

A DINÂMICA DO INCÊNDIO APLICADA NA IDENTIFICAÇÃO DO PERIGO EM EDIFICAÇÕES

Dayse Cavalcanti de Lemos Duarte¹

<https://orcid.org/0000-0001-8359-8391>

Tiago Ancelmo de Carvalho Pires²

<https://orcid.org/0000-0003-4861-4944>

Cristiano Corrêa³

<https://orcid.org/0000-0003-4653-5337>

RESUMO

Quando um engenheiro projeta uma viga, a carga a que ela estará submetida deve ser prevista. De forma similar um engenheiro deve ‘projetar um incêndio’. Deve-se decidir a quantidade de material que irá queimar e o tempo associado. Atualmente, não há uma metodologia ou procedimento disponíveis para ajudar o engenheiro de incêndio. Os softwares disponíveis, a exemplo do Fire Dynamics Simulator (FDS), podem ajudar a simular o incêndio, porém muitos cenários não poderão ser validados. O engenheiro de incêndio deverá usar todas as informações disponíveis sobre a dinâmica do incêndio, o qual é plausível de acontecer juntamente com o seu conhecimento *a priori* para traduzir a meta e os objetivos em critérios de danos que seja aplicáveis ao projeto do incêndio. O presente estudo tem o objetivo de responder ao questionamento: Qual a variável que ao ser incorporada na avaliação do incêndio protegerá as pessoas e evitará a propagação do incêndio para além da sala de origem? Utilizando um estudo de caso de incêndio contextualizado em uma biblioteca.

Palavras Chaves: Projeto do Incêndio; *Flashover*; Sala de Origem

¹PhD – Engenharia de Incêndio pela University of Edinburgh, Escócia. Professora da Universidade Federal de Pernambuco - UFPE e Líder do Grupo de Pesquisa RICTEC; | E-mail: dayse.duarte@ufpe.br

²PhD – Engenharia de Estruturas Metálicas pela Universidade de Coimbra, Portugal. Professor do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Pernambuco - UFPE; | E-mail: tiago.poliveira@ufpe.br

³Doutor em Engenharia Civil, com ênfase em Segurança Contra Incêndio pela Universidade Federal de Pernambuco - UFPE e Oficial do Corpo de Bombeiros Militar de Pernambuco - CBMPE; | E-mail: cristianocorreacbmpe@gmail.com

THE DYNAMICS OF FIRE APPLIED TO IDENTIFYING FIRE HAZARD IN BUILDINGS

ABSTRACT

When an engineer designs a beam, the load it will be subjected should be predicted. Similarly, an engineer must design a fire. The engineer must determine the amount of material that will burn and the associated time. Currently, there is no available methodology or procedure to assist the fire engineer. Existing software, such as the Fire Dynamics Simulator (FDS), can help simulate the fire, but many scenarios cannot be validated. The fire engineer must use all available information about fire dynamics, which is plausible to occur, along with their prior knowledge, to translate the goal and objectives into damage criteria applicable to fire design. This study aims to answer the following question: Which variable, when incorporated into fire assessment, will protect people and prevent the fire from spreading beyond the room of origin? The fire design will be contextualized in a library.

Keywords: Fire Design; Flashover; Room of Origin.

Artigo Recebido em 03/05/2025

Aceito em 18/11/2025

Publicado em 30/12/2025

1. INTRODUÇÃO

Se durante um incêndio em um espaço confinado, com um volume de aproximadamente de 100m³, a meta é proteger as pessoas, então o objetivo é assegurar que o incêndio não se propague para além da sala de origem, para que os ocupantes tenham tempo suficiente para atingir um local seguro, sem que sejam afetados pelos efeitos do incêndio, sobretudo calor e fumaça (gases da combustão). Em outras palavras, o incêndio deve ser limitado na sala de origem. Se o incêndio é controlado e extinguido no ambiente onde foi iniciado, o impacto térmico, da fumaça e de outros produtos de combustão nos ocupantes e no entorno da sala de origem será minimizado.

O projeto do incêndio expressa a relação entre a carga do incêndio e a taxa de liberação de calor. A energia liberada pelo incêndio contemporâneo é fortemente influenciada pelos polímeros. Os polímeros podem ser naturais ou sintéticos. Os polímeros sintéticos abrangem uma variedade de plásticos, sendo os de menor custo os mais inflamáveis, em regra geral.

O projeto do incêndio deve considerar as características do incêndio, da edificação e dos ocupantes. As características do incêndio descrevem a história do cenário do sinistro, tais como o primeiro item a sofrer ignição, o crescimento do incêndio, o *flashover*, o desenvolvimento do incêndio e o seu decaimento até a extinção. As características da edificação descrevem o que está dentro da estrutura e o seu entorno. Vale ressaltar que, estas características poderão afetar a evacuação das pessoas, o crescimento e desenvolvimento do incêndio e o movimento dos produtos de combustão. As características dos ocupantes afetam ainda como os ocupantes da edificação irão responder a uma emergência ou irão evacuar tal edifício.

Dentro desse contexto, é urgente e imprescindível a identificação da sala de origem. As prováveis salas de origem poderão ser identificadas pelo método

de hierarquização proposto por Saaty (2001), o qual é baseado em critérios e alternativas.

2 CAMINHO METODOLÓGICO

A presente pesquisa, tenta de forma didática e dialogando com os princípios que norteiam a dinâmica dos incêndios, apresentar os pressupostos e em seguida a aplicação em um pequeno estudo de caso, em uma biblioteca de uma universidade pública, que norteiam um ‘projeto do incêndio’ e suas consequências.

Para tanto, será exposto a análise que levará a sala de origem, ou seja o compartimento ou local com maior probabilidade de iniciar-se o sinistro. Passando detalhadamente ao processo de ignição e consequente iniciar do incêndio; Seguindo pelos caminhos de propagação das chamas, devidamente amparado nas perspectivas conceituais e numéricas (equações) correlatas; Chegando finalmente ao debate quanto ao fenômeno extremo de generalização do incêndio, intitulado flashover, que pode vir a acontecer; Posteriormente discute-se o decaimento e extinção.

A ilustração da aplicação deste conjunto conceitual no estudo de caso, biblioteca acima descrita, busca trazer mais concretude ao desencadear de eventos propostos.

Acompanhando as orientações de Marconni e Lakattos (2004, p.221), quanto ao método procedural, que apresenta o estudo de caso como uma possibilidade de pesquisa aplicada de grande relevância.

3. ANÁLISE DE CENÁRIOS E DINÂMICA DO INCÊNDIO

Neste tópico, como enunciado na metodologia será desenvolvida a análise do cenário estudado e a possível dinâmica do incêndio.

3.1 A SALA DE ORIGEM

Para a seleção da sala de origem são utilizados os critérios propostos pelo professor Fitzgerald (2004) que são segurança dos ocupantes, propriedade e continuidade operacional, propagação da chama, obstáculos a extinção, fragilidade das barreiras e representação da edificação.

O critério ‘segurança dos ocupantes’ busca responder aos seguintes questionamentos:

- a) Se um incêndio ocorresse em uma edificação, quais os ambientes que causariam maiores perigos para a segurança dos ocupantes?
- b) Quais as condições físicas e mentais dos ocupantes?
- c) Qual a relação existente entre um possível incêndio e a ação dos ocupantes?
- d) Em que períodos do dia, da semana ou época do ano os ocupantes desenvolvem as suas atividades? Durante 24 horas ou em algum horário especial? Durante os setes dias da semana ou em algum período especial do ano?

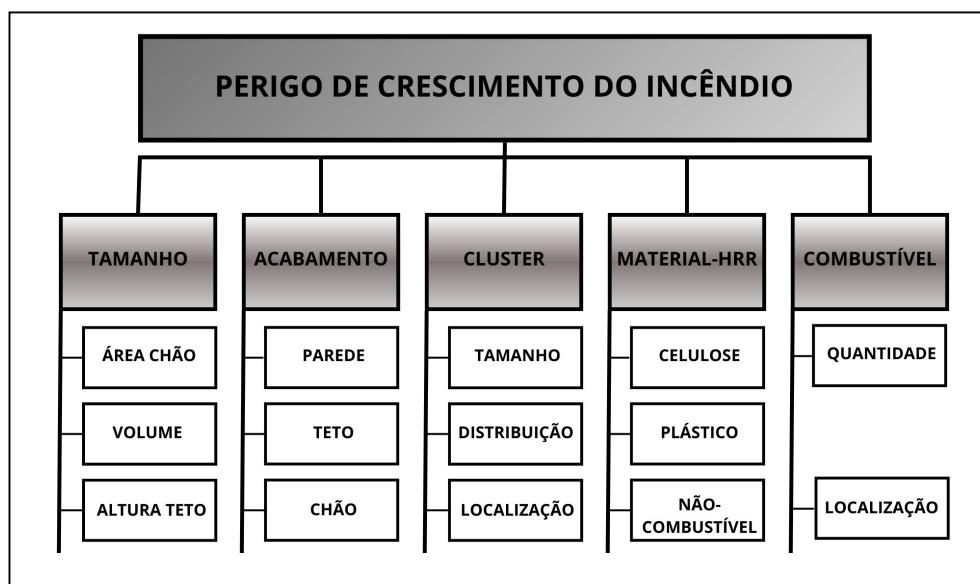
As características operacionais da edificação (que é função da sua classe de ocupação, se educacional, se comercial, se industrial etc.) é importante para estimar o número de pessoas e os horários em que elas desempenham as suas atividades. Esta análise é relevante para a avaliação das rotas de saída e análise dos perigos em função do tempo. Por exemplo, um prédio com salas comerciais durante o dia estará ocupado, sendo maior a probabilidade do incêndio ser identificado pelos ocupantes, porém o tempo necessário para a evacuação dos ocupantes será maior. O critério propriedade e continuidade operacional faz uma reflexão sobre as áreas da edificação em que há equipamentos, arquivos ou outros documentos relevantes. Há áreas consideradas vitais, que estão protegidas para que a edificação não sofra um processo de descontinuidade operacional no evento de um incêndio, seja na edificação ou no seu entorno?

