



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA
PROGRAMA DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

RODRIGO JOSÉ ROSA BORGES SOUZA LEÃO

**IMPACTO DA PLUMA SIMPLIFICADA NA ESTIMATIVA DO FLUXO DE MASSA QUE
ENTRA EM UMA PLUMA DE INCÊNDIO**

Recife

2021

RODRIGO JOSÉ ROSA BORGES SOUZA LEÃO

**IMPACTO DA PLUMA SIMPLIFICADA NA ESTIMATIVA DO FLUXO DE MASSA QUE
ENTRA EM UMA PLUMA DE INCÊNDIO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao programa de graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito parcial para a obtenção do título de Grau de Bacharel em Engenharia Mecânica.

Orientadora: Prof^ª. D^ª. Sc. Dayse Cavalcanti de Lemos Duarte.

Recife
2021

Catálogo na fonte
Bibliotecária Maria Luiza de Moura Ferreira, CRB-4 / 1469

L437i Leão, Rodrigo José Rosa Borges Souza.
Impacto da pluma simplificada na estimativa do fluxo de massa que entra em uma
pluma de incêndio/Rodrigo José Rosa Borges Souza Leão. - 2021.

43 folhas, il.

Orientadora: Profa. Dra. Dayse Cavalcanti de Lemos Duarte.

TCC (Graduação) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG. Departamento de Graduação em
Engenharia Mecânica, 2021.

Inclui Referências.

1. Engenharia Mecânica. 2. Pluma de incêndio. 3. Origem virtual. 4. Pluma de
Heskestad. I. Duarte, Dayse Cavalcanti de Lemos (Orientadora). II. Título.

UFPE

621 CDD (22. ed.)

BCTG/2022-202

RODRIGO JOSÉ ROSA BORGES SOUZA LEÃO

**IMPACTO DA PLUMA SIMPLIFICADA NA ESTIMATIVA DO FLUXO DE MASSA QUE
ENTRA EM UMA PLUMA DE INCÊNDIO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao programa de graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito parcial para a obtenção do título de Grau de Bacharel em Engenharia Mecânica.

Aprovada em: 12/08/2021

BANCA EXAMINADORA

Prof^a. Dr^a. Dayse Cavalcanti de Lemos Duarte (Orientador)
Universidade Federal de Pernambuco

Prof. Dr. Antônio Marques da Costa S. Júnior (Examinador Interno)
Universidade Federal de Pernambuco

Prof. Dr. Tiago Ancelmo Carvalho Pires (Examinador Interno)
Universidade Federal de Pernambuco

RESUMO

Quando uma massa de gases aquecidos é envolvida por gases frios, os gases quentes irão ascender devido a uma diferença de temperatura. Isto é o que acontece acima de uma fonte de combustível que sofreu ignição, na qual a coluna de gases quentes que sobe é conhecida como pluma do incêndio. Dado a complexidade da pluma de incêndio, a qual envolve fluxo turbulento, reações químicas e forças de flutuabilidade, não é surpresa a nossa limitação do conhecimento em estimar parâmetros como velocidade, temperatura, altura da chama, entre outros. Na engenharia, para estudar fenômenos complexos é usual realizar experimentos e utilizar parâmetros de similaridade para aplicar os resultados a outras configurações. A análise de variáveis de uma pluma de incêndio, como o seu fluxo de massa, temperatura e velocidade da linha central, são de extrema importância na Engenharia de Incêndio quando se trata do projeto de sistema de fumaça, detectores e chuveiros automáticos (sprinklers). Ademais, diversos meios de calcular essas variáveis são encontrados na literatura atualmente. Modelos da pluma de incêndio, como o de Heskestad, Thomas, Zukoski e McCaffrey são os mais utilizados hoje em dia. Na pluma de incêndio de Heskestad foi introduzida uma ferramenta importantíssima que visa à obtenção de dados mais realísticos de uma pluma de incêndio, chamada de origem virtual, na qual diz que o ponto em que toda a energia da pluma ideal é concentrada é substituído por uma origem virtual. Com este cenário, o objetivo desta pesquisa foi de avaliar o impacto do uso da origem virtual, proposto por Heskestad, na estimativa de variáveis como o fluxo de massa e a temperatura e velocidade da linha central de uma pluma de incêndio. A pesquisa realizada neste trabalho foi de caráter quantitativo, na qual foram usadas variáveis próximas às situações reais, em que se calculou com e sem o uso da origem virtual o fluxo de massa e a temperatura e velocidade da linha central de uma pluma de incêndio. Em seguida, esses dados foram comparados e o impacto da origem virtual foi obtido. A variação do fluxo de massa com o uso da origem virtual para uma altura acima da superfície do incêndio de 20 metros indicou que para densidades de energia menores a equação simplificada da pluma de Heskestad subestimou o fluxo de massa, enquanto que para densidades de energia maiores a origem virtual sobreestimou. Por outro lado, para uma densidade de energia constante, a velocidade da pluma no seu eixo central não é sensível à origem virtual ao

