento extremo do fogo na ocorrência de um incêndio.

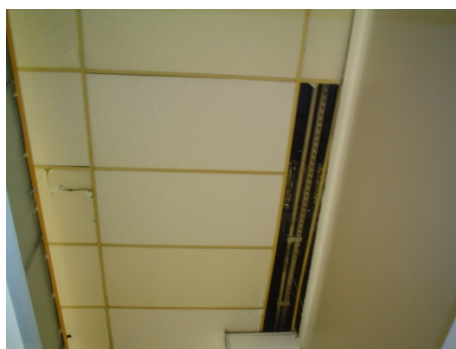


Figura 59 - Exemplo de forro de fibra de madeira

Apesar de hoje quase não ser utilizado, esse tipo de forro ainda é comum em edificações antigas.

Edificações com grandes extensões com esse tipo de forro apresentam risco potencial de ocorrência de explosão da fumaça (*backdraft*) em caso de incêndio.

5.4.3 Fachadas de vidro

As edificações modernas estão sendo projetadas, cada vez mais, em grande número com **fachadas de vidro**, também chamadas de “pele de vidro”. Nessas edificações, há um suporte metálico preso à laje que sustenta grandes “placas” de vidro, substituindo as paredes de tijolos ou de concreto. Entre a laje e os vidros existe um espaço que forma um vão, o que faz com que se assemelhe a uma gaiola.



Figura 60 – Exemplo de prédios com fachada de vidro em Brasília - DF

Com a ação do calor, os vidros se deformam, deixando livre o espaço entre a laje de um pavimento e a estrutura dos vidros. Essa abertura favorece a propagação vertical do calor e agrava as condições do incêndio, como é possível notar na Figura 61, a menos que haja uma compartimentação vertical que ofereça resistência ao calor.



Figura 61 - Incêndio no Ministério do Desenvolvimento Urbano em 1988.

A **compartimentação horizontal** de um ambiente tem a finalidade de dividir o plano horizontal de um mesmo pavimento da edificação, por paredes ou outros elementos estruturais resistentes ao calor, com o objetivo de evitar a propagação do incêndio e da fumaça pela ação deste.

É o mesmo que transformar uma caixa grande em várias caixas menores de mesma altura. Como já foi dito, quanto mais compartimentado for o ambiente, mais restrito e, portanto, menor o potencial de dano devido a um incêndio.

Acontece que, nesse tipo de edificação, é comum que os cômodos sejam separados por divisória, geralmente de madeira sem tratamento retardante ao fogo, o que implica no agravamento do incêndio por dois grandes fatores:

- as divisórias aumentam a carga de incêndio da edificação;
- e
- ao se deformarem, pela ação do calor, aumentam o espaço disponível para a propagação do calor e da fumaça.

A **compartimentação vertical** de um ambiente consiste em evitar que o calor e a fumaça se propaguem verticalmente por meio de

lajes ou afins. É o mesmo que isolar uma caixa de outra que se encontra acima. Na maior parte desse tipo de edificação, não há uma compartimentação vertical que consiga reter o calor no pavimento. O mais comum é a utilização de peças metálicas, apenas com fins arquitetônicos, para separar um pavimento do outro, como mostra a Figura 62.



Figura 62 – Peça metálica entre o suporte dos vidros e a laje.

É importante ressaltar que esse dispositivo não impede a propagação do incêndio ao pavimento imediatamente superior, pelo fato de o metal se deformar facilmente quando exposto ao calor, permitindo a circulação da fumaça por esse espaço.

Os vidros são materiais pouco combustíveis, porém também se deformam com a ação do calor. Quando um vidro se rompe em determinado pavimento, permite a livre passagem da fumaça quente para o pavimento superior.

Os vidros mais encontrados em edificações são os laminados, temperados ou aramados. Todos possuem alto custo e a ação de quebrá-los em um combate deve ser, ao máximo, evitada.

Considerações gerais sobre os vidros:

- Os vidros laminados possuem esse nome por terem uma lâmina adesiva plástica entre as suas duas faces. São os mais utilizados em fachadas por serem, entre outras coisas, bastante resistentes ao vandalismo. Por outro lado, eles dificultam a ação dos bombeiros caso necessitem quebrá-los.



Figura 63 - Prédio com fachada em vidro laminado - Centro de Convenções Ulisses Guimarães

- Os vidros temperados são confeccionados submetendo-os a altas temperaturas e resfriando-os abruptamente. São quebráveis, contudo apresentam alta resistência ao calor e a choques mecânicos, sendo muito utilizados em portas e acessos.
- Os vidros aramados possuem, em seu interior, uma malha de arame que não permite a passagem de objetos em caso de quebra do vidro. Por esse motivo são considerados vidros de segurança, sendo utilizados principalmente em rotas de fuga e locais protegidos.

Combater um incêndio em uma edificação em que existe o predomínio de estruturas com vidros irá requerer dos bombeiros a

utilização de todos os sistemas de proteção contra incêndio e pânico existentes na própria edificação, assunto que será abordado no Módulo 5 do presente manual.