Se um incêndio ocorresse em uma edificação, a partir da sala ele se propagaria mais facilmente? Figura 1. Deve ser observado a configuração do

ambiente, como altura do teto, a sua área e geometria. Um teto inclinado ou obstruído poderá afetar a ativação dos sistemas de detecção, alarme e supressão, como também na profundidade da camada de fumaça. A área do ambiente e a distribuição dos ‘pacotes de combustíveis’ poderão influenciar se ocorrerá um *flashover* ou *spreadover*.

As propriedades do acabamento interno do ambiente poderão reduzir o tempo para que o *flashover* ocorra, por exemplo, um teto combustível o tempo para o *flashover* é de aproximadamente 300 segundo, enquanto um teto não combustível é de 700 segundos (Carlsson; Quintiere, 2000).

Figura 1- Potencial de crescimento do incêndio.



Fonte: Fire Performance Analysis for Building (2017)

O posicionamento das prováveis fontes de ignição em relação as paredes devem ser consideradas. Se a fonte de ignição não sofre influência das paredes uma maior quantidade de ar não aquecido entra na pluma do incêndio, proveniente de todas as direções resultando em uma menor temperatura da pluma. Por outro lado, quando a fonte de ignição está

localizada próxima a parede a quantidade de ar frio arrastado para dentro da pluma é menor, o que aumenta a temperatura da pluma (Gao, *et al*, 2015).

Uma variável importante no projeto do incêndio, associado às características da edificação, são as barreiras, as quais têm a função de separar espaços para definir ambientes, prover privacidade, segurança e controle de ruído. As barreiras também permitem a comunicação entre ambientes através de janelas, portas ou bandeja de cabos. As barreiras poderão ser estruturais ou não, também poderão retardar ou prevenir a movimentação de produtos de combustão entre os ambientes. O desempenho das barreiras poderá contribuir para a extinção manual, auxiliando nas operações de controle e extinção do incêndio. Os modos de falha da barreira são: o sucesso, uma pequena falha ou uma falha massiva. Uma pequena falha na barreira poderá permitir a ignição no lado não exposto ao incêndio, porém é esperado que o crescimento do incêndio seja normal. Uma falha pequena na barreira é associada a aberturas pequenas na barreira. Em uma falha massiva é esperado que o *flashover* no lado não exposto ocorra em curto período.

Uma falha massiva poderá resultar talvez da quebra da janela durante um incêndio. Ou eventualmente quando a resistência da barreira colapsa. Uma falha massiva poderá ser progressiva, ou seja, uma pequena falha na barreira poderá evoluir para uma falha massiva.

O incêndio poderá se propagar da sala de origem (ambiente A) para o ambiente B (não exposto ao incêndio), no evento de uma falha massiva da barreira entre os ambientes A e B, após o *flashover* ocorrer no ambiente A, o fluxo de gases quente e fumaça possibilitaram a ocorrência do *flashover* no ambiente B, o que poderá ocorrer no intervalo de 1-2 minutos (após ocorrer o primeiro *flashover* em A). Concluindo, o tamanho dos ambientes é relevante. Quando o *flashover* ocorre em um ambiente pequeno (A é um ambiente pequeno) e se propaga para um ambiente maior (B) uma falha massiva entre os ambientes pode ser percebida como uma grande fonte de ignição. Ao

contrário, ou seja, quando ambiente A é maior do que o ambiente B quando o *flashover* ocorrer no ambiente de maior dimensão, a falha massiva da barreira, poderá conduzir a um *flashover* quase que instantaneamente no ambiente menor (Fitzgerald; Meacham, 2017).

A falha massiva poderá ocorrer quando existir uma grande falha na barreira. Podemos considerar como uma grande abertura: a) uma porta aberta poderá permitir uma rápida propagação do incêndio para o ambiente adjacente; b) uma abertura na barreira não protegida; c) aberturas na barreira para permitir a movimentação de objetos de um ambiente para outro; d) janelas internas e e) grades e dutos de ventilação, são comuns para facilitar a circulação de ar na edificação.

Em uma edificação poderão existir ambientes em que as barreiras têm uma resistência menor que as demais. Identifique-as!

Para a seleção da sala de origem devem ser identificados os obstáculos da arquitetura que dificultem a extinção manual, devem ser mapeados. Se um incêndio ocorresse em uma edificação, quais das salas ofereciam maiores obstáculos à extinção manual?

Se um incêndio ocorresse em uma edificação, quais as salas que melhor representariam a edificação? Para a biblioteca selecionada os ambientes que a representam são: as salas de leitura, salas de pesquisa, sala de rede, acervo de leitura, acervo de periódicos e a coordenação.

O método de hierarquização proposto por Saaty (2001) é estruturado e baseado em critérios e alternativas que devem ser avaliados dois a dois. Os critérios foram comparados entre si, e para cada critério as alternativas foram avaliadas utilizando a matriz de comparação sugerida pelo autor (Saaty, 2001).

A consistência das matrizes foi verificada através do maior autovalor e da razão de consistência, Figura 2. Para os critérios e alternativas adotadas a sala de origem identificada foi a sala de rede, Figura 3.

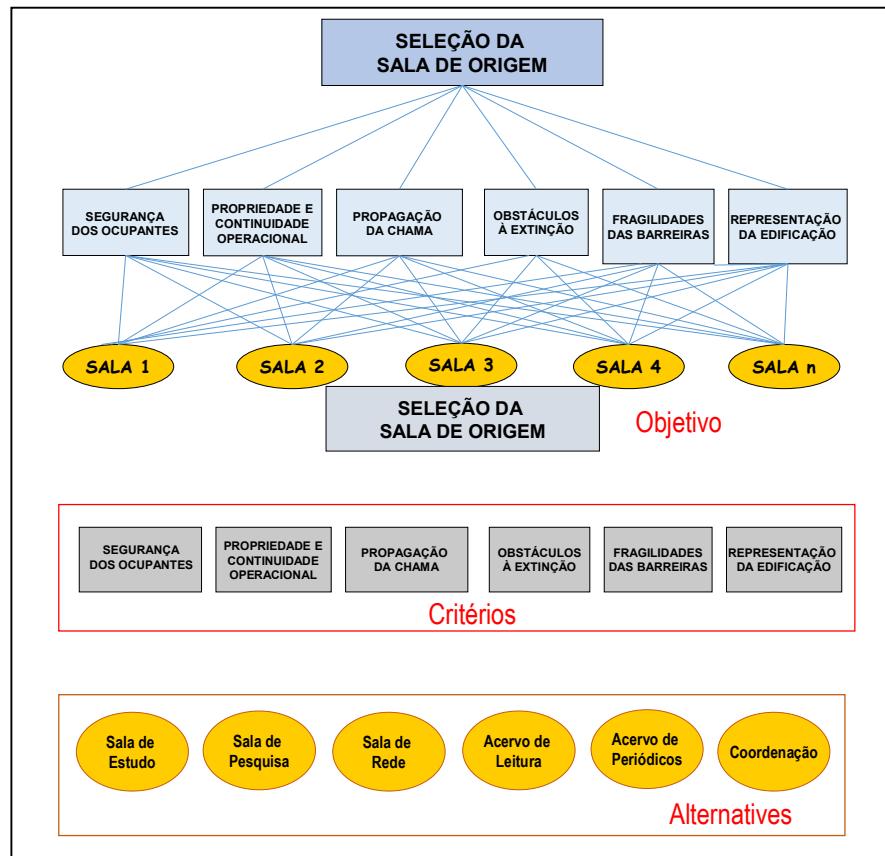
Revista FLAMMAE

Revista Científica do Corpo de Bombeiros Militar de Pernambuco

Artigo Publicado V.11 N°36 – Julho a Dezembro 2025 - ISSN 2359-4829 (print)

Versão on-line (ISSN 2359-4837) disponível em: <http://www.revistaflammae.com>.

Figura 2- Estruturação para a seleção da sala de origem.