variar a altura da pluma. Já a temperatura do eixo central é sensível à origem virtual para baixos valores de altura da chama, na qual o uso da origem virtual sobreestimou, porém para grandes valores de altura a temperatura do eixo central não é sensível à altura virtual da pluma.

Palavras-chave: pluma de incêndio; origem virtual; pluma de Heskestad.

ABSTRACT

When a mass of heated gases is surrounded by cold gases, the hot gases will ascend due to a temperature difference. This is what happens above a fuel source that has been ignited, where the column of hot gases that rises is known as the fire plume. Given the complexity of the fire plume, which involves turbulent flow, chemical reactions and buoyancy forces, is not a surprise our knowledge limitation in estimating parameters such as speed, temperature, flame height, among others. In engineering, to study complex phenomons it is customary to perform experiments and use similarity parameters to apply the results to other configurations. The analysis of variables of a fire plume, such as its mass flow, temperature and axis speed, are of utmost importance in Fire Engineering when it comes to the design of smoke system, detectors and automatic showers (sprinklers). In addition, several means of calculating these variables are found in the literature today. Models of the fire plume, such as that of Heskestad, Thomas, Zukoski and McCaffrey are the most used nowadays. In the Fire Plume of Heskestad was introduced a very important tool aimed at obtaining more realistic data of a fire plume, called virtual origin, in which it says that the point at which all the energy of the ideal plume is concentrated is replaced by a virtual origin. With this scenario, the objective of this research was to evaluate the impact of the use of the virtual origin, proposed by Heskestad, in the estimation of variables such as the mass flow and the temperature and speed of the axis of a fire plume. The research carried out in this work was quantitative, in which variables were used close to the real situations, in which the mass flow and the temperature and speed of a fire plume were calculated with and without the use of virtual origin. The variation of the mass flow with the use of the virtual origin for a height above the surface of the fire of 20 meters indicated that for lower energy densities the simplified equation of the Heskestad plume underestimated the mass flow, while for larger energy densities the virtual origin overestimated. On the other hand, for a constant energy density, the speed of the plume on its central axis is not sensitive to virtual origin when varying the height of the plume. The temperature of the central axis is sensitive to the virtual origin for low flame height values, in which the use of the virtual origin overestimated, but for large height values the temperature of the central axis is not sensitive to the virtual height of the plume.

Keywords: fire plume; virtual origin; heskestad plume.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	8
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	9
2.1	CONDIÇÕES NECESSÁRIAS PARA UM INCÊNDIO OCORRER.....	9
2.1.1	Pirólise.....	9
2.1.2	Flaming ignition.....	10
2.1.3	Ignição espontânea.....	12
2.1.4	Etapas do desenvolvimento do incêndio.....	15
2.2	PLUMA DE INCÊNDIO.....	19
2.2.1	A pluma ideal.....	19
2.2.2	Pluma de Zukoski.....	21
2.2.3	Pluma de Heskestad.....	24
2.2.4	Pluma de Mccaffrey.....	26
2.2.5	Pluma de Thomas.....	27
3	METODOLOGIA	29
4	RESULTADOS: CARACTERIZAÇÃO DA PLUMA DO INCÊNDIO	32
5	CONCLUSÃO	41
	REFERÊNCIAS	42

