

UCAM – UNIVERSIDADE CANDIDO MENDES

PÂMELA MAÇONETTO PERIPATO

**TAXA DE CALOR LIBERADO (HRR) E O SISTEMA DE WATER SYSTEM NA
SUPRESSÃO DE INCÊNDIO**

**Porto Ferreira – SP
2019**

PÂMELA MAÇONETTO PERIPATO

**TAXA DE CALOR LIBERADO (HRR) E O SISTEMA DE WATER SYSTEM NA
SUPRESSÃO DE INCÊNDIO**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado à Coordenação do Curso de
Pós-Graduação de Engenharia de
Segurança Contra Incêndios e Pânico da
UCAM – UNIVERSIDADE CANDIDO
MENDES.

Orientador: Prof. Ms. Márcio Ferreira

**Porto Ferreira – SP
2019**

“Somos o que fazemos, mas somos, principalmente,
o que fazemos para mudar o que somos.”
Eduardo Galeano

RESUMO

O trabalho apresenta um estudo que determina previamente a supressão de incêndio em sua fase inicial ou fase de desenvolvimento evitando maiores danos ao patrimônio.

A metodologia empregada constitui-se de pesquisa em literatura técnica para levantamento de associações entre a taxa de calor liberado e os acionamentos dos sistemas de supressão de incêndio. O sistema de água entre a vasta gama de sistemas de supressão existentes foi escolhido como objeto de estudo mais aprofundado para que sua eficiência seja comprovada.

Palavras-chave: HRR, taxa de calor liberado, supressão de incêndio, sistema de água

ABSTRACT

The paper presents a study that determines the suppression of fire in its initial phase or development phase that causes greater damage to the heritage.

The methodology employed uses technical literature research to survey rates between released heat taxes and fire suppression system drives. The water system among a wide range of existing fire suppression systems has been chosen as the object of further study to prove its efficiency.

Key-words: HRR, released heat rate, fire suppression, water system

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO	7
1. TRANSFERÊNCIA DE CALOR	8
1.1 Condução	8
1.1.1 Propagação do FOGO por condução ou contato	8
1.2 Convecção	9
1.3 Radiação	10
2. DESENVOLVIMENTO DO INCÊNDIO	11
3. SUPRESSÃO DE INCÊNDIO	15
3.1 Supressão de Incêndio e a Transferência de calor	15
3.1.1 O fogo suprimido	17
3.2 Tipos de agentes supressores	21
4. Supressão de Incêndio pelo sistema de Água (WATER SYSTEM)	22
4.1 Extinção com Água	22
4.1.1 Características da Água	22
4.1.2 Água como agente extintor	24
4.1.3 Água e Sprinklers automáticos	26
4.1.4 Controle de Incêndio por sprinklers	27
4.1.5 Spray Safe	30
Conclusão	32
REFERENCIAS	33

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 - Curva desenvolvimento do fogo tradicional.....	11
FIGURA 2 - Triângulo do Fogo e Tetraedro do Fogo com a reação em cadeia.....	12
FIGURA 3 - Efeito do enclausuramento.	13
FIGURA 4 - FLASHOVER , fogo excede 20KW/m ² - temperatura entre 483°C e 649°C.	14
FIGURA 5 - Taxa de calor liberado na curva de supressão.	15
FIGURA 6 – Parâmetros das taxas de liberação de calor para itens de mobiliário.....	19
FIGURA 7 – Velocidade de liberação de calor (HRR) para itens de mobiliário.....	20
FIGURA 8 – Tipos de agentes supressores.	21
FIGURA 9 - Comparação de temperaturas e respostas em diferentes componentes.....	23
FIGURA 10 - Representação do Controle de Incêndio por Sprinklers e taxa de Liberação ...	28
FIGURA 11 – controle simplificado de incêndio / combate de supressão analógico.....	29
FIGURA 12 – Resultados dos testes de calolimetria e seu HRR.	30
FIGURA 13 - Partes protegidas do Spraysafe da estrutura que os bombeiros não podem alcançar.	31

INTRODUÇÃO

As normas nacionais tratam a carga de incêndio como método principal para classificação do risco e determinação do nível de exigência das medidas de segurança contra incêndio. A carga de incêndio é a soma das energias caloríficas possíveis de serem liberadas pela combustão completa de todos os materiais combustíveis em um espaço, inclusive os revestimentos das paredes, divisórias, pisos e tetos. Cada material tem uma capacidade própria de produzir calor em situação de incêndio, que é denominada potencial calorífico.

Essa pesquisa traz um campo no qual considera a taxa de calor liberado no incêndio, e não só a carga dos materiais, como item fundamental para definição e escolha dos elementos que podem contribuir para extinção do incêndio.

Independente do cenário de incêndio, a transferência de calor que rege a curva do desenvolvimento do fogo e nos mostra o Heat release rate (HRR - taxa de transferência de calor), será estudada nos capítulos decorrentes.

A partir deste contexto inicial será apresentado um breve estudo da relação dos sistemas de supressão, em especificidade o sistema de supressão de água (Water system) com a taxa de calor liberado HRR.

1. TRANSFERÊNCIA DE CALOR

Transferência de calor, segundo Holdman (1983, p.23) é energia térmica em trânsito devido a uma diferença de temperaturas no espaço. Sempre que existir diferença de temperatura em um meio ou entre meios haverá transferência de calor.

A transferência de calor ocorre de três formas, sendo: condução, convecção e radiação térmica.

1.1 Condução

A condução é transferência de partículas mais energéticas para as menos energéticas de uma substância devido às interações entre partículas [...] deve então ocorrer na direção da diminuição de temperatura:(BERGMAN, 2008, p. 3)

- Gases, líquidos – transferência de calor dominante ocorre da região de alta temperatura para a de baixa temperatura pelo choque de partículas mais energéticas para as menos energéticas.

- Sólidos – energia é transferência por vibração da rede (menos efetivo) e, também, por elétrons livres (mais efetivo), no caso de materiais bons condutores elétricos.

Geralmente, bons condutores elétricos são bons condutores de calor e vice-versa.

1.1.1 Propagação do FOGO por condução ou contato

O fogo se propaga por condução pelo contato direto das labaredas que passam por aberturas internas existentes nas paredes e lajes, podendo alcançar as aberturas de prédios vizinhos, de acordo com a distância de separação entre eles, ou pelo meio físico em contato nos carpetes, cortinas, móveis entre outros dos ambientes adjacentes. (BRENTANO, p.112)

A equação governante para transferência de calor por condução é:

$$\dot{q} = \frac{kA(T_{Hot} - T_{Cold})}{L}$$

Onde

T é a temperatura (em Kelvin),

A é a área de exposição (metros quadrados),

L é a profundidade do sólido (metros) e

k é uma constante única para diferentes materiais, conhecida como *condutividade térmica* e possui unidades de (Watts / metros * Kelvin).

1.2 Convecção

BRENTANO (2015, p. 04) fundamenta que a propagação do fogo e calor pode se dar por convecção do meio circulante gasoso. Além da transferência de energia devido ao movimento molecular aleatório a energia também é transferida pelo meio global. Tal movimento contribui para a transferência de calor. Essa transferência de calor por convecção ocorre com o contato entre um fluido em movimento e uma superfície, estando os dois a diferentes temperaturas.

Pode ser classificada de acordo com a natureza do escoamento do fluido, sendo:

-convecção forçada - quando o escoamento é feito por meios externos tais como ventilador, uma bomba ou ventos atmosféricos;

-convecção livre (ou natural) - o escoamento do fluido é induzido por forças do empuxo, que são originadas por diferenças de densidade causadas pela variação de temperatura.