Fonte: Autores

Figura 3 - Sala de origem: Sala de rede



Fonte: Autores

3.2 A IGNição IRÁ OCORRER NA SALA DE ORIGEM?

Para a ignição ocorrer, uma sequência de processos físicos e químicos devem acontecer na fase sólida de decomposição do sólido combustível (no caso principal carga de incêndio) e na fase gasosa que resultará na chama. Inicialmente o calor é transferido para o sólido por uma fonte de calor externa, geralmente por radiação, condução ou principalmente por convecção, o fluxo de calor que chega à superfície do sólido é atenuado devido a absorção da fase gasosa.

A contribuição das reações exotérmicas na fase gasosa deve ser considerada no balanço de energia na fase sólida, apenas se forem consideradas significativas. Para alguns autores é importante considerar essa questão. O calor perdido proveniente das reações exotérmicas na fase gasosa para o sólido é significativo para o balanço de energia na fase gasosa (Atreya, 1998).

- I. A fração do fluxo de calor por radiação incidente e absorvido pelo sólido depende, de: a) espectro de absorvidade e transmissividade do sólido; e b) do caráter espectral da radiação incidente.

Segundo, Wesson (1971) o tempo de ignição depende fortemente do espectro de distribuição da radiação incidente. Em geral, a madeira reflete radiação na faixa de $0,6\mu$ - $0,2\mu$, mas absorve radiação para comprimento de onda mais longas.

- II. Após o início do aquecimento externo, as temperaturas em todo o sólido aumentam gradualmente, sendo mais altas na superfície do sólido ou perto dela. Antes da decomposição da camada superficial, ocorre a evaporação da umidade e uma zona de evaporação começa a se deslocar para o sólido. Vale ressaltar, que a evaporação da umidade é típica para o sólido, porém não ocorre em termoplásticos.

Os termoplásticos apresentam outras complicações como derretimento, gotejamento e formação de bolhas. Após um certo tempo, a zona de decomposição começa a se desenvolver e então se propaga lentamente para o interior do sólido.

Os sólidos celulósicos carbonizam à medida que se decompõem, mas os termoplásticos podem derreter e/ou borbulhar, conforme já mencionado, e a superfície exposta pode expandir devido as bolhas aprisionadas ou regredir em razão do gotejamento. Os produtos da pirólise, que são combustível voláteis e talvez da umidade, fluem para fora da superfície, convertendo parte do calor transferido para o sólido na sua forma gasosa. O processo de decomposição, derretimento e evaporação é endotérmico e produzem um sumidouro de energia, próximo da superfície do sólido.

Além disso, dependendo da permeabilidade, as pressões dentro do sólido podem aumentar. Estas pressões podem forçar os produtos da pirólise tanto para dentro como para fora do sólido. Claramente, uma infinidade de processos físicos complexos ocorre à medida que o sólido se decompõe para produzir voláteis. Esta complexidade é superada pela química de decomposição relativamente desconhecida.

III. Uma vez que os voláteis combustíveis começam a se fracionar na superfície do sólido, eles se misturam com o ar circundante na camada limite de transferência de massa para produzir uma mistura ar-combustível. Este processo de mistura (do ar com os voláteis combustível provenientes da degradação do sólido) é crítico para a ignição e depende das condições de contorno da fase gasosa, e da maneira pela qual os gases voláteis ficam retidos na superfície do sólido. Por exemplo, a ignição pode não ocorrer sob condições do ar turbulentó

de alta velocidade. Ou talvez, os voláteis podem ejetar jatos localizados provenientes da superfície do sólido, devido à pressão interna gerada.

Se a mistura entre o combustível e o ar na camada limite for considerada a mesma, e se a composição do pirolisado for invariante, então fisicamente o critério de ignição mais significativo seria o fluxo de massa crítico do gás pirolizado. Como os produtos da pirólise geralmente contêm componentes não combustíveis (como o CO₂, H₂O, CO, entre outros) é importante levar em consideração a sua presença, pois eles atuam como diluentes.

Um método óbvio para determinar o fluxo de massa crítica é corrigir adequadamente a contribuição dos componentes não combustíveis.

IV. A mistura ar-combustível produzida pela pirólise deve estar dentro dos limites de inflamabilidade para que possa sofrer ignição, que poderá ser provocada por uma chama piloto, ou espontânea. Para a ignição espontânea a mistura inflamável deve atingir uma temperatura alta o suficiente para iniciar uma reação térmica que se transformará em chama. Em 1981, Kashiwagi (1981) demonstrou que a absorção em fase gasosa da radiação externa é um importante mecanismo de ignição espontânea.

V. A chama nascente deve gerar calor suficiente para superar as perdas de calor para a superfície do sólido que se encontrar mais fria. Se o calor produzido for menor do que o calor perdido, apenas haverá um chama momentânea.

Experimentalmente a ignição marca o surgimento de uma chama difusa sustentada por um fluxo de gases voláteis proveniente de uma superfície sólida exposta a uma fonte de calor.

Na ignição de um sólido primeiro o sólido deve se decompor, produzindo gás combustível, o qual deve se misturar com o ar para formar uma mistura inflamável, a qual sofrerá ignição provocada ou espontânea. Para que a ignição seja sustentada a taxa de produção de combustível e retida próxima a superfície do sólido é crítica, além disso o calor liberado pela chama deve ser maior do que o calor perdido para o ambiente.

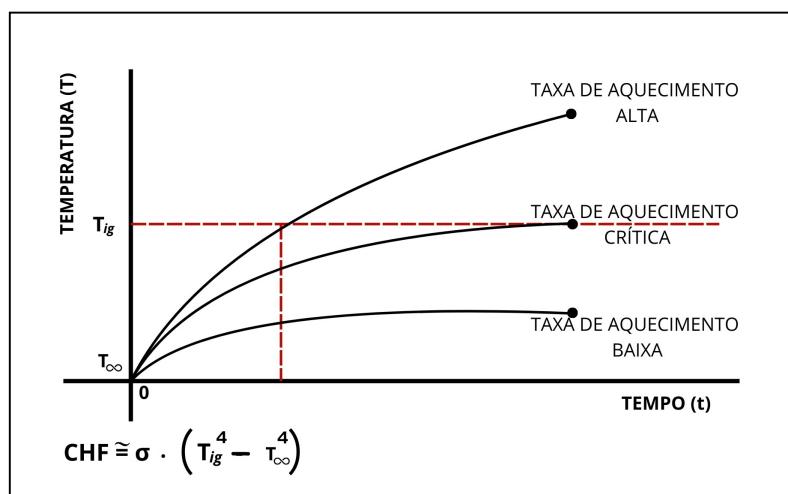
Mas por que a ignição poderá não ocorrer?

- I. A ignição pode não ocorrer sob condições do ar turbulento de alta velocidade, o que removeria a mistura inflamável formada próxima a superfície do sólido.
- II. Ou talvez, os voláteis podem ejetar jatos localizados provenientes da superfície do sólido, devido à pressão interna gerada neste mesmo sólido.
- III. Os produtos da pirólise geralmente contêm componentes não combustíveis (como o CO₂, H₂O, CO, entre outros) é importante levar em consideração a sua presença e concentração, pois eles atuam como diluentes.
- IV. Se o calor produzido for menor do que o calor perdido, apenas haverá um *flash*, e o estabelecimento da chama não será possível.

Uma forma de reduzir a probabilidade de que a ignição de materiais combustíveis venha a ocorrer é assegurar que as fontes de calor presentes no ambiente não irradiem calor suficiente. O perigo de um incêndio é caracterizado pela geração de calor (impacto térmico) e produtos de combustão (impacto não térmico) por unidade de tempo, como resultado de reações químicas entre a superfície, vapores (pirolise) e o oxigênio presente no ar. A região onde os vapores são formados é definida como a região da pirolise. A presença de uma fonte de calor na região da pirolise, provocará a ignição da mistura inflamável, formada acima da superfície do sólido. A região onde a ignição é iniciada é definida como zona de ignição. Um fluxo de calor mínimo é necessário para que ocorra a ignição.

Em outras palavras, para que o incêndio seja iniciado o material deve ser submetido a um fluxo de calor maior do que o fluxo de calor crítico (*Critical Heat Flux-CHF*), equação 1 (Morgan, 2016), Figura 4.

Figura 4 - Fluxo de calor crítico



Fonte: Principle of Fire Behavior (2017).

$$CHF \approx \sigma (T_{ig}^2 - T_{\infty}^2)$$

Equação 1

Onde

CHF =Fluxo de Calor Crítico (kW/m^2)

σ =Constante Stefan-Boltzmann ($56,7 \cdot 10^{-12} kW/m^4 K^4$)

T_{ig} =Temperatura de ignição(K)

T_{∞} =Temperatura ambiente(K)

O Fluxo de Calor Crítico – *CHF* segundo Tewarson (1995) é definido como o fluxo igual ou abaixo do qual não ocorre ignição sendo expresso pela soma das perdas por convecção e por radiação. Além do *CHF* devemos também considerar a resistência do material em dar continuidade a pirolise.