Quebrar os vidros para acessar o interior do prédio ou para fazer o combate é uma medida extrema, que deve ser evitada ao máximo.

5.4.4 Gesso acartonado

Hoje em dia está sendo muito utilizado na construção civil para substituir a alvenaria em paredes internas e divisórias. Conhecido também como *drywall*, o gesso acartonado possui a característica de ser de montagem rápida e fácil.

No Brasil, até 2008, não existia legislação que obrigasse os usuários deste material a adotarem medidas que o tornasse resistente ao fogo e ao calor. Portanto, a presença deste material pode favorecer a propagação das chamas, tanto pela combustibilidade do material utilizado em sua confecção, quanto pela deformação com a ação do calor, acarretando a descompartimentação do ambiente (aumentando seu volume) e permitindo a propagação do incêndio pela movimentação da fumaça.

Quando montado, o gesso acartonado assemelha-se demasiadamente a uma parede comum, o que dificulta a identificação visual pelos bombeiros em caso de sinistro.

5.4.5 Dutos

Os dutos são aberturas verticais em uma edificação que atravessam os pavimentos, servindo para diferentes finalidades, desde a

passagem de instalações elétricas e hidráulicas até uma escada ou fosso de elevador.

Estudos provenientes das análises de vários incêndios mostram que os dutos (escadas, fossos de elevadores, dutos de ventilação ou dutos técnicos - *shafts*) auxiliam na propagação do incêndio por convecção, semelhantemente ao que ocorre em chaminés.



Fonte: Fotos APE Elevadores e Erich Teister - internet

Figura 64 - Fosso de elevador e escada facilitam a movimentação da fumaça na edificação

Dada a sua característica móvel, a fumaça tende a ocupar todos esses espaços, levando massa combustível gasosa aquecida a áreas ou ambientes ainda não afetados.

Em razão dessa característica, os bombeiros devem estar sempre atentos à presença de espaços como esses na edificação e monitorar se há início de outros focos, inclusive em pavimentos não consecutivos.



Figura 65 – Exemplo de escada

Em uma edificação, as escadas de emergência, que normalmente são protegidas por paredes, são as melhores rotas de fuga para as vítimas, bem como de acesso para os bombeiros.

Um duto técnico, ou *shaft*, é uma abertura feita próxima à parede, semelhante a um armário, em todos os pavimentos, para a passagem de canalização hidráulica ou elétrica ou, ainda, servindo de ventilação. Os bombeiros podem ter dificuldades em visualizar um duto técnico nas edificações. Contudo, costumam estar próximos a banheiros, cozinhas e áreas de serviço.

6. Comportamentos extremos do fogo



Fonte: *Le guide national de référence Explosion de Fumées – Embrassement Généralisé Éclair*
Figura 66 – Incêndios estruturais podem apresentar um comportamento extremo do fogo

Em 1986, os bombeiros da Suécia começaram a observar que alguns incêndios em ambientes compartimentados, como residências, apartamentos e escritórios, apresentavam um comportamento muito agressivo quanto à sua propagação e intensidade.

Depois de estudos e testes, observou-se que a fumaça, por causa da reação em cadeia, é inflamável, sendo um importante fator nesse processo, fazendo com que haja comportamentos extremos do fogo, com danos consideráveis.

Ao longo dos anos, comportamentos extremos do fogo ceifaram a vida de muitas pessoas e machucaram outras, o que inclui tanto bombeiros quanto civis (ver Tabela 19).

Tabela 19 - Histórico de mortos em incêndios relacionados a comportamentos extremos do fogo

| Ano | Local | Mortos |
|------|--|---------------|
| 1981 | Boate Stardust Disco - Dublin - Irlanda | 48 |
| 1982 | Suécia | 2 (bombeiros) |
| 1982 | Dorothy May Apartments - Los Angeles - EUA | 24 |
| 1987 | Metrô de Londres | 31 |
| 1991 | Hotel - São Petersburgo - Rússia | 8 (bombeiros) |
| 1994 | Apartamento - Nova Iorque - EUA | 3 (bombeiros) |
| 1996 | Residência - Blaina - Reino Unido | 2 (bombeiros) |
| 1996 | Supermercado - Bristol - Inglaterra | 1 (bombeiro) |
| 1996 | Aeroporto - Dusseldorf - Alemanha | 17 |
| 1997 | Londres (durante o período de um ano) | 3 (bombeiros) |
| 2002 | Paris (em dois eventos) | 5 (bombeiros) |

Fonte: *Tactical Firefighting, Paul Grimwood*

Para evitar que perdas semelhantes voltassem a ocorrer, iniciou-se o estudo e a mudança de comportamento dos bombeiros quanto aos incêndios que se propagam de uma forma rápida e violenta. Tal estudo visava à compreensão de suas características e potencialidades para desenvolver técnicas e táticas de prevenção e combate. Neste capítulo, serão abordados os conceitos e características desses eventos, enquanto que a prevenção e o combate serão abordados no Módulo 3 do presente manual.