1 INTRODUÇÃO

O incêndio é uma reação exotérmica, o qual é iniciado por uma fonte de ignição (ou seja, uma fonte de calor), e o seu crescimento depende do material envolvido (combustível), sua orientação e posição em relação ao compartimento e outros itens presentes no ambiente. A situação mais comum é que haverá suficiente oxigênio para suportar o processo de combustão nos minutos iniciais, e que o crescimento do incêndio e a produção de fumaça serão controlados pelo combustível. Em locais fechados, com aproximadamente 100m^3 , a fumaça e os gases aquecidos irão alcançar o teto através da pluma de incêndio. Após atingir o teto, a coluna de gases aquecidos (ou seja, a pluma do incêndio) forma um jato de gases aquecidos no teto, e se a temperatura dos gases aquecidos no teto estiver em torno de 500°C e 600°C , todo o ambiente será envolvido em chamas, fenômeno conhecido também como *flashover*.

Em outras palavras, considerando que o incêndio teve origem em um compartimento que denominaremos sala de origem, uma coluna de flutuação térmica com gases aquecidos sobe acima de uma fonte de ignição em direção ao teto. Ou seja, o fluxo ascendente, também conhecido como pluma do incêndio, é induzido pelo aumento da temperatura e conseqüente redução da densidade. Ao mesmo tempo em que os gases quentes ascendem, gases frios entram na pluma.

O objetivo geral deste trabalho consiste na avaliação do impacto do uso da origem virtual, proposto por Heskestad, na estimativa do fluxo de massa e da velocidade e temperatura da linha central em uma pluma de incêndio. O modelo utilizado trata-se de uma pluma de incêndio gerada por um incêndio em local fechado. O incêndio é propiciado devido à pirólise (normalmente incêndios em locais fechados são possibilitados pela pirólise) e a taxa de liberação de calor não será considerada constante. As análises dessas variáveis de uma pluma de incêndio são de extrema importância na Engenharia de Incêndio no âmbito do projeto de sistema de fumaça, detectores e chuveiros automáticos (sprinklers). E para atingir esse objetivo geral, alguns objetivos específicos serão alcançados: calcular com e sem o uso da origem virtual o fluxo de massa e a temperatura e velocidade da linha central de uma pluma de incêndio; organizar em gráficos de forma comparativa os resultados obtidos dos cálculos com e sem o uso da origem virtual para cada cenário especificado; e avaliar quantitativamente o impacto do uso da origem virtual na estimativa do fluxo de massa e na velocidade e temperatura da linha de centro de uma pluma de incêndio.

A pirólise consiste em um processo endotérmico de decomposição térmico molecular necessário para que a maioria dos combustíveis sólidos possa sofrer combustão, e que ocorre em detrimento da ação de altas temperaturas presentes. Na pirólise, ocorre a decomposição dos combustíveis sólidos em partículas menores, fazendo com que esses combustíveis sólidos produzam gases, alguma água e subprodutos sólidos que podem assumir a forma de cinzas ou carvão. Esses gases, formados através do processo da pirólise, podem formar uma mistura gasosa com o ar que seja uma mistura gasosa inflamável (DRYSDALE, 2011).