A resistência do material é avaliada através do Parâmetro de Resposta Térmica – *TRP*, equação 2. Ou seja, quando a superfície de um material sólido é exposta a um fluxo de calor, inicialmente todo o calor é transferido para o interior do material.

O mecanismo de ignição sugere que a taxa com que este calor é transferido depende: a) da temperatura de ignição, b) da temperatura ambiente, c) da condutividade térmica do material, d) do calor específico do material e e) da densidade do material.

Esses efeitos combinados definem o Parâmetro de Resposta Térmica-TRP. Quanto maior *CHF* (associado a fonte de ignição) e *TRP* (associado as características do combustível) tem-se uma indicação que o tempo para o material aquecer, ocorrer a ignição e iniciar o incêndio é maior, e a taxa de propagação do incêndio é menor.

Para os Materiais do Grupo 1 a taxa de propagação da chama diminui com o tempo, ficando a propagação limitada a zona de ignição. Para os Materiais do Grupo 2 há uma propagação lenta da chama além da zona de ignição. E para os Materiais do Grupo 3 a velocidade de propagação da chama é acelerada, ou seja, é função do tempo.

$$TRP = (T_{ig} - T_{\infty}) \cdot \sqrt{\frac{\pi}{4} k \cdot \rho \cdot c_p} \quad \text{Equação 2}$$

Onde

TRP =Parâmetro de Resposta Térmica($kW - s^{1/2}/m^2$)

T_{ig} =Temperatura de ignição (K)

T_∞ =Temperatura ambiente(K)

k = Condutividade térmica do material ($kW/m - K$)

ρ =Densidade do material(g/m^3)

c_p=Calor específico do material ($kJ/g - K$)

Índice de Propagação da Chama - *FPI* que é função do parâmetro de resposta térmica informa se a chama se propagará para além da zona de ignição, sendo expresso pela equação 3 (SFPE, 1995), Tabela 1. O calor gerado pelas reações químicas define a Taxa de Liberação de Calor Químico, a qual possui o componente de convecção e de radiação. O Fluxo de Calor Crítico - *CHF* poderá ser estimado através do aparato da *Ohio State University* – OSU, de flamabilidade e do cone-calorímetro.

Revista FLAMMAE

Revista Científica do Corpo de Bombeiros Militar de Pernambuco

Artigo Publicado V.11 N°36 – Julho a Dezembro 2025 - ISSN 2359-4829 (print)

Versão on-line (ISSN 2359-4837) disponível em: <http://www.revistaflammae.com>.

$$FPI = 1000 \cdot \frac{(0,42 \cdot Q_{c\square})^{1/3}}{TRP} \quad \text{Equação 3}$$

Onde

FPI = Índice de Propagação da Chama

$Q_{c\square}$ = Calor químico liberado (kW/m)

TRP = Parâmetro de Resposta Térmica ($kW - s^{1/2}/m^2$)

Tabela 1- A chama se propagará para além da zona de ignição?

Índice de Propagação da Chama	A chama se propagará além da zona de ignição?
$FPI < 7$	Não há propagação da chama além da zona de ignição. A chama está em uma situação crítica de extinção. Materiais do Grupo N-1.
$7 < FPI < 10$	A propagação da chama além da zona de ignição é limitada, há uma desaceleração da chama. Materiais do Grupo D-1.
$10 < FPI < 20$	A propagação da chama além da zona de ignição é lenta. Não há uma aceleração da chama. Materiais do Grupo 2.
$FPI > 20$	Há uma aceleração da propagação da chama além da zona de ignição. Materiais do Grupo 3.

Fonte: Society of Fire Protection Engineers (1995).

Na sala de rede provavelmente o incêndio será iniciado devido a ignição no isolamento dos cabos, provavelmente devido: a) arco elétrico, b) aquecimento ohmico excessivo (aquecimento ohmico é o processo pelo qual a passagem de uma corrente elétrica através de um condutor produz calor) e c) fonte de calor externa.

O que pode causar um arco elétrico? (Babrauskas, 2003)

1. Carbonização do isolamento, que preponderantemente poderá ser devido a:

1.1 Aplicação de arco diretamente na superfície do isolamento

1.2 Aquecimento do isolamento com altas temperaturas.

1.3 Efeito combinado de umidade e poluição na superfície do isolamento.

1.4 Crescimento fúngico.

A carbonização do isolamento poderá conduzir a uma redução da resistência do cabo. A diminuição da resistência permitirá a passagem de uma corrente elevada, e possível ignição se as proteções não atuarem. Segundo a *UL standards* o que causa a carbonização do isolamento é: a) quebra gradual do isolamento devido a repetidas sobretensões e b) repetidas sobretensões transitórias poderá causar danos em toda a extensão do cabo.

Aquecimento ôhmico excessivo é o resultado de: sobrecarga, isolamento térmico excessivo, corrente parasita e falha no isolamento e sobretensão e neutro flutuante.

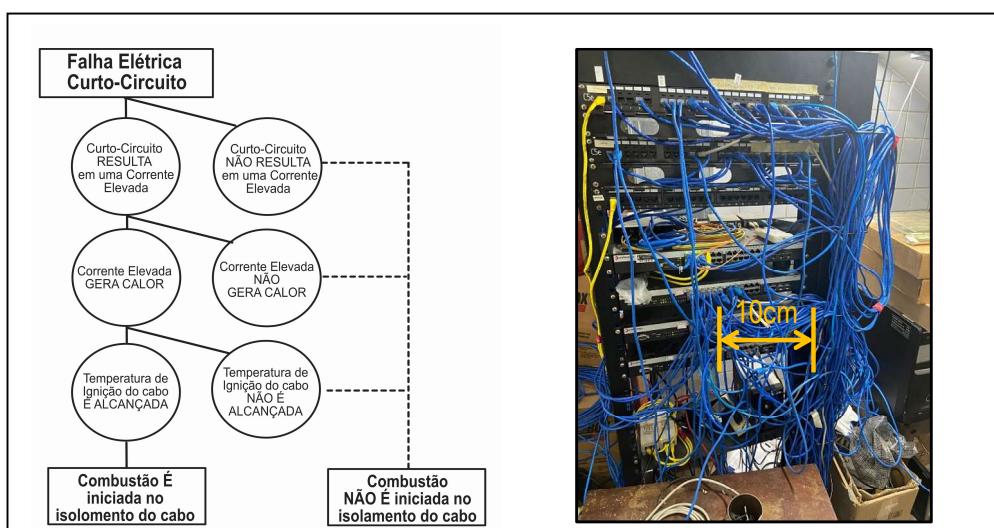
A sobrecarga excessiva pode levar a incêndios, por surgir de um disjuntor com defeito ou talvez porque o cabo usado tem uma bitola muito menor do que o recomendado para o disjuntor (esse cenário é raro). Se a condição de sobrecarga persistir os cabos podem sofrer ignição, ou mesmo criar uma propagação sustentada. Uma sobrecarga moderada não provocará a ignição do isolamento, porém irá alimentar a temperatura do fio condutor e do isolamento. O isolamento mais comum para cabos não metálicos é o PCV que é um termoplástico que se funde ao ser aquecido, o que poderá ocorrer devido a uma sobrecorrente em que a temperatura de algumas centenas de grau Celsius será alcançada.

Provavelmente o incêndio na sala de rede será iniciado no isolamento dos cabos de comunicação, talvez devido a um curto-círcito, Figura 5. O termo curto-círcito é comumente empregado quando uma baixa resistência ou uma elevada corrente se desenvolve no circuito.

Mas, o que causa o curto-círcito? Uma corrente elevada ou uma baixa resistência, como adiantado acima. Com o contato metal com metal, o aquecimento é verificado ao longo do circuito. Pode ser facilmente criado pela fiação incorreta de um circuito, e o disjuntor poderá atuar antes que algum

material sofra ignição. Por outro lado, em uma baixa resistência, o contato metal-metal não é sustentado, e um arco é formado, e a corrente flui através do arco. O arco, resulta do contato momentâneo de dois condutores, o que poderá causar o derretimento do material ao redor da área de contato. O Fluxo de Calor Crítico - CHF estimado foi baseado na maior energia liberada, a qual foi obtida através de testes no cone-calorímetro, para uma energia incidente de 40 kW/m^2 e 20 kW/m^2 (Hirschler, 1995).

Figura 5 - Diagrama contínuo para a falha de curto-círcuito.