Os comportamentos extremos do fogo são classificados em três grandes fenômenos, também denominados incêndios de propagação rápida (*rapid fire progress*), são eles: generalização do incêndio (*flashover*), explosão de fumaça (*backdraft*) e ignição da fumaça.

Todos esses fenômenos ocorrem principalmente como resultado do comportamento da fumaça no ambiente.

Os comportamentos extremos do fogo acontecem em ambientes com carga de incêndio típica de um ambiente comum – como uma sala, um quarto ou ainda um mercado – não necessitando de agentes aceleradores (como álcool, gasolina ou outros materiais combustíveis) para causar o fenômeno.

Características:

- ocorrem em espaço físico limitado (confinado ou compartimentado) – geralmente a delimitação é feita pelos lados e teto, que servirão para acumular a fumaça no ambiente em caso de incêndio, principalmente se portas e janelas estiverem fechadas. Tudo isso impede o escoamento da fumaça de dentro do ambiente para o exterior.
- surgem com pouco tempo de queima – não são necessários longos períodos de queima para que um incêndio de propagação rápida ocorra.
- acontecem em edificações com qualquer estrutura construtiva – concreto, alvenaria, madeira, metal, etc.

Isso significa que, ao se deslocarem para um incêndio estrutural, todos os bombeiros precisam estar cientes da possibilidade de ocorrência de um fenômeno dessa natureza, a fim de que suas ações sejam realizadas para evitar ou diminuir a gravidade de um comportamento extremo do fogo.

Os termos utilizados em inglês são difíceis de traduzir para a Língua Portuguesa com a fidelidade conceitual necessária, por isso a alusão a eles será feita sempre que for útil para facilitar a apresentação do texto.

6.1. Generalização do incêndio (*Flashover*)

É o momento em que todos os materiais presentes no ambiente, em virtude da ação da fumaça quente e inflamável, entram em ignição após sofrerem a pirólise.



Figura 67 - Incêndio generalizado no prédio do INSS, Brasília-DF, 2005

É a generalização do incêndio, no qual todos os materiais presentes se inflamam após terem atingido seus respectivos pontos de ignição. Não se pode confundir-lo com os processos mais elementares de transmissão de calor (condução, convecção e radiação).

O *flashover* ocorre entre o final da fase crescente e o início da fase totalmente desenvolvida de um incêndio.

Flashover é a generalização do incêndio em um ambiente, quando todos os materiais presentes entram em ignição quase simultaneamente.

No *flashover*, as superfícies expostas ao calor atingem a temperatura de ignição mais ou menos simultaneamente; e o fogo se espalha rapidamente pelo ambiente.

O calor, que é irradiado do teto e das paredes altas dentro do compartimento em chamas, conduz os gases e a mobília presente no ambiente a uma temperatura de auto-ignição, a qual culmina no *flashover*.

Pode representar o início do perigo de um colapso estrutural.

Normalmente, quando o incêndio encontra-se na iminência de generalizar-se (ocorrência do *flashover*), é possível observar um ou mais dos seguintes processos:

1. fumaça densa – com a delimitação de espaço, a fumaça tende a se acumular, tornando-se mais densa.



Figura 68 - Fumaça densa que antecede o *flashover*

2. línguas de fogo na camada de fumaça, direcionando-se para aberturas como portas e janelas – em condições de disponibilidade limitada do oxigênio no ambiente, as chamas na camada de fumaça irão se direcionar para qualquer abertura que permita seu contato com o comburente, como pode ser observado na Figura 69.



Fonte: *Le guide national de référence Explosion de Fumées – Embracement Généralisé Éclair*
Figura 69 – Línguas de fogo buscando oxigênio no compartimento ao lado



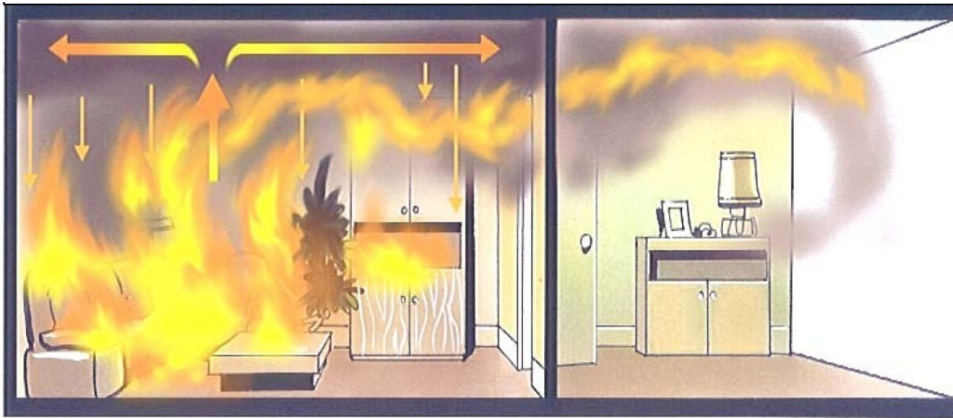
Figura 70 - Exemplo de línguas de fogo - Ensaio na casa de fumaça/CTO - CBMDF

3. Camada de fumaça no nível do teto, “rolando” (*rollover*).



Fonte: *Le guide national de référence Explosion de Fumées – Embracement Généralisé Éclair*
Figura 71 - Chamas rolando na camada de fumaça (*rollover*)

4. ocorrência de resíduos de fumaça depositados nas superfícies de móveis e pisos – como a combustão produz fuligem, que é um sólido, esta será depositada em qualquer superfície possível.