O aquecimento atmosférico provoca a circulação rápida pelos ambientes, por convecção, dos produtos gerados pela combustão, que, encontrando aberturas nas paredes e teto, escadas não enclausuradas, janelas da fachada aberta entre outros, atingem ambientes adjacentes e andares superiores. (p. 112)

A equação governante para transferência de calor por convecção é:

$$\dot{q} = h(T_{Hot} - T_{Cold})A$$

Onde T é a temperatura (em Kelvin),

A é a área de exposição (em metros quadrados),

h é uma constante única para diferentes materiais conhecidos como coeficiente de transferência de calor por convecção, com unidades de $W/m^2 \cdot K$.

Esses valores são encontrados empiricamente ou por experimento. Para convecção livre, os valores geralmente variam entre 5 e 25. Mas, para convecção forçada, os valores podem variar de 10 a 500.

1.3 Radiação

Designa-se por radiação térmica, toda a energia radiante emitida na gama de comprimentos de onda 0,1 a 100 μm do espectro eletromagnético. Resulta da emissão e propagação de ondas eletromagnéticas por alteração na configuração eletrônica de átomos e moléculas. Qualquer corpo com uma temperatura superior a 0 K (Kelvin) emite energia radiante. (BRENTANO, p.6)

A transferência de calor por radiação térmica ocorre através de sólidos, líquidos e gases e no vácuo, exceto nos sólidos e líquidos opacos à radiação térmica (que são a maioria).

Em meio a propagação do calor do fogo por radiação térmica ou irradiação se dá por meio destas ondas de calor ou raios caloríficos (infravermelhos) gerados por um corpo aquecido, que irradia em todas as direções através do espaço, semelhantes aos raios luminosos. Um material pode ser aquecido por estar próximo de um fogo ou recebendo calor emitido por radiação dos forros, paredes ou vidros das janelas, aquecendo até a combustão.

A equação governante para transferência de calor por radiação é:

$$\dot{q} = (\epsilon \alpha T_{Hot}^4) A$$

Onde T é a temperatura (em Kelvin),

A é a área de exposição (em metros quadrados),

α é a difusividade térmica (uma medida da rapidez com que um material ajusta sua temperatura para o ambiente, em metros quadrados por segundo)

ϵ é a emissividade (uma medida da capacidade de uma superfície de materiais de emitir energia por radiação).

2. DESENVOLVIMENTO DO INCÊNDIO

A curva de desenvolvimento do fogo tradicional mostra o histórico de um incêndio com combustível limitado. Em outras palavras, o crescimento do fogo não é limitado pela falta de oxigênio. À medida que mais combustível se envolve no incêndio, o nível de energia continua a aumentar até que todo o combustível disponível esteja queimando (totalmente desenvolvido). Então, quando o combustível é queimado, o nível de energia começa a decair. A chave é que o oxigênio está disponível para se misturar com os gases aquecidos (combustível) para permitir a conclusão do triângulo do fogo e a geração de energia. (NIST, 2018)

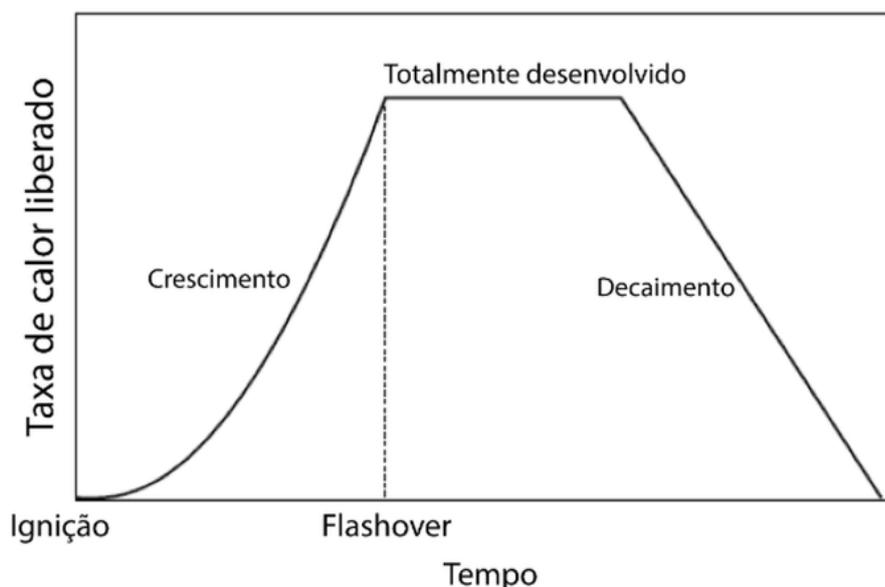


FIGURA 1 - Curva desenvolvimento do fogo tradicional.

Fonte: <http://www.marcioferreira.eng.br/post/design-da-curva-de-incendio> acesso em 05/09/2019

As fases da Figura 1 são descritas como:

Ignição - A fase (1) de crescimento do fogo é entendida como a ignição, capaz de descrever o período em que os quatro elementos do tetraedro (Figura 2) de fogo se unem e dão início à combustão. (IFSTA, 2001) A ignição é o ponto em que o combustível, o oxigênio e o calor se combinam para começar a

combustão.(FERREIRA, 2019). A ignição pode ser pilotada (causada por uma faísca ou chama) ou não pilotada (causada quando o material atinge a sua temperatura de ignição a partir do auto aquecimento), tais como a ignição espontânea (IFSTA, 2001). Durante esta fase, a taxa de calor liberado é insignificante. O fogo pode se auto-extinguir ou passar para a fase de crescimento. (FERREIRA, 2019).

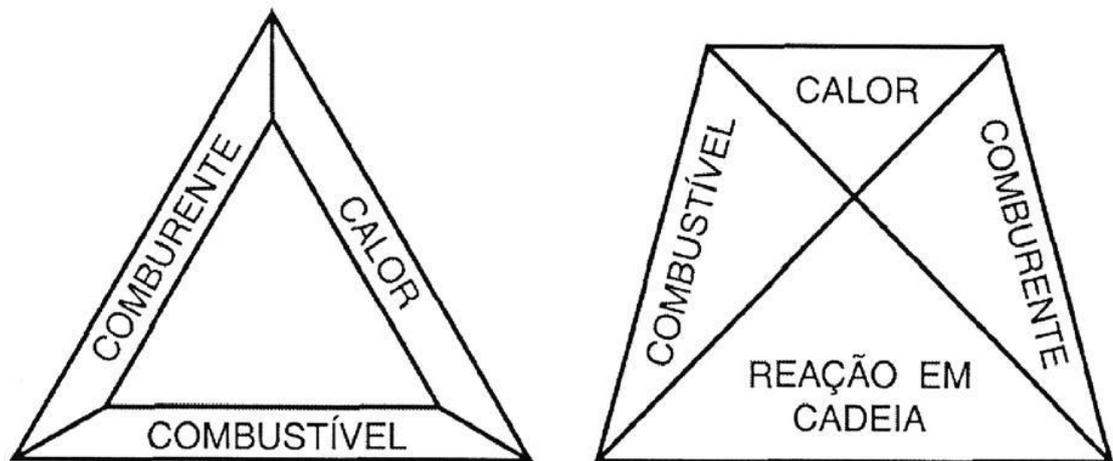


FIGURA 2 - Triângulo do Fogo e Tetraedro do Fogo com a reação em cadeia.