Fonte: Autores

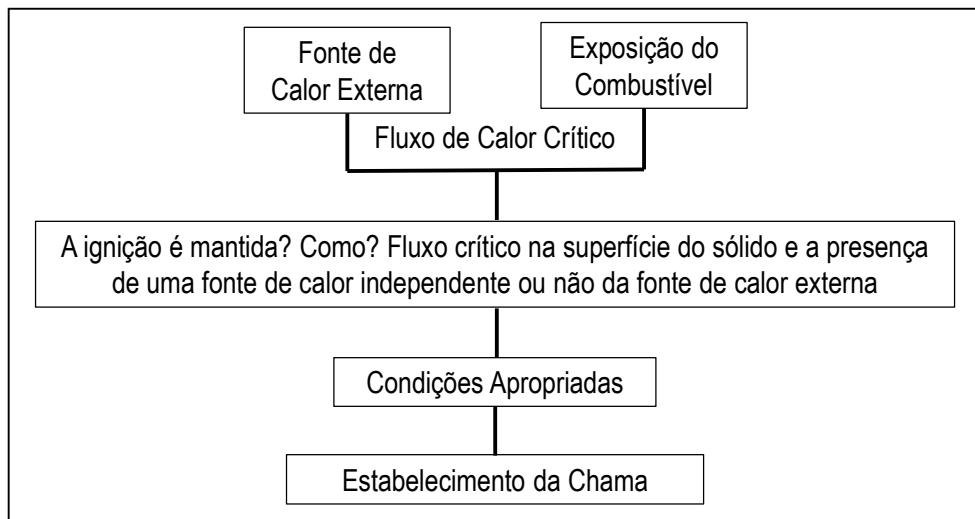
Conforme já mencionado o incêndio será, possivelmente, iniciado nos cabos de comunicação. Para o calor liberado pelo isolamento dos cabos no evento da combustão ser iniciada foi assumido os valores sugeridos por Hirschler (1992). O PK RHR por unidade do cabo IBM type 2 é $33,7\text{ kW}$ por unidade da amostra. E para o IBM tipo I é $32,1\text{ kW}$ por unidade da amostra. Para uma 40 kW/m^2 : IBM tipo II 81 kW/m^2 (PK RHR). IBM tipo I 81 kW/m^2 (PK RHR). Para uma 20 kW/m^2 : IBM tipo II é 19 kW/m^2 (PK RHR). IBM tipo I é 66 kW/m^2 (PK RHR).

O cabo IBM tipo 1 consiste em um cabo blindado com dois pares trançados compostos por fios AWG 22, utilizado para a transmissão de dados,

especialmente com redes *token-ring*, o cabo tem uma impedância de 150ohms. Cada par tem sua própria blindagem, e o cabo inteiro é coberto por uma folha metálica externa. O cabo IBM tipo 2 é formado por pares de fios AWG 22 sem blindagem utilizados na transmissão de voz. E dois pares de fios blindados utilizados na transmissão de dados que obedecem a especificação tipo 1. As *networks token ring* (conecta os computadores na configuração de um anel) estão obsoletas. Foram substituídas pela *Ethernet Technology* aproximadamente a partir da década de 1990.

Se a ignição é possível, o próximo questionamento é há condições para o estabelecimento da chama? (Figura 6). O movimento da região da pirólise na superfície do material define a taxa de propagação da chama: $u = \frac{dX_p}{dt}$, sendo a u a propagação da chama em mm/s ou m/s. E X_p a altura da pirólise em mm ou m. O movimento da pirolise para a frente define a propagação do incêndio. Observe, que a velocidade de propagação da chama é a mesma para materiais termicamente fino ou grosso, o que muda é o tempo de ignição.

Figura 6- Há condições para o estabelecimento da chama?



Fonte: An Introduction to Fire Dynamics (2011)

3.3 CONDIÇÕES PARA O ESTABELECIMENTO DA CHAMA

Incêndio é uma reação química que envolve um combustível e oxigênio. Calor é necessário para iniciar a reação que é exotérmica. Quando o combustível (sólido) é aquecido a pirólise produzirá gases, os quais serão misturados com o oxigênio presente no ar em proporções específicas, e uma mistura inflamável será formada. Quando a mistura atinge uma temperatura alta o suficiente a reação química é iniciada, e libera uma variedade de produtos, tais como: luz, calor, vapor de água, outras espécies gasosas e partículas sólidas (fuligem).

As fontes de calor existem em muitas formas diferentes, pois as edificações e seus ocupantes utilizam calor de várias maneiras diferentes. Situações em que a quantidade de calor é excedida e o controle é perdido um incêndio não desejável poderá ser iniciado. A fonte de ignição poderá ser provocada ou espontânea.

Diferentes materiais liberam diferentes quantidades de calor quando queimam. A transferência de calor influência a velocidade com que os incêndios crescem e se propagam, ou seja, a transferência de calor é relevante no comportamento do incêndio, sendo a transferência por radiação predominante em incêndios grandes. Tempo é uma variável dinâmica que relaciona as condições que afetam o desenvolvimento do incêndio e a geração dos produtos de combustão. Apesar do período de crescimento do incêndio ser expresso por uma única expressão matemática ($Q = \alpha t^2$) não é apropriado, com a intenção de entender o desenvolvimento do incêndio vamos dividi-lo em etapas.

O incêndio faz uma transição entre: 1) uma ignição frágil e a ignição (*a ignição irá ocorrer?*), 2) a ignição e o estabelecimento da chama, e 3) do estabelecimento da chama e o *flashover*.

- 1) Etapa 1: Quando há um aumento de calor acima do normal ou devido a uma fonte de calor externa próxima a um item/objeto combustível

(combustível é aqui definido como qualquer item/objeto que queima). É o início da degradação térmica do material. O incêndio não é afetado pelas condições do compartimento (Fayh, 1985).

- 2) Etapa 2: Após a ignição a chama poderá se auto extinguir ou acelerar, ou seja, o incêndio poderá envolver outros itens além do objeto de origem (i.e., item/objeto em que o incêndio foi iniciado). A concentração de oxigênio e a temperatura do compartimento não é muito diferente das condições do ambiente do compartimento.

Por outro lado, se uma queima autossustentável é estabelecida, e a chama possui uma altura de alguns centímetros, a transferência de calor para a superfície do incêndio é inicialmente por convecção. Se a intensidade e altura da chama atingem 25kW e 30cm, respectivamente (Fayh, 1985), a transferência de calor é por radiação, ou seja, há o retorno da energia liberada para o combustível (Alpert; Ward, 1984). A duração das etapas 1 e 2 dependem do combustível e do calor incidente nos objetos (Fitzgerald; Meachan, 2017).

- 3) Etapa 3: O *enclosure point* caracteriza-se pela influência das características da sala de origem no desenvolvimento do incêndio. Para ambientes pequenos e moderados a altura do *enclosure point* é aproximadamente 1,5m, e a energia liberada pelo incêndio é estimada entre 300kW-400kW (Fitzgerald, 2004). Nesta etapa a camada de gases quente no teto irradia uma quantidade substancial de calor de volta a superfície do combustível (Alpert; Ward, 1984).
- 4) Etapa 4: O incêndio continua crescendo além do *enclosure point*. Há uma queima interativa entre os vários itens/objetos. A chama atinge o teto. Ou seja, a camada de gases aquecido no teto irradia calor suficiente para provocar a ignição de objetos distantes do pacote de combustível onde o incêndio foi iniciado (Alpert; Ward, 1984).

- 5) Etapa 5: Após atingir o teto, a coluna de gases aquecidos forma um jato no teto, e a energia irradiada de volta para chama causa um aumento da taxa de volatização dos objetos presente no ambiente, podendo ocorrer a ignição espontânea de alguns objetos, e um incêndio adicional poderá ser iniciado no ambiente.
- 6) Etapa 6: Para ambientes de aproximadamente 100m³ (Drysdale, 2011), o *flashover* implica em um período de mudanças dramáticas nas condições do incêndio devido: 1) ignição rápida, 2) taxa de queima, 3) a propagação da chama no material, devido ao aumento do fluxo de calor transferido da camada de gases aquecidos no teto para os itens/objetos no compartimento, e 4) o incêndio é controlado pela ventilação. Ou melhor, no *flashover* há inicialmente um pequeno incêndio e repentinamente um grande incêndio. Esta instabilidade é causada pelo aumento de energia gerada que excede da energia perdida, esse desequilíbrio resulta em um aumento acentuado da temperatura da fumaça no compartimento. O *flashover* irá terminar quando todo oxigênio for consumido (ou alcançar proporções que não possibilite a combustão) ou quando as chamas envolveram todos os itens no compartimento. Inicialmente o controle do incêndio é pelo combustível, após o *flashover* pela ventilação, o *flashover* caracteriza esta transição (Quintiere, 2017).

No período inicial de crescimento do incêndio em que ainda não ocorreu o estabelecimento da chama, a probabilidade de extinguir o incêndio é maior, se as ações de supressão forem adotadas. Se não forem adotadas ações de supressão, após o estabelecimento da chama, o incêndio controlado pelo combustível atingirá o *flashover*. Após o *flashover*, no período de desenvolvimento do incêndio o controle é pela ventilação. O período de decaimento inicia-se após 80% do combustível ser consumido. O crescimento do incêndio terá influência na ativação de detectores e sistemas de sprinklers.

Nos períodos de desenvolvimento e decaimento a integridade estrutural da edificação é relevante.