Fonte: Le guide national de référence Explosion de Fumées – Embrasement Généralisé Éclair
Figura 72 - Generalização do incêndio (flashover)

Na Figura 72, é possível observar, no ambiente à direita, que a fumaça está depositando resíduos sobre os móveis.

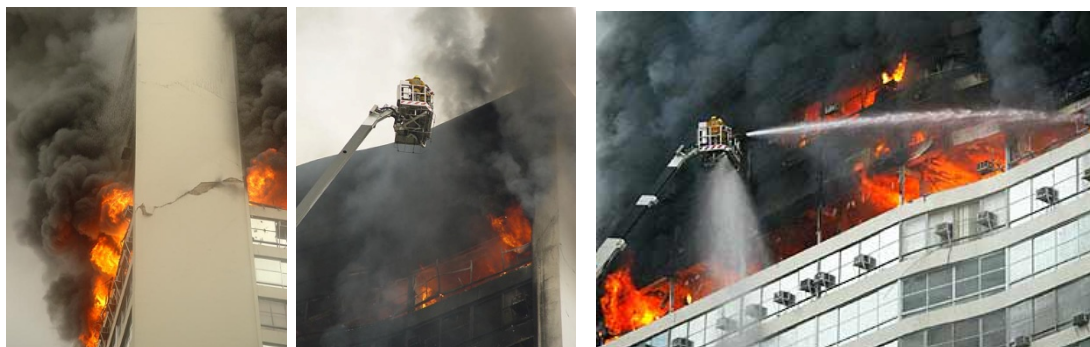
A Figura 67 mostra alguns pavimentos do edifício com incêndio generalizado.

Considerando que a temperatura na camada de fumaça pode atingir 1000 °C, é importante que os bombeiros estejam o mais próximo do nível do solo, o que implica a necessidade de se **trabalhar agachado** ou **ajoelhado**.

Esse procedimento pode ser corroborado em teste prático, como na Figura 43, onde verifica-se que a diferença da temperatura entre o bombeiro estar agachado (1,0m) e o ombro do bombeiro quando em pé (1,5m) pode ser superior a 200 °C.

Em um incêndio estrutural, as menores diferenças de altura implicam em grandes diferenças de temperatura.

Fotos constantes na Figura 73 mostram o incêndio ocorrido no prédio da Eletrobrás, no Rio de Janeiro, em 26 de fevereiro de 2004, com características de *flashover*.



Fotos: Wilian César Aguiar e Jornal O Globo eletrônico (internet)

Figura 73 - Incêndio no prédio da Eletrobrás no Rio de Janeiro

6.2. Explosão da fumaça - *Backdraft* ou *backdraught*

É a deflagração rápida e violenta da fumaça aquecida e acumulada no ambiente pobre em oxigênio, em forma de explosão, no momento em que essa massa gasosa entra em contato com o oxigênio.



Fonte: www.local1259iaff.org/flashover.html

Figura 74 - Exemplo de situação de *backdraft*, com dois bombeiros na escada surpreendidos pela explosão da fumaça.

Essa inserção errada de ar no ambiente pode ocorrer tanto pela entrada dos bombeiros antes de providenciarem um escoamento eficiente da fumaça quanto pela quebra de uma janela decorrente da pressão exercida pela própria fumaça sobre os vidros.

A figura abaixo mostra alguns quadros de uma animação encontrada no sítio alemão www.atemschutz.org, que demonstra como ocorre um *backdraft* devido à abordagem errada dos bombeiros, por não estabelecerem uma rota de fuga para a fumaça antes de adentrarem no ambiente.



Fonte: <http://www.atemshutz.org>
Figura 75 - Evolução de um *backdraft*

Quando um *backdraft* ocorre, nada pode ser feito para se diminuir seus efeitos. Preveni-lo é, então, a palavra chave para a segurança dos bombeiros.

Um *backdraft* é, portanto, um tipo de explosão química que ocorre em incêndios estruturais, em forma de uma bola de fogo. E como já foi visto, uma explosão é o efeito de uma expansão violenta e repentina dos gases.

No *backdraft*, a fumaça é o gás combustível, pois contém monóxido de carbono, o qual, por sua vez, possui uma faixa de explosividade de 12 a 74% quando misturado ao ar, o que é considerável.

O *backdraft* é uma explosão da fumaça, com onda de choque capaz de derrubar um bombeiro, quebrar janelas ou até mesmo colapsar estruturas.

Para que ocorra um *backdraft* é necessário que, inicialmente, haja uma concentração decrescente de oxigênio em um ambiente fechado durante a ocorrência de um incêndio, o que caracteriza os incêndios estruturais.