Fonte: <http://segurancaesaudedotrabalho.blogspot.com/2009/08/elementos-que-compoem-o-fogo.html> acesso em 04 de novembro de 2019.

Fase de crescimento - Esta fase começa quando o fogo exibe um aumento na taxa de calor liberado. A propagação da chama é o mecanismo típico que governa o crescimento do fogo. As taxas de propagação da chama dependem do estado da matéria (sólido, líquido, gasoso), bem como o tipo de combustível, configuração / orientação do combustível e direção do fluxo de ar.

O crescimento do fogo também é influenciado pelo feedback do calor das chamas para o superfície do próprio objeto em chamas. (Figura 3). Objetos colocados em um canto ou ao longo de uma parede normalmente crescerá mais rápido que o mesmo objeto localizado no centro de uma sala, longe das paredes. Isto é devido ao feedback radiativo do fogo de volta para si mesmo via reflexão de paredes ou superfícies adjacentes (HURLEY, 2015, p. 56)

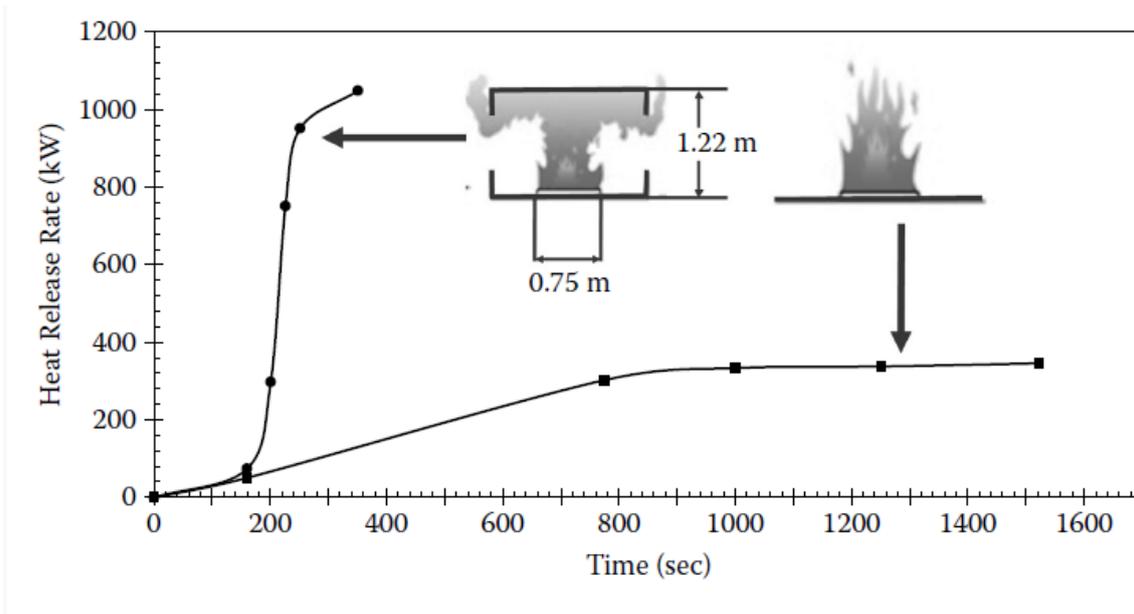


FIGURA 3 - Efeito do enclausuramento.

Fonte: adaptada HURLEY, 2015. P.56

Flashover- sob certas circunstâncias, o fogo pode crescer rapidamente a partir da ignição indireta de combustíveis secundários. À medida que o fogo cresce, a temperatura do compartimento aumenta. Essas temperaturas podem chegar a tal ponto que todos os combustíveis não queimados na sala inflamam quase simultaneamente.

Esta ignição rápida é conhecida como flashover, e o flashover (Figura 4) normalmente ocorre com temperaturas da camada superior entre 500 e 600 ° C (Walton e Thomas, 2008). O Flashover (incêndio generalizado) e ocorre quando toda a carga combustível presente no ambiente entra em ignição. A partir desse instante, o incêndio torna-se de grandes proporções tomando todo o compartimento. A temperatura dos gases se eleva rapidamente até todo material combustível extinguir-se. Em seguida, há redução gradativa da temperatura dos gases. (SEITO, p. 144).



FIGURA 4 - FLASHOVER , fogo excede 20KW/m² - temperatura entre 483°C e 649°C.

Fonte: BLESA, 1995, p. 28

O flashover marca um ponto de transição entre um incêndio em crescimento e um fogo totalmente desenvolvido. Nem todos os incêndios evoluem para flashover.

Totalmente desenvolvido - Uma vez que o incêndio para de crescer, ele passa para o terceiro estágio da curva do fogo: a região totalmente desenvolvida. Neste ponto, as taxas de liberação de calor liberado permanecerão constantes até o fogo crescer novamente ou começar a decair. Quanto tempo o fogo permanecerá nessa fase depende da quantidade de combustível restante, ignição de outros combustíveis, condições de ventilação e início de atividades de supressão manual ou automática.

Decaimento - Todos os incêndios eventualmente se deterioram e queimam, o que representa o estágio final de uma curva de fogo. A fase de decaimento não se limita apenas ao fim de um incêndio. Muitos incêndios são dinâmicos e têm a capacidade de crescer e decair várias vezes devido à quantidade de combustível restante, ignição de outros combustíveis, mudanças nas condições de ventilação e início de atividades de supressão manual ou automática. (FERREIRA, 2019)

3. SUPRESSÃO DE INCÊNDIO

3.1 Supressão de Incêndio e a Transferência de calor

Segundo Gagnon (2008), característica de incêndio é qualquer efeito de incêndio (fumaça, calor, luz) que pode ser detectado por um detector de incêndio. Um incêndio não suprimido pode ser representado por um gráfico que representa o calor liberado pelo fogo em função do tempo, conforme mostrado na figura. A quantidade de calor liberado pelo fogo varia de acordo com o tipo de combustível, disposição do combustível, disponibilidade de oxigênio e vários outros fatores. Outras características do fogo utilizadas na tecnologia de detecção incluem o gráfico da emissão de luz de um incêndio ou o gráfico da liberação de subprodutos específicos da combustão gasosa, como o monóxido de carbono. Um detector bem selecionado pode reconhecer os efeitos de um incêndio e executar conforme especificado, incluindo a iniciação automática de um agente de supressão. (p. 80)

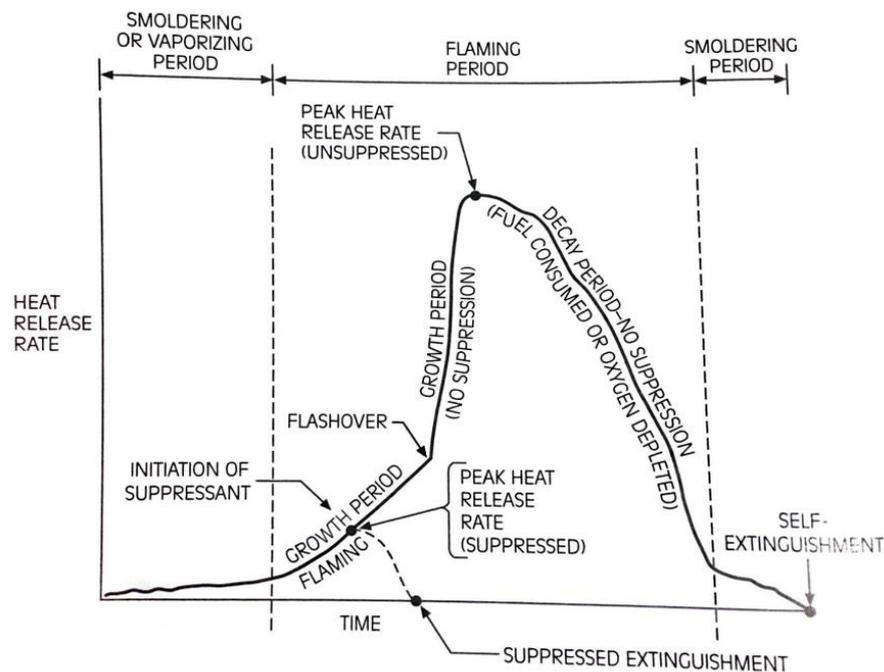


FIGURA 5 - Taxa de calor liberado na curva de supressão.