Concluindo, o período da ignição frágil está associado ao processo da pirólise. E não é afetado pelas características do compartimento. Se há o estabelecimento da chama, a chama possui uma altura de alguns centímetros e a transferência de calor para a superfície do combustível é por convecção. Se a intensidade da chama é 25kW e a sua altura 30cm, a transferência de calor é por radiação. Babrauskas (1983), para incêndio em líquidos, faz uma relação entre o diâmetro da poça e os mecanismos de transferência de calor para uma chama difusa, Tabela 2. A radiação proveniente da chama é devido aos produtos de combustão, em especial gás carbono (CO_2), água e partículas sólidas de fumaça. Para incêndios intermediários e grandes a emissão de fumaça é predominante. Em outras palavras, é amplamente aceito que a radiação é o modo de transferência de calor dominante para incêndios de grande escala. Para incêndios menores a transferência por convecção (em casos mais raros condução) é o dominante. De Ris (1979) demonstrou que a transferência de calor por radiação proveniente da chama para a superfície do combustível excede a transferência por convecção para comprimentos característicos do combustível maior do que 0,2 metros, o que está em conformidade com Babrauskas (1983). Os mecanismos de transferência de calor por convecção e radiação são controlados mecanismos fundamentalmente diferentes. Logo, não se deve surpreender que correlação entre a taxa de massa queimada para incêndios pequenos e grandes (ou moderados) é fraca ou talvez inexistente.

Tabela 2 - Diâmetro do incêndio e os mecanismos de transferência de calor
Transferência de Calor Chama Difusa

Diâmetro da Poça	
$< 0,05m$	Convecção, chama laminar
$0,05m - 0,2m$	Convecção, chama turbulenta

0,2m – 1m < Radiação, turbulenta

Fonte: Fire Technology (1983)

Um parâmetro importante para determinar a ignição de sólidos (e líquidos) e a temperatura da superfície. Se e quando a superfície vai atingir a temperatura de ignição é a chave para estimar o tempo para a ignição. Além das propriedades do material devemos considerar se o material é termicamente fino ou grosso. O questionamento a ser feito é: O que é relevante para estimar o tempo para a ignição? a) temperatura da superfície do sólido, b) propriedades do sólido e c) se o sólido é termicamente fino ou grosso, o que está associado ao fluxo de calor.

Um sólido termicamente fino é caracterizado por uma temperatura uniforme através da sua espessura. Ou melhor, é um material com resistência interna ao fluxo de calor negligível. O gradiente de temperatura através do material é muito menor do que o gradiente na superfície do material, ou seja, o número de *Biot* é menor do que 1 (*Biot* < 1). A relação entre o fluxo de calor na superfície do sólido e a resistência ao fluxo de calor interno é conhecida como número de *Biot*.

A espessura de um material considerado termicamente fino é 1mm-2mm, acima dessas dimensões o material é considerado termicamente grosso, Quintiere (2017) sugere a equação 4, para estimar as dimensões física dos materiais termicamente fino e grossos.

$$EspessuraFísica \leq \frac{2k(T_{ig} - T_{\infty})}{q_l} \quad \text{Equação 4}$$

Onde

k = Condutividade térmica (W/m^2K)

T_{ig} = Temperatura de ignição (K)

T_{∞} = Temperatura ambiente (K)

q_l = Fluxo de calor incidente (kW/m^2)

Parte do calor incidente no sólido é perdido por radiação e convecção (q_{loss}). O calor incidente é proveniente da chama. Se $q_l > q_{loss}$ esse fluxo de calor é convertido em energia interna, e a temperatura do sólido aumenta. O aumento de temperatura no sólido depende de a capacidade do sólido armazenar energia, sendo estimada pelo produto da densidade do material (ρ), do seu calor específico (c_p) e espessura (l).

Para o caso adiabático o balanço de energia pode ser expresso pela equação 5. A equação 6 expressa o tempo para ignição de materiais termicamente finos, e equação 7 expressa o tempo para ignição de materiais termicamente grosso (Quintiere, 2017). A equação 6 só é válida para um período de tempo pequeno e uma taxa de aquecimento elevada, pois não considera o fato de que a temperatura aumenta com o tempo. E, também, as perdas de calor através da superfície.

$$\begin{aligned} \text{EnergiaEstocada} &= \rho c_p l (T - T_\infty) \\ \text{EnergiaAdicionada} &= (q_l - q_{loss}) \\ \text{EnergiaEstocada} &= \text{EnergiaPerdida} \therefore T \\ &= T_\infty + \frac{(q_l - q_{loss})t}{\rho cl} \end{aligned} \quad \text{Equação 5}$$

Onde

T =Temperatura

T_∞ =Temperatura Ambiente

q_l =Fluxo de calor incidente

q_{loss} =Perda de calor por convecção e radiação

t =Tempo

ρ =Densidade do material

c_p =Calor específico

l =Espessura do material

$$t_{ig} \approx \frac{\rho c_p l (T_{ig} - T_\infty)}{q_l} \quad \text{Equação 6}$$

Onde

t_{ig} =Tempo de ignição(seg)

ρ =Densidade do material(kg/m^3)

c_p =Calor específico($kJ/kJ/K$)

Revista FLAMMAE

Revista Científica do Corpo de Bombeiros Militar de Pernambuco

Artigo Publicado V.11 N°36 – Julho a Dezembro 2025 - ISSN 2359-4829 (print)

Versão on-line (ISSN 2359-4837) disponível em: <http://www.revistaflammae.com>.

l =Espessura do material(m)

T_{ig} =Temperatura de ignição (K)

T_{∞} =Temperatura ambiente (K)

q_l =Fluxo de calor incidente (kW/m²)

$$t_{ig} = \frac{\pi/4 k \rho c_p (T_{ig} - T_{\infty})^2}{(q_l - \chi q_{cr})^2} \quad \text{Equação 7}$$

Onde

t_{ig} = Tempo de ignição(seg)

$k \rho c_p$ = Inercia térmica do material Sendo k em kW/m/K, ρ em kg/m³ e c_p em kJ/kg/K

T_{ig} = Temperatura de ignição (K)

T_{∞} = Temperatura ambiente (K)

q_l = Fluxo de calor incidente (kW/m²)

χ =É uma fração do fluxo de calor crítico

q_{cr} = Fluxo de calor crítico em kW/m². $CHF \cong \sigma(T_{ig}^4 - T_{\infty}^4)$

O questionamento a ser feito é: Para a sala de origem é possível o estabelecimento da chama? A avaliação realizada foi estruturada nas propriedades do combustível e nos fatores ambientais da sala de rede, Figura 7. Observe que o calor incidente é fornecido pela ignição dos cabos de comunicação, Figura 3. E o primeiro pacote de combustível a sofrer ignição é o polietilenoteraftalato (PET) que é um termoplástico patenteado em 1941, muito utilizado para embalagem. Os dados de entrada para estimar o fluxo de calor crítico, o parâmetro de resposta térmica e o índice de propagação da chama encontram-se detalhados na Tabela 3. Os resultados obtidos, Tabela 4, indicam que uma propagação da chama para além da zona de ignição, pois o índice de propagação da chama foi maior do que 20.

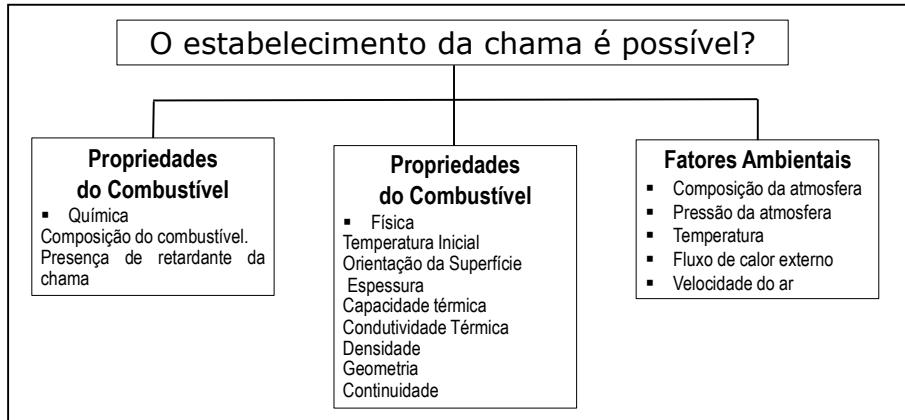
Revista FLAMMAE

Revista Científica do Corpo de Bombeiros Militar de Pernambuco

Artigo Publicado V.11 N°36 – Julho a Dezembro 2025 - ISSN 2359-4829 (print)

Versão on-line (ISSN 2359-4837) disponível em: <http://www.revistaflammae.com>.

Figura 7 – O estabelecimento da chama é possível?



Fonte: Introduction to Fire Dynamics (2011)

Tabela 3 - Dados de entrada para estimar o *CHF*, *TRP* e *FPI*.