Em um ambiente sem janelas, ou com janelas fechadas, a concentração de oxigênio irá diminuir ao longo do desenvolvimento da combustão e a temperatura irá aumentar. A fumaça continuará a se acumular. Considerando-se que para existir chamas é necessário que a concentração de oxigênio esteja em um nível mínimo aproximado de

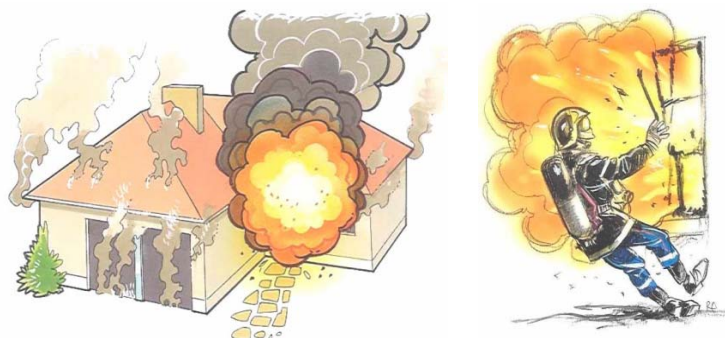
15%, as chamas começarão a diminuir até extinguirem-se completamente. Isso pode significar a extinção do incêndio.

Se, entretanto, entrar ar no ambiente sem antes escoar a fumaça, o oxigênio injetado provocará uma deflagração de forma muito rápida, gerando uma onda de choque em virtude de deslocamento do ar resultante da queima. A onda de choque de um *backdraft* pode causar até o colapso da estrutura. A Tabela 20 apresenta os efeitos causados por diversos valores de pressão.

Tabela 20 - Relação dos efeitos da pressão exercida por explosão

| Efeitos da explosão | Pico de pressão necessária |
|--------------------------------|----------------------------|
| Estilhaçamento de vidros | 0 - 5 psi |
| Derrubar o bombeiro | 1 psi |
| Colapso de divisórias | 1 - 2 psi |
| Colapso de parede de tijolos | 7 - 8 psi |
| Danos pulmonares nos bombeiros | 15 psi |
| Primeiros óbitos | 35 psi |
| 50% de óbitos | 50 psi |
| 99% de óbitos | 65 psi |

Fonte: *Tactical Firefighting*, P. Grimwood



Fonte: *Le guide national de référence Explosion de Fumées – Embrassement Généralisé Éclair*
Figura 76 - Situação de explosão da fumaça causada pela abertura incorreta do ambiente

Pode ser que haja um espaço de tempo considerável entre a abertura de uma porta ou janela e a ocorrência de um *backdraft*. Em

incêndios reais, já foram verificados casos em que o *backdraft* aconteceu após alguns minutos depois de feita a abertura.

Na maioria dos casos, entre o momento em que o bombeiro abre uma janela e o momento da “explosão” decorrem alguns segundos. Por isso, a abordagem e o combate a um incêndio em ambiente fechado têm de ser cuidadosos, para evitar que um fenômeno desses venha surpreender os bombeiros mesmo depois de já estarem no ambiente há algum tempo.

Os indícios que antecedem um *backdraft* são:

1. fumaça densa e escura, rolando pelo ambiente, saindo em forma pulsante por meio de frestas ou qualquer outra abertura – como o incêndio está pouco ventilado, a fumaça tende a sair por qualquer abertura que lhe possibilite o fornecimento de ar. A forma pulsante ocorre pela expansão dos gases combustíveis, produzida pelas combustões rápidas e de pequeno porte que estão ocorrendo no interior do ambiente sinistrado, enquanto a concentração de oxigênio ainda permite tal processo.

2. poucas chamas visíveis que surgem quando encontram o ar – ao sair do ambiente, a fumaça tende a reagir com o oxigênio e entrar em combustão. Entretanto, não o suficiente para fazer com que toda ela entre em ignição. Conseqüentemente, pequenas chamas se acendem e apagam próximas das aberturas.

3. fumaça puxando corrente de ar para dentro do ambiente, intermitentemente – de forma pulsante, movimento causado pela alta pressão no ambiente sinistrado.

4. janelas enegrecidas – em decorrência da condensação da fumaça densa e escura que antecede o fenômeno, os vidros estarão escurecidos, com aspecto manchado.

5. portas e maçanetas quentes – em decorrência da alta temperatura no interior do ambiente. Isso pode ser avaliado por meio da aplicação de pulsos de jato neblinado na porta. Se a água evaporar rapidamente, deve-se considerar o risco de um comportamento extremo do fogo.