Fonte: GAGNON, 2008, p.80

Legenda Gráfica:

Taxa de liberação de calor - Heat release rate HRR

Smoldering or vaporizing period - Período de combustão lenta ou vaporizada

Flaming period - Período flamejante

Smoldering period - Período de combustão lenta

Initiation of Suppressant – Growth period Flaming – Peak Heat release Rate (suppressed) – suppressed extinguishment - Início do supressor - Período de crescimento - Chama - Taxa de pico de liberação de calor (suprimida) - extinção suprimida

Flash-over

Growth period (No suppression) - Período de crescimento (sem supressão)

Peak heat release rate (unsuppressed) – decay period (No suppression) fuel consumed or oxygen depleted - Taxa de pico de liberação de calor (não suprimida) - período de decaimento (sem supressão) de combustível consumido ou de oxigênio esgotado

Self extinguishment - Auto-extinção

Uma taxa de queima para um fogo não suprimido consiste em três períodos, conforme mostrado na figura 5.

1 período de combustão lenta ou vaporizada

2 período flamejante (que inclui o período de crescimento e o período de decaimento)

3 período de combustão lenta pós-incêndio

A duração do período de combustão lenta ou vaporizada depende do tipo de combustível, configuração do combustível, quantidade de calor aplicado e quantidade de oxigênio disponível. Um incêndio iniciado por um cigarro preso entre as almofadas dos assentos pode arder por horas, enquanto uma explosão de poeira ou ignição pilotada de um líquido inflamável ou combustível pode ocorrer em milissegundos.

Uma vez iniciado o período de crescimento de um incêndio não suprimido, ele continua a crescer até que a taxa de pico de liberação de calor seja atingida. A realização da taxa máxima de liberação está normalmente

associada ao envolvimento total de todos os combustíveis no processo de combustão.

O período de decaimento ocorre quando o combustível consumido pelo fogo em um incêndio regulamentado por combustível ou quando o oxigênio se esgota em um incêndio regulado pelo ar. O período de decaimento prossegue para o período de combustão lenta pós-flamejante e continua até que o fogo esteja completamente apagado.

3.1.1 O fogo suprimido

GAGNON (2008) afirma que quando um agente de supressão de incêndio é aplicado efetivamente, a taxa de queima de incêndio suprimida, mostrada como uma linha pontilhada abaixo da taxa de queima de fogo não suprimida na Figura 5, pode ser alterada dramaticamente perante taxa de queima de fogo não suprimida. A mudança na taxa de queima começa instantaneamente após a entrega efetiva de um agente de supressão ao fogo. A eficácia do agente de supressão depende da vazão da quantidade, do método de entrega e aplicação do supressor ao fogo e também pode ser afetada por fatores como vento, nível de oxigênio ou temperatura do ambiente. A entrega do agente de supressão é iniciada por um detector que reconhece a alteração na taxa de queima ou outras alterações como uma assinatura de incêndio que garante o detector.

A administração eficaz do supressor pode reduzir drasticamente o período de crescimento do fogo, resultando em uma taxa de liberação de pico significativamente mais baixa que o fogo não suprimido. (GAGNON, p. 81)

A resposta do detector deve ocorrer quando o fogo atinge uma taxa crítica de liberação de calor ou em um determinado local. (NFPA-72, p. 929)

A transferência de calor para um detector pode ser descrita pela seguinte equação:

Onde:

$$Q_{total} = Q_{cond} + Q_{conv} + Q_{rad}$$

Onde:

Q_{total} = transferência total de calor para um detector (kW ou Btu / s)

Q_{cond} = transferência de calor condutora

Q_{conv} = transferência de calor por convecção

Q_{rad} = transferência de calor por radiação

Como a detecção geralmente ocorre durante os estágios iniciais de um incêndio, o calor radiante componente de transferência (Q_{rad}) pode ser considerado insignificante. Além disso, porque o sensor de calor os elementos da maioria dos detectores de calor são isolados termicamente do restante da detecção unidade, bem como do teto, pode-se supor que a porção condutora do calor. A taxa de liberação (Q_{cond}) também é insignificante, principalmente quando comparada à transferência de calor por convecção. Como a maior parte da transferência de calor para o elemento de detecção é por convecção, a seguinte equação pode ser usada para calcular a transferência total de calor:

$$Q = Q_{conv} = HcA (T_g - T_d)$$

Onde:

Q_{conv} = transferência de calor por convecção (kW ou Btu / s)

Hc = coeficiente de transferência de calor por convecção para o detector (kW / m² · °C ou Btu / ft² · seg · °F)

A = área da superfície do elemento do detector (m² ou ft²)

T_g = temperatura dos gases de incêndio no detector (°C ou °F)

T_d = classificação de temperatura ou ponto de ajuste do detector (°C ou °F)

Qualquer material combustível pode assumir o aumento de sua temperatura em função do quadrado do tempo. Isso se refere ao incêndio "t²". Essa escala de crescimento constante pode demonstrar várias taxas de crescimento do incêndio, de muito baixas a muito altas, dependendo do tipo de combustível envolvido (BONITESE, p. 52).

A taxa de liberação de calor Q (MW) para incêndio "t²" é dada pela Equação:

$$Q = [t / k]^2$$

Sendo:

t - o tempo (em segundo);

k - constante de crescimento (s / MW^{1/2}), onde s é o tempo em segundo.

Para a proposta da engenharia de segurança contra incêndio, convencionam-se os valores para k , em modelos de incêndio real, adotados na

Tabela 3.6. O valor de k é o tempo em segundo para o fogo alcançar a produção de calor de 1MW.

Originalmente desenvolvido na década de 1970 para prever a ativação do detector de incêndio, o fogo t^2 ganhou popularidade quando foi incluído no apêndice da NFPA-72E (agora NFPA-72) com três categorias para crescimento de fogo sendo lento, médio e rápido. Essas definições são simplesmente determinadas pelo tempo necessário para o incêndio atingir 1,05 MW.

Um fogo lento é definido como demorar 600 segundos (10 minutos), um fogo médio 300 segundos (5 minutos) e um fogo rápido menos 150 segundos para atingir 1,05 MW (arredondado para 1,00 MW. (BUCHANAN, p. 32)

A taxa de liberação de calor descritas anteriormente, nas condições do incêndio “ t^2 ”, é mostrada na Figura 6.

Taxa de crescimento do fogo	k (s / MW ^{1/2})	Fontes típicas
Baixo	600	Piso de madeira sólida com orientação horizontal.
Médio	300	Móvel sólido de madeira, como mesas.
Rápido	150	Mobiliário de madeira leve, como armário de compensado.
Ultra-rápido	75	Mobiliário acolchoado.