Dados de Entrada:

$$\sigma = 5,67 \cdot 10^{-11} \text{ kW/m}^2 \text{ - K}^4$$

$$T_{ig} = 374 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$T_{\infty} = 20 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$k = 0,0002 \text{ kW/mK}$$

$$\rho = 1.455 \text{ kg/m}^3$$

$$c_p = 1 \text{ kJ/kg - K}$$

$$\text{Calor liberado pelo cabo IBMTipo 2 (}q\text{)} = 19 \text{ kW/m}^2$$

$$\text{Calor liberado pelo cabo IBMTipo 2 (}q\text{)} = 33,7 \text{ kW por unidade}$$

$$\text{Largura} = 0,1\text{m}$$

Fonte: Autores

Tabela 4 - Resultados: *CHF*, *TRP* e *FPI*.

Resultados

$$CHF \approx 9,5 \text{ kW/m}^2$$

Observações

O calor incidente para o caso de ignição nos

$$k\rho c_p = 0,291 \left(\frac{kW}{m^2 K} \right)^2 s$$

$$TRP = 169 \text{ kW} - s^{1/2} / m^2$$

$$t_{ig} = 79 \text{ s}$$

$$Q_{c\square} = 337 \text{ kW/m}^2$$

$$FPI = 31$$

cabos de comunicação é aproximadamente **19 kW/m²**, logo a ignição é possível, sendo o tempo de ignição de 79 segundos.

O tempo de ignição é $t_{ig} \approx \left(\frac{TRP}{q} \right)^2 \text{ seq} > CHF$

Sendo **FPI > 20** há uma aceleração da propagação da chama além da região de ignição.

Fonte: Autores

A avaliação da sala de rede foi baseada no estabelecimento da chama, Figura 1 e a Tabela 5 indicou que o *flashover* é provável de ocorrer. Na próxima seção busca-se responder ao seguinte questionamento: Qual a energia liberada pelo *flashover* na sala de origem? O questionamento será respondido utilizando as expressões propostas por Babrauska, Thomas e McCaffrey, Quintiere e Harklerood.

Tabela 5. Avaliação da sala de rede baseada no estabelecimento da chama.

Variáveis		Sala de Rede
Tamanho	Área do Chão	$11,29 \text{ m}^2$
	Volume	$28,11 \text{ m}^3$ <i>Flashover</i> É provável
	Altura do Teto	2,49 m e 1,28m
Acabamento	Parede	Alvenaria
	Teto	Laje

	Chão	Concreto
Pacotes Combustíveis (Clusters)	Aproximadamente 50% da área do chão ocupado pela mobília.	
Taxa de Calor Liberado (HRR) dos Materiais Presentes	<i>Nobreak, swictcher, badejas de cabos de potência e comunicação.</i>	
Combustível (Contribui para o estabelecimento da chama)	Papelão, madeira e PET. Risco elevado.	
Ventilação	Não adequada	

Fonte: Autores

3.3.1 Qual a energia liberada pelo *flashover* na sala de origem?

Quando a chama é estabelecida, o que pode acontecer?

- I. O incêndio envolve apenas o primeiro item que sofreu ignição, não envolvendo outros combustíveis, o que provavelmente acontecerá se o item que sofreu ignição estiver isolado.
- II. Se a ventilação não for adequada o incêndio poderá se autoextinguir ou continuar queimando a uma taxa muito baixa, o que poderá levar a um *backdraft*.
- III. Se houver suficiente combustível e ventilação o incêndio poderá evoluir até o completo envolvimento do compartimento em chamas, ou seja, os combustíveis presentes no recinto queimarão. Há uma transição entre o período de crescimento do incêndio e o seu completo desenvolvimento, a qual é conhecida como *flashover*. Ou seja, o *flashover* é o último sinal antes que as condições que comprometeram a vida dos ocupantes da sala de origem sejam alcançadas, bem como do comprometimento das barreiras que propagará o incêndio para além da sala de origem. Um cenário que conduza a uma rápida propagação do incêndio diminuirá o tempo para atingir o *flashover*, um exemplo extremo pode ser encontrado no incêndio envolvendo a Boate Kiss (2013).

O conceito de *flashover* está associado a espaços fechados com um volume de aproximadamente $100m^3$, porém o incêndio ocorrido em 1985 no Bradford Football Stadium (UK) revelou que o termo *flashover* poderá ser empregado para espaços abertos, em que o confinamento existe apenas devido a presença do teto (Drysdale, 2011). Para a maioria dos combustíveis queimando em um espaço aberto aproximadamente 30% do calor liberado pela

chama é irradiado para o ambiente, e o restante é dispersado na coluna de flutuação. Porém, em um espaço com restrições (paredes e teto), se a altura da chama for maior do que a altura do teto, teremos a formação do jato de teto, contribuindo significativamente para transferir calor para o teto. A camada de gases aquecidos no teto irradia calor de volta para a chama. Quando o fluxo horizontal de gases aquecidos no teto é interrompido pelas limitações do compartimento a camada de gases quente e fumaça muda de direção, caminhando em direção ao chão.

3.3.2 E como definir o *flashover*?

Os bombeiros, em geral, reconhecem o *flashover* quando a chama se propaga além da sala de origem. É um período de transição da etapa de crescimento do incêndio para o seu completo desenvolvimento. O *flashover* define o momento em que a sala de origem está envolvida em chamas. Para a ISO/CD 13943 define *flashover* como a rápida transição para um estado de total envolvimento pelas chamas de um recinto. O termo *flashover* está associado a uma mudança rápida de um incêndio localizado para o envolvimento de todos os combustíveis do recinto pelas chamas.

Em outras palavras, em geral o *flashover* é definido como a transição entre a etapa de crescimento do incêndio e o seu completo desenvolvimento, no qual todos os itens combustíveis presentes no ambiente são envolvidos pelas chamas, ou seja há uma rápida mudança das condições do recinto. O critério para que o *flashover* ocorra está baseado na temperatura, na qual a radiação proveniente dos gases quentes (no teto) irá provocar ignição de todos os itens combustíveis presentes no ambiente. A temperatura na faixa de 300°C-650°C tem sido associada ao início do *flashover*, embora a temperatura entre 500°C-600°C seja mais aceita e largamente usada.

Porém, 1) a ignição do combustível não queimado nos gases quente do incêndio; 2) a aparição da chama através das aberturas; e 3) a ignição de todo

o combustível presente no ambiente também podem ser relacionadas ao *flashover*.

As equações 8, 9 e 10, expressam a energia liberada pelo *flashover* segundo Babrauskas, Thomas e MQH, respectivamente.

$$Q_{fo} = 750 \cdot A_v \cdot \sqrt{c_{\square_v}} \quad \text{Equação 8}$$

$$Q_{fo} = 7,8 \cdot A_t + 378 \cdot A_v \cdot \sqrt{c_{\square_v}} \quad \text{Equação 9}$$

$$Q_{fo} = 610 \cdot (c_k \cdot A_t \cdot A_v \cdot \sqrt{c_{\square_v}})^{1/2} \quad \text{Equação 10}$$

Onde

Q_{fo} = Taxa do calor liberado necessário para que o *flashover* ocorra (kW)

A_v = Área de ventilação (m^2)

c_{\square_v} = Altura média das aberturas de ventilação (m)

A_t = Área total da superfície da sala (m^2)

c_k = Coeficiente de transferência de calor (kW/m^2K)

A Figura 8 mostra uma vista de frente da sala de rede e a entrada de ar condicionado. A Tabela 6 apresenta os valores obtidos da energia liberada pelo *flashover* na sala de rede.

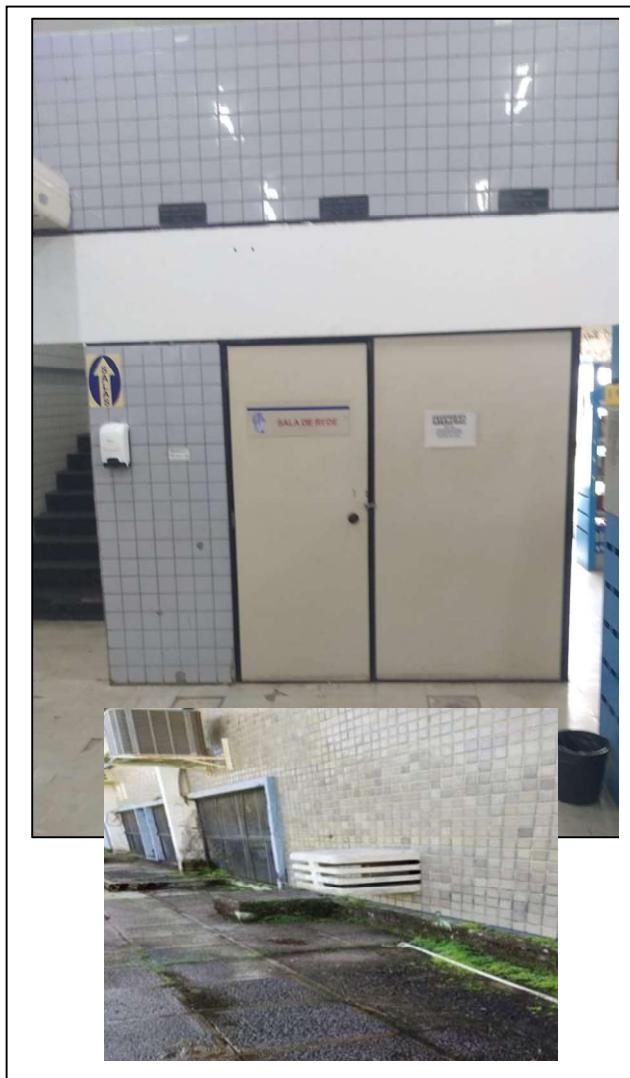
Revista FLAMMAE

Revista Científica do Corpo de Bombeiros Militar de Pernambuco

Artigo Publicado V.11 N°36 – Julho a Dezembro 2025 - ISSN 2359-4829 (print)

Versão on-line (ISSN 2359-4837) disponível em: <http://www.revistaflammae.com>.