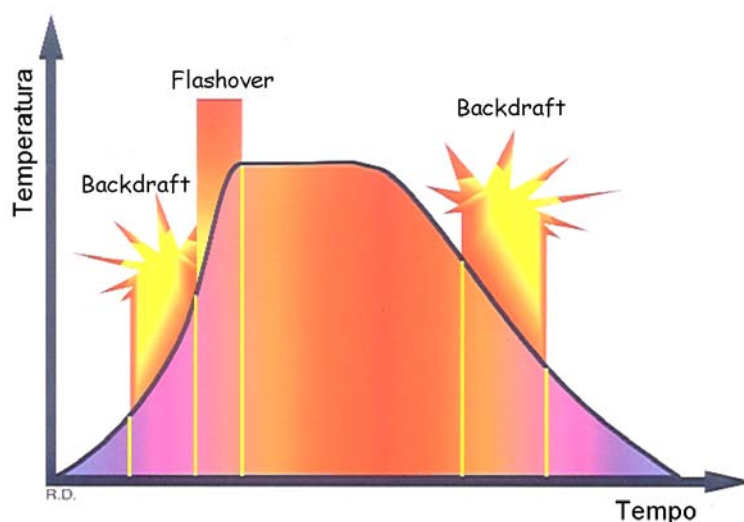
6. sons de assobio ou rugido – em decorrência da saída da fumaça por frestas, há ruídos próximos ao ambiente.

7. molduras de janelas com “depósitos de óleo” – tendo em vista que a combustão gera como produtos água e fuligem, a mistura desses elementos dará a impressão de que existe óleo no ambiente.

Nos incêndios, os bombeiros devem sempre estabelecer uma rota efetiva de saída dos gases (o mais alto possível), antes de fazerem qualquer abertura no nível do pavimento incendiado, o que permitirá a entrada segura dos bombeiros. Caso contrário, a fumaça poderá entrar em ignição e deflagrar o *backdraft*.

Observando a curva de evolução da temperatura de um incêndio (Figura 77), é possível verificar quando e qual fenômeno pode ocorrer.

Enquanto o *backdraft* é potencialmente perigoso no início e no fim do incêndio, pela baixa concentração de oxigênio em decorrência do ambiente ser limitado ou da combustão já ter sido processada, o *flashover* ocorrerá no desenvolvimento do incêndio, mais especificamente, entre as fases crescente e totalmente desenvolvida, em decorrência da temperatura atingida. Enquanto o *flashover* é um fenômeno induzido por calor, o *backdraft* é induzido pelo ar (oxigênio).



Fonte: *Tactical Firefighting*, P. Grimwood

Figura 77 - Curva de evolução da temperatura de um incêndio mostrando a possibilidade de ocorrência dos fenômenos extremos.

Exemplo de *backdraft*

A abertura de uma porta atrás da qual está um foco de incêndio pode deflagrar um *backdraft*.

Em 28 de março de 1994, em Nova York, EUA, um *backdraft* de violência extraordinária vitimou três bombeiros na casa 62 da *Watts Street*. O acidente foi investigado pelo Instituto Americano de Segurança e Saúde Ocupacional (NIOSH, sigla em inglês), que modelou o comportamento do incêndio em computador.

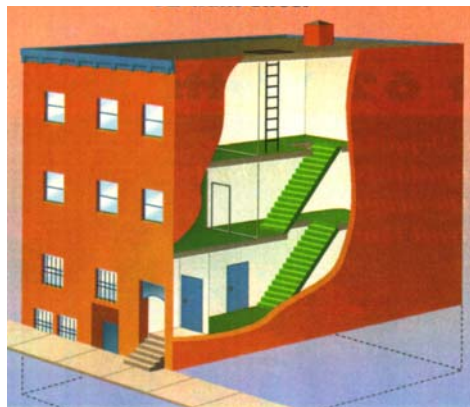
O incêndio ocorreu em um bloco de quatro pavimentos. Os apartamentos do primeiro, segundo e terceiro andares eram servidos por uma só escada, de onde havia uma porta para a calçada da rua. O incêndio iniciou-se no apartamento do primeiro pavimento, cujas portas eram vedadas para aumentar a eficiência do sistema de aquecimento.

O incêndio permaneceu confinado, com grande quantidade de monóxido de carbono e foi detectado pela saída de fagulhas por uma chaminé. Como de fora não era possível localizar o foco, duas equipes

foram procurá-lo: uma deveria abrir o apartamento do primeiro pavimento e a outra, o apartamento do segundo.

A porta do apartamento no primeiro andar sequer estava quente, pois o oxigênio diminuía tanto que a temperatura começara a decrescer. No entanto, quando o apartamento foi aberto, formou-se uma entrada de ar pela parte mais baixa da porta, e saiu um pouco de fumaça pela parte mais alta.

Nesse momento, ocasionada pela mistura dos gases com o ar, toda a fumaça acumulada explodiu numa bola de fogo, saindo pela parte mais alta da porta, tomando a escada que levava ao segundo andar. Os bombeiros do primeiro pavimento conseguiram correr para a rua, sob as chamas. Porém os que estavam acima do fogo (havia subido para abrir o apartamento do segundo andar) foram vitimados pelo acidente, vindo a falecer.



Fonte: NFA *Journal*, Vol. 89, no 6, 85-89, Novembro/Dezembro 1995

Figura 78 - Desenho do prédio da 62 Watts Street

O acidente poderia ter sido minimizado de vários modos:

- Se houvesse uma porta fechada separando o primeiro e o segundo andar.