FIGURA 6 – Parâmetros das taxas de liberação de calor para itens de mobiliário (exemplos).

Fonte: adaptada de BONITESE, 2007, p.52.

O fogo pode ser considerado crescente de acordo com a curva “ t^2 ” até o combustível ser consumido ou até a taxa de liberação de calor alcançar um valor de pico esperado para aquele combustível em particular. (BONITESE, p. 53).

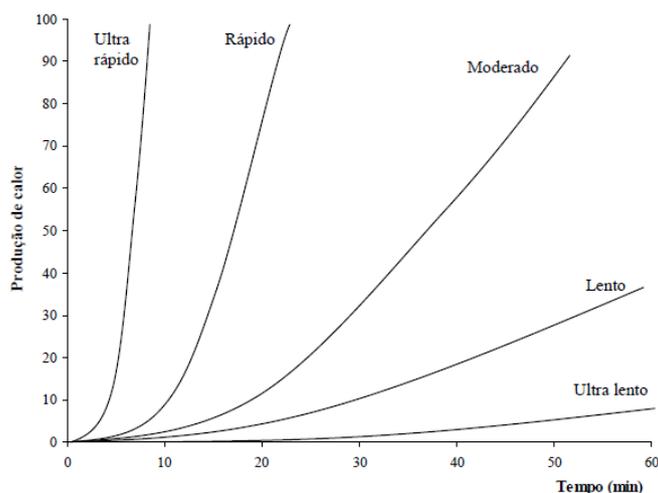


FIGURA 7 – Velocidade de liberação de calor (HRR) para itens de mobiliário.

Fonte: adaptada de BONITESE, 2007, p.53.

A NFPA-2008 considera que um ou mais dos seguintes mecanismos - mais frequentemente ou vários deles simultaneamente – podem ser utilizado para extinguir um incêndio: (p. 2389)

- Separando fisicamente a substância combustível da chama;
- Remoção ou diluição do suprimento de oxigênio;
- Reduzindo a temperatura do combustível ou da chama;
- Introdução de compostos que modificam a química da combustão;

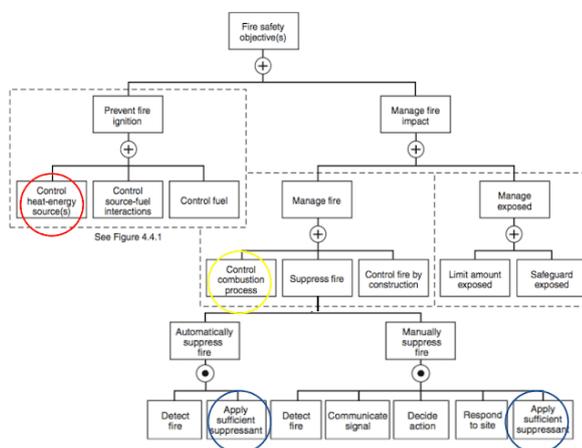
Exemplificando quando a água é aplicada ao fogo de um sólido combustível queimando no ar, vários mecanismos de extinção estão envolvidos simultaneamente. O sólido é resfriado por contato com água, fazendo com que sua taxa de pirólise ou gaseificação diminua. A chama gasosa é resfriada, causando uma redução de calor para o sólido combustível e uma redução correspondente no nível endotérmico taxa de pirólise. É gerado vapor que, sob algumas condições confinadas, pode impedir o oxigênio de alcançar o fogo. A água na forma de neblina também pode bloquear a transferência de calor por radiação.

Como outro exemplo, considere a aplicação de um cobertor de espuma aquosa em uma piscina em chamas de líquido inflamável. Vários mecanismos podem operar. A espuma evita que o calor radiante do fogo atingindo a superfície e fornecendo o calor necessário à vaporização. Se o ponto de incêndio do inflamável líquido é mais alto que a temperatura da espuma, o

líquido é resfriado e sua pressão de vapor diminui. Se o líquido inflamável é solúvel em água, como álcool, então, por um terceiro mecanismo, ele será diluído pela água da espuma e a pressão de vapor do combustível será reduzido.

Idealmente, qualquer teoria de extinção de incêndio totalmente bem-sucedida deve ser capaz de prever a quantidade e taxa de aplicação do agente extintor necessário para um determinado incêndio. Tal teoria seria melhor com medições empíricas que produzem a mesma informação, porque os dados empíricos só serão totalmente confiáveis em circunstâncias idênticas às empregadas nos testes. Além disso, a teoria forneceria orientações para melhorar o desempenho da extinção. Infelizmente, os agentes mencionados acima - água, espuma e pó químico - trabalham cada um com uma combinação de vários mecanismos e a importância relativa das várias contribuições varia com as circunstâncias. (NFPA 2008, p. 2391)

3.2 Tipos de agentes supressores



- 1- Clean Agent – Removing Heat (Red)
- 2- Aerosol Systems – Interrupt The Chemical The Flame Chemistry Of Combustion Chain Reactions (Yellow)
- 3- Chemical Systems - Interrupt The Chemical The Flame Chemistry Of Combustion Chain Reactions (Yellow)
- 4- Water Mist Systems – Removing Heat; Cutting Off Or Diluting The Oxygen Supply (Yellow)
- 5- Carbon Dioxyn Systems –Cutting Off Or Diluting The Oxygen Supply (Yellow)
- 6- Water Spray Systems – Removing Heat (Red)
- 7- Foam Systems – Blanketing Or Removing Diluting The Fuel (Yellow)

FIGURA 8 – Tipos de agentes supressores.

Fonte: adaptada de FERREIRA, 2019.

A figura 8 mostra os tipos de agentes supressores esquematizado nos objetivos da segurança contra incêndio.

1- Agente limpo -Remoção de Calor (Vermelho)

2- Sistemas de aerossol - Interromper o produto químico. A química da chama da cadeia de combustão (Amarelo)

3- Sistemas Químicos - Interrompa o produto químico. A química da chama da combustão Reações em cadeia (Amarelo)

4- Água Sistemas de névoa - Remoção de Calor; Cortando ou diluindo o suprimento de oxigênio (Amarelo)

5-Carbon Dioxyn Systems- Cortando ou diluindo o suprimento de oxigênio (Amarelo)

6-Sistemas de Pulverização de Água - Remoção de Calor (Vermelho)

7- Sistemas de espuma - Cobertor ou remoção diluindo o combustível

4. Supressão de Incêndio pelo sistema de Água (WATER SYSTEM)

4.1 Extinção com Água

A NFPA 2008 supõe que a água é o meio de extinção mais utilizado no combate à incêndio por causa de seu baixo custo e disponibilidade imediata, em relação a outros líquidos. No entanto, além dos custos e disponibilidade, a água é superior a qualquer outro líquido conhecido combatendo a maioria dos incêndios. (p. 257)

4.1.1 Características da Água

A água tem um calor muito alto de vaporização por unidade de massa, pelo menos quatro vezes superior ao de qualquer outro líquido não inflamável.