Figura 8 – Vista de frente da sala de rede



Fonte: Autores

Tabela 6 - Energia liberada pelo *flashover*.

Dados de Entrada

Área total da superfície da sala:

$$A_t = 11,29 \text{ m}^2$$

Área de ventilação:

$$A_v = 0,18 \text{ m}^2$$

Dimensões da porta: **2,49mx 0,91m**

Dimensões da abertura do ar- **0,50mx 0,35,**
condicionado:

Altura do ar-condicionado acima do **0,5m**
chão:

Coeficiente efetivo de transferência de **0,03 kW/m²K**
calor:

Resultados para a porta fechada e sem o ar-
condicionado:

$Q_{fo} = 93kW$ Equação 8

$Q_{fo} = 135kW$ Equação 9

$Q_{fo} = 125kW$ Equação 10

Fonte: Os Autores

Segundo *US Nuclear Regulatory Commission* para fins de projeto deve ser considerado o calor liberado na faixa de 100kW-50MW. Observe que a energia liberada pelo *flashover* na sala de rede foi estimada entre 93kW e 135kW.

4. CONCLUSÕES

Quando em 1856 Dom Pedro II assinou o decreto que instituiu o Corpo de Bombeiro Provisório da Corte, no mesmo ano ocorreu um incêndio que destruiu o Teatro São João, hoje Teatro São Caetano, no Rio de Janeiro. O teatro São João foi inaugurado em 1813. E foi destruído por três incêndios em 1824, 1851 e 1856, respectivamente. Segundo as pegadas do Corpo de Bombeiro Provisório da Corte o Corpo de Bombeiro de São Paulo foi criado em 1880, aproximadamente um mês após um incêndio que destruiu a Biblioteca da Faculdade de Direito e o arquivo do Convento de São Francisco em 15 de fevereiro de 1880.

Na década de 1970 após vários incêndios ocorridos a nossa legislação contra incêndio foi revisada. Dois anos após o incêndio do Edifício Andraus (1972) e uma semana após o incêndio do edifício Joelma (1974) que ceifou a vida de 179 pessoas a prefeitura de São Paulo edita o Decreto Municipal

10.878 que instituiu normas essenciais para a segurança contra incêndio dos edifícios, as recomendações dessa regulamentação são incorporadas na Lei 8.266 de 1975, o novo código de edificação de São Paulo.

No ano de 1974 a Associação Brasileira de Normas Técnicas publica a NB 208 sobre saídas de emergências em edifícios altos.

Em 1976, o governador do Rio de Janeiro regulamenta no Estado o Decreto Lei 247 que dispõe sobre a segurança contra incêndio.

Já em 2017 após vários incêndios classificados como desastres tecnológicos, os quais não corroboraram as nossas boas práticas de engenharia na prevenção dos incêndios e explosões, é publicada a Lei de número 13.425 também conhecida como lei da Boate Kiss.

Dentro desse contexto, é evidente que a segurança contra incêndio no Brasil é baseada em uma cultura de desastres, em que recomendações prescritivas surgem após algum grande incêndio que resultou em elevadas perdas humanas, falência de negócios e da preocupação da sociedade.

Apesar do sucesso reconhecido de códigos e normas bem estabelecidos, atualmente novos questionamentos são relevantes: Como a edificação se comportará no evento de um incêndio? Para responder a esse questionamento é imprescindível métodos de avaliação que sejam baseados na dinâmica do incêndio e que incorporem critérios de desempenho no projeto para a prevenção do incêndio.

Em outras palavras, a internet das coisas e inteligência artificial (apenas para citar dois exemplos) vem transformando as edificações em sistemas complexos e fortemente acoplados, onde leis, decretos, portarias e boas práticas de engenharia não respondem ao questionamento: o quanto seguro é o suficientemente seguro?

Se a meta da proteção contra incêndio é minimizar o impacto do incêndio sobre os ocupantes então o objetivo do projeto é prevenir o *flashover* na sala de origem. Ou talvez reduzir a probabilidade do incêndio se propagar

Revista FLAMMAE

Revista Científica do Corpo de Bombeiros Militar de Pernambuco

Artigo Publicado V.11 N°36 – Julho a Dezembro 2025 - ISSN 2359-4829 (print)

Versão on-line (ISSN 2359-4837) disponível em: <http://www.revistaflammae.com>.

além da sala de rede, como? A temperatura dos gases aquecidos no teto da sala de origem não deve ser maior do que 500°C. Em muitos casos o engenheiro necessitará desenvolver critérios de desempenho a partir da meta e do objetivo estabelecidos pelos envolvidos no projeto, os quais incluem também as autoridades responsáveis por autorizações necessárias e obrigatórias e os consumidores.

Parâmetros como o fluxo de calor crítico, de resposta térmica, de propagação da chama e a energia liberada pelo *flashover*, para edificações já existentes, e no contexto da sala de origem, poderão ajudar o engenheiro a tomar melhores decisões no seu dia a dia e consequentemente produzir edificações mais seguras, resilientes e principalmente que protejam as vidas de seus ocupantes.

REFERÊNCIAS

- ALPERT, R. L.; WARD, E. J. Evaluation of Unsprinklered Fire Hazard. **Fire Safety Journal**, v. 7, p.127-143, 1984.
- ATREYA, A. Ignition of Fire. **Philosophical Transaction of Royal Society**, v.356 (1748), Fire Dynamics, p. 2787-2813,1998.
- BABRAUSKAS, V. Estimating Large Pool Fire Burning Rates. **Fire Technology**, v.19, p. 251-261, 1983.
- BABRAUSKAS, V. **Ignition Handbook**. Interscience Communication Ltd, 2003, p.773.
- DRYSDALE, D. **An Introduction to Fire Dynamics** (3rd ed.). John Wiley&Sons Ltd, 2011, p. 248, p.278, p.348, p.352.
- FAHY, R.F. Building Fire Simulation Model an Overview. **Fire Safety Journal**, v.9, p.189-203, 1985.
- FITZGERALD, R.W. **Building Fire Performance Analysis**. John Wiley&Sons Ltd, p.32-36, p.101. 2004

Revista FLAMMAE

Revista Científica do Corpo de Bombeiros Militar de Pernambuco

Artigo Publicado V.11 N°36 – Julho a Dezembro 2025 - ISSN 2359-4829 (print)

Versão on-line (ISSN 2359-4837) disponível em: <http://www.revistaflammae.com>.

FITZGERALD, R. W.; MEACHAN, B. J. **Fire Performance Analysis for Building**(2nd ed.). Wiley, 2017, p. 86, p.138, 149-164.

GAO, Z. et al. An Investigation of the Detailed Flame Shape and Flame Length Under the Ceiling of a Channel. **Proceedings Combustion Institute**, v 36(3), p. 2657-2664, 2015.

HIRSCHLER, M. M. **Fire Hazard and Fire Risk Assessment**. American Society for Testing Material, 1992, p. 55.

KARLSSON, B.; QUINTIERE, J.G. **Enclosure Fire Dynamics**. CRC Press, 2000, p.22.

KASHIWAGI, T. Radiative Ignition Mechanism of Solid Fuel. **Fire Safety Journal**, v.3, p. 185-200, 1981.

MARCONI, M. de A.; LAKATOS, Eva Maria. **Metodologia científica**. São Paulo: Atlas, 2004.

MORGAN, J.H. **SFPE Handbook of Fire Protection Engineering**. Springer, 2016, p.1216.

QUINTIERE, J. G. **Principles of Fire Behavior** (2nd ed.). Taylor and Francis Group, 2017, p.118, p.269.

SAATY, T.L. **Decision Making for Leader** (3th ed.). RWS Publications, 2001, p. 93-118.

TEWARSON, A. Generation of Heat and Chemical Compounds in Fires. In: **The SFPE Handbook of Fire Protection Engineering** (2nd ed.), p. 3-53. Boston Massachusetts, 1995.

US NUCLEAR REGULATORY COMMISSION. **Report NUREG 1805**, 2004.

WESSON, et al. The Piloted Ignition of Wood by Thermal Radiation. **Combustion and Flame**, v.16, p. 303-310, 1971.