- Se os bombeiros entrassem no apartamento do primeiro andar e somente depois a outra equipe subisse.
- Se a abertura fosse feita mantendo-se controle da abertura. Ou seja, ao perceber o risco de *backdraft*, o ajudante de linha poderia fechar a porta.
- Se os bombeiros atingidos tivessem uma linha pressurizada e se colocassem em posição de proteção.

Em geral, a exposição a um *backdraft* está além da capacidade de proteção do EPI.

6.3. Ignição da fumaça

Como abordado anteriormente, o *flashover* é a generalização do incêndio e o *backdraft* é a deflagração (explosão) da fumaça em decorrência da entrada de ar.

Paul Grimwood agrupa vários fenômenos sob a designação genérica de ignição de fumaça, definida como a “*ignição de gases e produtos acumulados do incêndio, que possuem energia suficiente para inflamarem-se ou que se inflamam ao entrar em contato com fonte de calor.*”

Essa ignição pode ser causada pela mistura de fumaça aquecida com o ar, mas diferencia-se do *backdraft*, pois o movimento é da fumaça em direção ao ar, e não o contrário. A mais comum, porém, é a ignição da fumaça ao entrar em contato com uma fonte de calor, a qual pode ter onda de choque ou não.

Ao se movimentar por um duto, um forro, ou ainda ser expulsa do ambiente pela ventilação, a fumaça pode ignir quando entra em contato com uma fonte de calor.

Isso irá requerer das guarnições de combate a incêndio e de salvamento toda a atenção possível quanto ao comportamento da fumaça no ambiente.

Mesmo com pouca fumaça visível no ambiente, é possível ocorrer sua ignição. Com pouco tempo de suspensão, parte da fuligem desce e a fumaça clareia, mas continua inflamável, bastando uma fonte de calor suficiente para deflagrá-la.

A ignição da fumaça ocorre principalmente em decorrência de:

- colapso de estruturas – a fumaça é empurrada com a queda de paredes e/ou do teto, entrando em contato com uma fonte de calor em outro ambiente;
- faiscamento – seja de motores ou de equipamentos elétricos no ambiente onde há fumaça;
- ação de rescaldo – se for feito sem cuidado, as brasas resultantes do incêndio serão expostas pelos bombeiros e poderão ignir a fumaça acumulada;
- uso incorreto da ventilação de pressão positiva – se não for utilizada da forma correta, a ventilação pode empurrar a fumaça para outro ambiente onde haja uma fonte de calor; o uso correto do ventilador de pressão positiva será abordado no Módulo 3 deste manual;
- uso do jato compacto contínuo – devido à sua força, o jato pode empurrar a fumaça para outro ambiente até uma fonte de calor capaz de deflagrá-la;
- saída de fumaça superaquecida durante a ventilação ou após a abertura de porta – por esse motivo, a fumaça deve ser resfriada por linha de mangueira na saída de ventilação; deve haver linhas de mangueira de apoio nas

aberturas de portas e janelas. Esses assuntos serão tratados no módulo 3 deste manual.

Uma das medidas mais eficientes para evitar a ignição da fumaça é **não permitir o seu acúmulo no ambiente**, ainda que as chamas já tenham sido debeladas. Isso exigirá um cuidado constante por parte dos bombeiros, inclusive na fase do rescaldo.

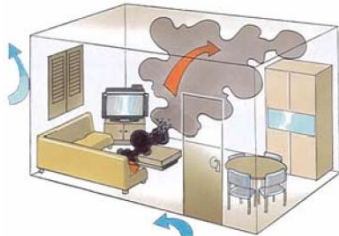
6.4. Síntese dos fenômenos de explosão da fumaça e generalização do incêndio

A Tabela 21 apresenta como ocorre o desenvolvimento da explosão da fumaça (*backdraft*) e da generalização do incêndio (*flashover*).

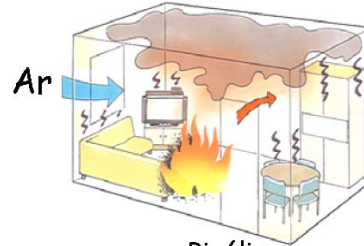
Tabela 21 - Síntese dos fenômenos *backdraft* e *flashover*

Explosão da Fumaça (*backdraft*)

Generalização do incêndio (*flashover*)



Chamas no foco inicial;
muita produção de fumaça



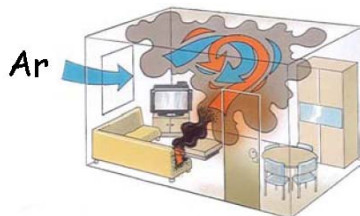
Pirólise
Ambiente aberto



Ambiente fechado



Desenvolvimento da camada de fumaça
no teto



Abertura da janela, com entrada de ar no
ambiente



Pré-generalização do incêndio; fumaça
espalhando-se horizontalmente



Explosão da fumaça



Chamas rolando (*rollover*)



Generalização do incêndio

6.5. Diferenças entre os comportamentos extremos do fogo

A tabela abaixo estabelece algumas das principais diferenças entre *flashover*, *backdraft* e ignição da fumaça.