Também é extraordinariamente não tóxica, mesmo um líquido quimicamente inerte, como nitrogênio líquido pode causar asfixia e a água não. [...] A água pode ser armazenada à pressão atmosférica e a temperaturas

normais. Está fervendo no ponto - 212 ° F (100 ° C) - está bem abaixo dos 482 ° F (250 ° C) da faixa de temperaturas de pirólise de 842 ° F (450 ° C) para a maioria dos sólidos combustíveis e, portanto, o resfriamento evaporativo da pirólise superfície é eficiente. Nenhum outro líquido, independentemente do custo, pode coincidir com essas propriedades. (NFPA 2008, p. 258)

No entanto, a água não é absolutamente agente extintor perfeito. Congela abaixo de 32 ° F (0 ° C). Conduz eletricidade. Pode danificar irreversivelmente alguns itens, embora, em muitos casos, seja prático recuperar os danos causados pela água. Quando aplicado a granel ou em sprays que consistem em gotas grandes, a água pode não ser eficaz para líquidos inflamáveis. A água não é compatível com certos metais quentes ou certos produtos químicos. Em incêndios em esses materiais, outros agentes, por exemplo, espuma aquosa, gases inerte, halocarbonetos ecológicos e produtos químicos secos, são preferidos. (p. 259)

Temperatura ° C (° F)	Resposta
37,0 ° C (98,6 ° F)	Temperatura média oral / corporal humana normal ¹
38 ° C (101 ° F)	Temperatura básica do corpo de um bombeiro que trabalha ²
43 ° C (109 ° F)	Temperatura central do corpo humano que pode causar a morte ³
44 ° C (111 ° F)	Temperatura da pele humana quando a dor é sentida ⁴
48 ° C (118 ° F)	Temperatura da pele humana causando lesão de queimadura de primeiro grau ⁴
54 ° C (130 ° F)	A água quente causa uma queimadura por queimadura com 30 s de exposição ⁵
55 ° C (131 ° F)	Temperatura da pele humana com formação de bolhas e queimaduras de segundo grau ⁴
62 ° C (140 ° F)	Temperatura quando o tecido humano queimado fica entorpecido ⁴
72 ° C (162 ° F)	Temperatura da pele humana na qual o tecido é destruído instantaneamente ⁴
100 ° C (212 ° F)	Temperatura quando a água ferve e produz vapor ⁶
250 ° C (482 ° F)	Temperatura quando começa a carbonização do algodão natural
> 300 ° C (> 572 ° F)	Os tecidos modernos de vestuário de proteção sintética começam a char ⁷
≥400 ° C (≥752 ° F)	Temperatura dos gases no início do flashover da sala ⁸
0001000 ° C (≈1832 ° F)	Temperatura dentro de uma sala em flashover ⁸

FIGURA 9 - Comparação de temperaturas e respostas em diferentes componentes.

Fonte: <https://www.nist.gov/el/fire-research-division-73300/firegov-fire-service/fire-dynamics>, acesso em 28 de setembro de 2019

A água pode extinguir um incêndio por uma combinação de mecanismos:

- resfriamento do combustível sólido ou líquido;
- diluindo líquidos inflamáveis solúveis em água;
- resfriando a própria chama;
- gerando vapor que impede o acesso ao oxigênio;
- como nevoeiro, bloqueando transferência radiativa.

Embora todos esses mecanismos possam contribuir para a extinção, provavelmente o mais importante é resfriar um combustível gaseificante. (NFPA 2008, p.257)

Para que um sólido queime, uma parte do sólido deve estar em um nível alto e com temperatura suficiente para que a pirólise ocorra a uma taxa suficiente

para manter a chama. Para a maioria dos sólidos, essa temperatura é de 572 ° F (300 ° C) a 752 ° F (400 ° C), e a taxa de pirólise deve ser de alguns gramas por metro quadrado por segundo. [...] Se mesmo uma pequena quantidade de água líquida, com seu alto calor de vaporização, pode atingir essa região, o sólido pode ser resfriado o suficiente para reduzir ou parar a pirólise e a chama será extinta. Mesmo profundamente arraigado os incêndios podem ser suprimidos dessa maneira. Consequentemente, a água é a principal escolha de agente para queima de sólidos. (p. 257)

4.1.2 Água como agente extintor

Os dois meios mais comuns de aplicação de água como agente extintor são:

- (1) um fluxo contínuo ou spray de uma mangueira e
- (2) spray de aspersores (sprinklers).

Segunda a NFPA-2008 As condições de extinção são determinadas pela taxa de aquecimento e taxa de aplicação de água necessária para a extinção.

Para exemplificar os termos acima, a NFPA-2008 diz que para extinguir a queima do metacrilato de polimetil deve ser aplicada água suficiente para reduzir a taxa de queima para menos de cerca de 4 g / m² · seg. Dependendo

da intensidade do fluxo radiativo imposto externamente - até $18 \text{ kW} / \text{m}^2$ - era necessária uma taxa de aplicação de $1,5 \text{ g} / \text{m}^2 \cdot \text{seg}$ a $8 \text{ g} / \text{m}^2 \cdot \text{seg}$. este é uma taxa de aplicação de água muito pequena. Para extinção sem fluxo radiativo externo, era necessário apenas pulverizar água suficiente para que o calor absorvido por sua vaporização fosse 3% do calor da combustão. (p. 260)

Experimentos com outros plásticos e berços de madeira têm dados resultados semelhantes: apenas algumas gramas por metro quadrado por um segundo de água deve ser aplicado na superfície ardente para causar extinção e a taxa de absorção de calor pela água é apenas alguns por cento da taxa de geração de calor pelo fogo antes da aplicação da água.

A razão para essa alta eficiência é bem compreendida.

Considere uma placa horizontal de polimetilmetacrilato, $0,3 \text{ m} \times 0,3 \text{ m}$, que está queimando constantemente em sua superfície superior. Medições mostraram que apenas cerca de 12% da energia e um metano de 9,5% liberado por combustão é transferido de volta para a superfície. Quando essa energia que chega à superfície, principalmente pela radiação da chama, cerca de 40% é redirecionada do calor da superfície para os arredores e apenas 60% de 12%, ou 7% da energia de combustão disponível é usada para decompor e gaseificar o plástico. Só é necessário aplicar água suficiente para a superfície drenar uma porção substancial desses 7% da energia de combustão e a taxa de queima

é então reduzida a um ponto em que a chama não pode mais se sustentar.

A morfologia de um combustível, a configuração e organização de armazenamento afetam os aspectos críticos fluxo de água para extinção de incêndio devido à influência do calor, mesmo que o combustível em cada armazenamento é feito do mesmo material base. É necessário um maior fluxo de água quando houver um fluxo radiante imposto mais alto na queima da superfície.

Obviamente, a evaporação da água produz vapor que dilui a chama e reduz a temperatura da chama, causando alguma redução na taxa de queima, mas esse efeito geralmente é pequeno (exceto quando a água é aplicada na forma de névoa) e não precisa ser considerado em um modelo de primeira aproximação do processo de extinção.

No combate prático ao fogo, a água deve ser aplicada de 10 a 100 vezes as taxas usadas na pesquisa descrita acima. (NFPA 2008, p. 265)

4.1.3 Água e Sprinklers automáticos

No caso de combate a incêndio pelo uso de aspersores (sprinklers) no teto, a NFPA 2008 considera possível calcular a fração das gotas de água capazes para penetrar uma coluna de fogo e chegar à superfície ardente abaixo.

Esse cálculo é complexo. É necessário saber a distribuição da taxa de liberação de calor em relação à localização dos sprinklers e várias funções e distribuições diferentes de jatos de água. Isso inclui as distribuições angulares de tamanho da gota, fluxo de água e velocidade da gota no ou próximo ao sprinklers defletor, que geralmente são desconhecidos e precisam ser determinados indiretamente, combinando os resultados calculados com o spray mais a jusante, onde as medições são possíveis.

Como resultado, esses cálculos até o momento sempre têm uma incerteza em relação à condição inicial real do spray de aspersão. (p. 2375)

Embora seja possível equipar os sistemas de aspersão com sistemas elaborados de detecção destinados a reconhecer outros produtos ou assinaturas de incêndio, é a detecção de calor que serve como base dos sprinklers e a resposta do sistema.

Como a combustão é um processo exotérmico, a queima de combustíveis produz calor. Mesmo incêndios fumegantes produzem calor, embora o nível de calor possa ser tão baixo que seja ineficaz no acionamento térmico detectores. No entanto, incêndios fumegantes geralmente se desenvolvem em um estágio flamejante antes de produzir condições insustentáveis. Quando o fogo atinge o estágio de chamas, a taxa de liberação de calor do fogo será crescer de maneira relacionada à natureza do combustível e seu arranjo, às condições de ventilação, e outros fatores. (p. 2376)

A transferência de calor por convecção é mais importante na ativação de sprinklers. [...] A transferência envolve transferência de calor através de um meio circulante que, no caso de sprinklers de incêndio, é o ar da sala. O ar aquecido pelo fogo sobe em uma pluma, arrastando outro ar ambiente à

medida que sobe. Quando a pluma atinge o teto, geralmente se divide para produzir um jato de gás no teto (NFPA 2008, p. 257)

A NFPA-2008 define vários termos para prever o tempo de resposta do sprinkler. (p. 2377)

Uma é a constante de tempo τ (tau), que é uma medida da temperatura térmica sensibilidade de um corpo e é definido como:

$$\tau = mc / hca$$

Onde

m = massa do corpo

c = calor específico do corpo

hc = Coeficiente de transferência de calor por convecção

a = Área do corpo exposta ao fluxo de gás

A constante de tempo possui unidades de segundos, mas não pode ser determinada prontamente para qualquer organismo específico devido as dificuldades em estimar o coeficiente de transferência de calor por convecção. Este termo varia com a velocidade dos gases que passam pelo corpo. Como um resultado, a constante de tempo é medida usando um aparelho de teste de mergulho, primeiro desenvolvido para uso com sprinklers em 1976. Este aparelho geralmente consiste em um forno de circulação de ar com uma a temperatura nominal de operação do sprinkler.

No momento $t = 0$, um sprinkler é "mergulhado" no ar aquecido.

A quantidade de tempo que leva para o aspersor operar é registrada e presume-se que seja o tempo necessário para o funcionamento do mecanismo para passar da temperatura ambiente para a nominal. (p. 2376)

4.1.4 Controle de Incêndio por sprinklers

O método tradicional pelo qual os sistemas de sprinklers controlam, atualmente, os incêndios estão sendo chamados de abordagem de "controle de incêndio". A NFPA-2008 conceitua este método e prevê que um número de sprinklers seja aberto ao redor da área de incêndio. Embora estes trabalhem imediatamente sobre o fogo podem não ser capazes de realmente extingui-lo.

(p. 2453) Eles trabalharão com outros sprinklers abertos, em conjunto, para resfriar a atmosfera.

Enquanto isso, nos sprinklers abertos fora da área de incêndio imediato também podem ser despejados combustíveis adjacentes, ajudando a impedir a propagação do fogo. Nesta condição de estado estacionário, dois balanços de energia separados devem ocorrer. Ao nível do combustível, a água que chega ao fogo deve ser capaz de reduzir a taxa de combustão até o ponto em que, em combinação com os combustíveis adjacentes, o incêndio não se espalhará. Simultaneamente, no nível mais alto, o efeito de resfriamento do jato de água dos sprinklers abertos deve ser suficiente para absorver o calor da pluma de fogo, de modo a impedir a operação de sprinklers adicionais e para manter temperaturas abaixo daquelas que resultariam em danos estruturais para o prédio. (p. 2454)

Na condição de controle de incêndio, a área sobre a qual os sprinklers abertos trabalham geralmente excede a área máxima do incêndio.

Com os sprinklers operando no modo de controle de incêndio, o pacote central de combustível acaba eventualmente e o fogo é extinto.

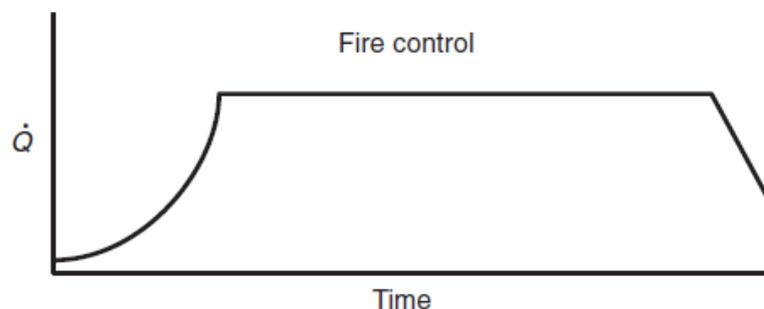


FIGURA 10 - Representação do Controle de Incêndio por Sprinklers e taxa de Liberação de Calor (\dot{Q}).

Fonte: NFPA N° FPH2008, p. 2381.

Vários estudos foram feitos sobre a aplicação da água e a taxa necessária para extinguir ou controlar incêndios em ambientes totalmente ventilados.

Reduzir drasticamente a taxa de liberação de calor de um incêndio e impedir seu rebrota por meio de aplicação suficiente de água através da pluma de fogo na superfície do combustível em chamas.

O termo supressão de incêndio é de natureza qualitativa, porque não especifica até que ponto - por exemplo, 10% ou 50% - a taxa de liberação de calor deve ser reduzida para obter a supressão. (p. 2382)

O conceito de supressão de incêndio foi totalmente realizado na tecnologia do sistema de aspersão na primavera de 1988 quando o primeiro sprinkler foi introduzido.

Um sprinkler pode atingir uma redução de 100% da taxa de liberação de calor, ou seja, extinção completa, de um material de celulose de queima livre, como madeira, localizado no centro de uma sala, se houver fogo, especialmente a área próxima à ignição não está protegida contra a descarga de sprinklers. Por outro lado, se um material plastificado armazenado com 3,0 m de altura está queimando com a fonte de ignição próxima ao chão e o fogo está parcialmente protegido do sprinkler, porque o material é armazenado em paletes de madeira, reduzindo a temperatura taxa de liberação de calor a 100% é mais provável. O grau em que um incêndio é protegido do sprinkler e sua descarga é um fator chave que afeta a capacidade de um sistema de aspersão de suprimir um incêndio.

A Figura 10 mostra uma curva simplificada da taxa de liberação de calor e como ela seria afetada por um sprinkler, sistema projetado para controle de incêndio versus um projetado para combate a incêndio. (NFPA-72, p.27)

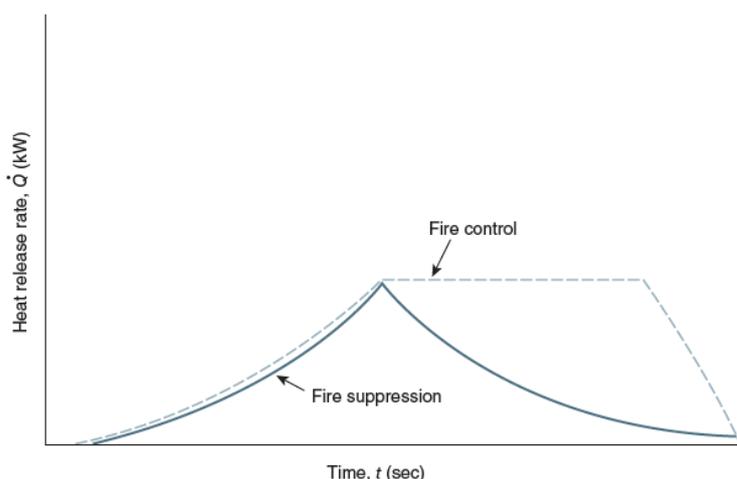


FIGURA 11 – controle simplificado de incêndio / combate de supressão analógico

Fonte: NFPA-72 Automatic Sprinkler Systems Handbook. 2016, p.27.