Alguns autores citam que um bombeiro pode passar sua vida profissional inteira para presenciar uma só vez um *backdraft*, enquanto que o *flashover* provavelmente será presenciado com frequência. Entretanto, é importante que se saiba como prevenir e combater um *backdraft*, uma vez que suas conseqüências são muito mais sérias que as do *flashover*.

Tabela 22 - Principais diferenças entre os comportamentos extremos do fogo

| <i>Flashover</i> | <i>Backdraft</i> | <i>Ignição da Fumaça</i> |
|---|--|--|
| Ocorre com frequência | Não ocorre com frequência | Ocorre com frequência |
| Não ocorre explosão | É uma explosão | Pode ou não ser uma explosão |
| Não possui ondas de choque | Possui ondas de choque | Possui ou não ondas de choque |
| É um efeito que se mantêm | É um efeito momentâneo | É um efeito momentâneo |
| Ocorre por causa do calor irradiado pela camada de fumaça | Ocorre por causa da entrada de ar (oxigênio) no ambiente | Ocorre pelo contato da fumaça com uma fonte de calor |

Explosões acontecem de forma rápida, algumas vezes tão rápida que não permitem que os bombeiros consigam proteger a si mesmos. A única proteção real são os equipamentos de proteção

individual (capacetes, capuz, luvas, botas, calças e capas de aproximação e os equipamentos de proteção respiratória).

Eles podem aumentar a sensação de calor do usuário, serem incômodos e, até mesmo, atrasarem os movimentos de quem os utiliza, mas, na ocorrência de um fenômeno desses, determinam a sobrevivência dos bombeiros ou a gravidade dos danos.

Estando cientes do que pode ocorrer ao abordar um incêndio, os bombeiros têm condições de aprender as diferentes formas de combatê-lo. Para isso, os treinamentos e a capacitação, que devem ser constantes na vida profissional do combatente, seguirão o prescrito no Módulo 3 do presente manual, que trata das técnicas de combate a incêndio.

Bibliografia

BOWSER, Graeme, *Tactical Ventilation*, Inglaterra: Tyne & Wear Fire Brigade. Disponível em http://www.tempest-edge.com/img/download_docs/ppv_training/Tactical_ventilation.doc

DEEHAN, John D., *Kirk's Fire Investigation*, 5ª edição, EUA: Prentice Hall, 2002.

DRYSDALE, Dougal, *An Introduction to Fire Dynamics*, 2ª edição, EUA: John Wiley & Sons, 1999.

DUNN, Vicent, *Command and Control of Fires and Emergencies*, EUA: Fire Engineering Books, 2000.

_____, *Safety and Survival on the Fireground*, EUA: Pennwell Books, 1992.

_____, *Safety Collapse of Burnings Buildings: A Guide to Fireground Safety*, EUA: Pennwell Books, 1988.

FREITAS, Oswaldo Nunes e SÁ, José Marques de, *Manual Técnico Profissional para Bombeiro*, Brasil: CBMDF, 2005.

GRIMWOOD, P. & DEMEST, K. *Tactical Firefighting*, versão 1.1, Inglaterra: CEMEC, 2003. Disponível em <http://www.firetactics.com/CEMAC-KD-PG-2003-2.pdf>

HADJISOPHOCLEOUS, G.V. E RICHARDSON, J.K., *Water Flow Demands for Firefighting*, *Fire Technology*, 41, 172-192, 2005, com base em estudo de 1983.

INGASON, Haukur, *Positive Pressure Ventilation in Single Medium-Sized Premises*, *Fire Technology* nº38, 213-230, Estados Unidos, 2002.

KARLSSON, Björn e QUINTIERE, James G., *Enclosure Fire Dynamics*, EUA: CRC, 1999.

OLIVEIRA, Marcos de, *Manual de Estratégias, Táticas e Técnicas de Combate a Incêndio Estrutural – Comando e Controle em Operações de Incêndio*. Brasil: Editora Editograph, 2005.

QUINTIERE, James G., *Principles of Fire Behavior*, EUA: Thomson Delmar Learning, 1997.

Sapeur Pompier, *La Fumée, c'est comix*, França.

Sous-direction des sapeurs-pompiers – BFASC, *Le guide national de référence Explosion de fumées – Embrassement généralisé éclair*. França, 2003. Disponível em http://www.interieur.gouv.fr/sections/a_l_interieur/defense_et_securite_civiles/sapeurs-pompiers/doctrines-techniques-prof/gnr-techniques-pro/GNR_explosion_de_fumees_-_embrassement_generalise_eclair.pdf/downloadFile/file/GNR_explosion_de_fumees_-_embrassement_generalise_eclair.pdf?nocache=1160651198.46

SVENSON, Stefan. *Experimental Study of Fire Ventilation During Fire Fighting Operations*, *Fire Technology* nº37, 69-85, EUA, 2001.

Thomson Delmar Learning, *Firefighter's Handbook, Essentials Of Firefighting and Emergency Response*, 2ª edição, EUA, 2004.