Persson (1993, p.15) apresenta alguns dados básicos de testes de classificação de resposta do funcionamento dos sprinklers com diversos materiais e duas densidade de água descritos na Figura 11 abaixo.

Alguns testes também foram encerrados porque a capacidade do Calorímetro da Indústria era excedido. Mais adiante e devido ao comportamento de algumas das mercadorias testadas, alguns testes foram realizados usando uma densidade da água que não é especificada.

Consequentemente, não existem valores de classificação "reais" para esses testes e conclusões 100% comprovadas.

Test commodity	Test no	Delivered Density (mm/min)	Nozzle operation (min:s)	Conv RHR at nozzle operation (kW)	Test duration (min:s)	Commodity consumed (%)
Paper cartons	6	8.5	2:08	3760	21:00	50
	16	12.6	2:04	3850	21:00	40
Magazine files	5	8.5	1:56	3730	6:07 *	95
	18	10.5	1:44	3760	23:00	75
	4	12.6	1:52	3850	19:00	30
Upholstery cushions	1	15.9	1:38	4050	16:00	90
	17	20.8	1:44	4110	16:15	70
PS Chips	13	15.9	1:08	5830	8:20	99
	14	20.8	1:08	5240	8:45	99
	15 **	20.8	0:40	1140	6:00	25
PET-bottles	8	12.6	5:40	4060	12:10*	80
	12	14.5	5:56	3710	10:30*	95
	9	15.9	5:12	3910	15:15	15
EUR Plastic	19	12.6	1:28	4550	5:40 *	80
	22	15.9	2:00	4090	18:00	80
FMRC Plastic	3	12.6	1:40	4190	22:45	70
	2	15.9	1:32	4030	23:00	60
FMRC Class II	21	8.5	2:48	2580	24:00	35
	20	12.6	2:25	2650	18:15	25

*) The test was terminated as the capacity of the Industry Calorimeter was exceeded

**) Test simulating a Quick Response sprinkler

FIGURA 12 – Resultados dos testes de calorimetria e seu HRR.

FONTE: PERSSON, 1993, p. 16.

4.1.5 Spray Safe

Spray Safe é um sistema de supressão de fogo autônomo concebido pela Johnson Controls para identificar a localização de um incêndio em fase inicial em um edifício alto com materiais de revestimento combustíveis e autonomamente combatê-la. (ALVAREZ; PASTIZZO, 2019 p. 25). Também foi concebido para ajudar a conter incêndios do lado de fora do edifício e evitar

flashover em locais fora do alcance dos bombeiros. Os elementos de projeto incluem detectores de chama IR da matriz, válvula de dilúvio e a interface gráfica do usuário. Os detectores de chamas infravermelhos e detectores visuais de chamas empregam tecnologia de reconhecimento de chamas para confirmar o fogo, analisando a radiação próxima ao infravermelho usando um dispositivo de carga acoplada. A Figura 12 ilustra o conceito de operações do sistema.



FIGURA 13- Partes protegidas do Spraysafe da estrutura que os bombeiros não podem alcançar.

Fonte: ALVAREZ; PASTIZZO, 2019 p. 26

O sistema é para detectar autonomamente um incêndio em estágio inicial que começa com o acúmulo de marcas de fogo na lateral da casa. (p. 26) Uma válvula de dilúvio é um tipo de válvula de atuação que é aberta por um sistema de detecção instalado nas mesmas áreas dos bicos de pulverização ou por operação manual remota que fornece água a todos os bicos de pulverização. A interface gráfica permite que os usuários interajam com dispositivos eletrônicos através de indicadores visuais que permitiriam ao proprietário ativar o sistema a partir de um local remoto. (p. 27). Este é mais um exemplo de como a supressão de incêndio com sistema de água funciona.

CONCLUSÃO

Conclui-se que a energia liberada pelo incêndio, que vai desde o tempo de ignição junto da intensidade do calor do fogo é denominada de transferência de calor HRR e é necessária para obtenção de um sistema no qual irá suprimir o fluxo crítico da queima.

Desta forma constatou-se a eficácia da supressão de incêndio quando esta é aplicada no início da curva de crescimento do incêndio, diminuindo a taxa de transferência de calor até seu controle e possível extinção.

Devem ser desenvolvidos pesquisas aprofundadas dos sistemas de água para medir a adequação da eficiência do sistema.

REFERENCIAS

ALVAREZ, Shannon e **PASTIZZO**, Mitchell. Relatório **Consideration of an Exterior Water Spray System for the Protection of Residential Structures from the Impingement of Firebrands During a Wildfire Event**. Massachusetts, EUA, 2019.

BERGMAN, T.L., **DEWITT**, D.P. **Fundamentos de transferência de calor e de massa, 2008**.

BLESA, José Miguel Basset. **Flash over: desarrollo y control**. Valencia, Espanha, 1998.

BONITESE, Karina V. Dissertação para Mestrado **Segurança Contra Incêndio em Edifício Habitacional de Baixo Custo Estruturado em Aço**, Belo Horizonte, 2007.

BRENTANO, Telmo. **A proteção contra incêndios no projeto de edificações. 3 ed. Porto Alegre, 2015**.

BUCHANAN, A H. **Fire Engineering Design Guide**, 2ºed. Nova Zelândia, 2001.

DAHLBERG, Martin. **The SP Industry Calorimeter for rate of heat release measurements**. Suécia, 1992.

Ferreira, Márcio. **Academy Fire Masters – Supressão de Incêndio**. Brasil, 2019.

GAGNON, Robert M. **Design of Special Hazard and Fire Alarm Systems**, 2º ed. Delmar, 2008.

HOLMAN, J. P. **Transferência de Calor**. Editora Mc Graw-Hill do Brasil, 1983.

HURLEY, Morgan J. e **ROSENBAUM**, Eric R. **Performance-Based Fire Safety Design**. New York: CRC Press, 2015.

-INTERNATIONAL FIRE SERVICE TRAINING ASSOCIATION. IFSTA. Essentials of Fire Fighting. Fourth Edition. Oklahoma State University. 2001. acesso em Metodologia para levantamentos de cargas de incêndio em edificações residenciais” José Edier Paz Hurtado.

NATIONAL INSTITUTE OF STANDARDS AND TECHNOLOGY NIST. Gaithersburg, 2018. Disponível em <https://www.nist.gov/el/fire-research-division-73300/firegov-fire-service/fire-dynamics> **01 de outubro de 2019**

NFPA-72 National Fire Protection Association®. **National Fire Alarm and Signaling Code Handbook**. Massachusetts,EUA 2016.

NFPA-FPH2008 National Fire Protection Association®. **Fire Protection Handbook** . Massachusetts,EUA, 2008.

NFPA-FPH2008 National Fire Protection Association®. **Fire Protection Handbook** - Princípios de Desempenho Automático do sistema de sprinkler. Massachusetts,EUA, 2008.

PERSSON, Henry. Commodity Classification - A more objective and applicable Methodology. Suécia, 1993.