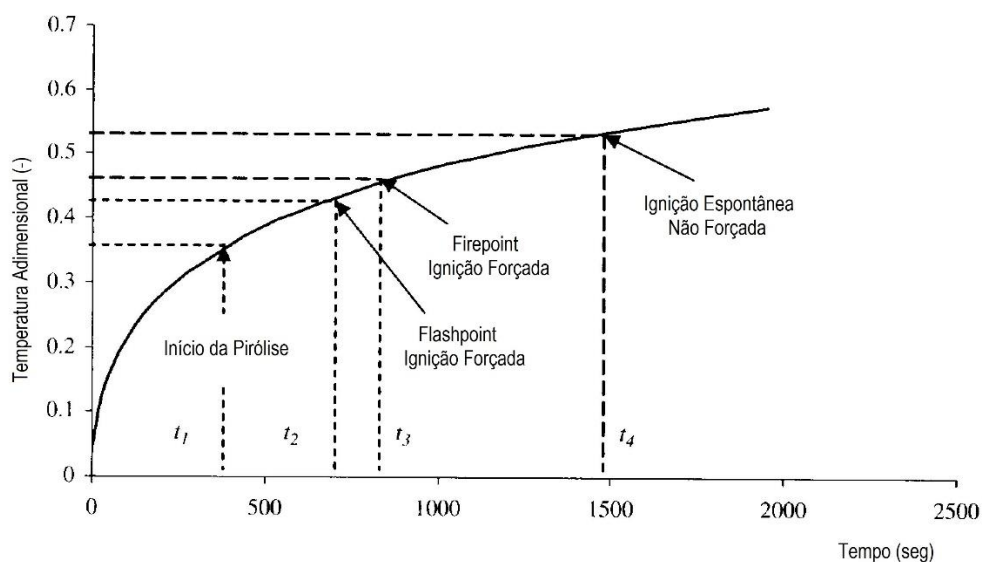
2.1.2 Flaming Ignition

Há diferentes maneiras de um combustível sólido sofrer ignição. A ignição pode ser iniciada no próprio sólido ou pode ser iniciada na fase gasosa. Quando iniciado na fase gasosa, poderá resultar na propagação do incêndio, sendo referido na literatura como *flaming ignition*. *Flaming ignition* é a combustão na superfície do sólido, o material deve gaseificar antes de queimar na sua superfície. O material sólido deve ser aquecido para gaseificar. Em outras palavras, na *flaming ignition* o combustível são os gases acima da superfície do material sólido. Este combustível gasoso deve ser liberado rápido o suficiente para formar uma mistura inflamável com o ar presente na superfície do sólido. A mistura de gases está sendo removida da superfície do sólido, por forças convectivas ou outras, e deve ser constantemente alimentada por gases provenientes da gaseificação do sólido para formar uma mistura inflamável. A taxa de gaseificação aumenta com o aquecimento contínuo do material sólido. Com o aumento da taxa de gaseificação uma mistura inflamável é formada. Apesar da existência da mistura inflamável próxima à superfície do sólido, a ignição provocada, talvez através de uma centelha, poderá não ocorrer. É necessário que a fonte de calor esteja próxima da concentração inflamável. Vale ressaltar, que a ignição poderá ocorrer também quando os gases na superfície do sólido estiverem quentes o suficiente para que a ignição ocorra espontaneamente, ou seja, a ignição poderá ocorrer na ausência de uma fonte de ignição externa, este processo de ignição na literatura é referido como auto-ignição.

Quando um objeto sólido é exposto a uma fonte de calor, a ignição irá ocorrer após certo tempo de exposição, o tempo para que a ignição ocorra depende: da degradação térmica do material e a conseqüente formação da camada gasosa, da mistura da camada gasosa com o ar, e de uma temperatura mínima que deve ser fornecida à mistura inflamável para que a ignição ocorra. O conceito da temperatura crítica na superfície do sólido é um critério útil

para a Engenharia de Incêndio. Atualmente os testes padrões para estimar a temperatura de ignição e o tempo de ignição assumem um sólido inerte (ou seja, o sólido permanece inerte até que a ignição ocorra) submetido a um fluxo de calor constante e a uma ignição forçada. A ignição forçada é associada à *flaming ignition* e ocorre se um fluxo de massa crítico de vapores combustível foi excedido, o que indica que o fluxo de voláteis corresponde a um fluxo de massa maior do que um valor crítico. E se as condições necessárias se mantêm favoráveis a chama será estabelecida. A Figura 2 mostra o desenho esquemático da *flaming ignition*.

Figura 2 – Desenho esquemático da *flaming ignition*.



FONTE: DRYSDALE (2011).

No tempo t_1 é possível visualizar os produtos da pirólise, este é o tempo para aquecer a superfície, iniciar a vaporização e produzir gases combustíveis em quantidade suficiente.

O processo de mistura da camada gasosa com o ar é controlado por difusão e convecção e leva alguns segundos após a vaporização ocorrer na superfície do sólido. As reações químicas precisam de tempo para liberar energia suficiente para a chama ser percebida. Para a ignição forçada o tempo estimado é menor do que um segundo, para a auto-ignição este tempo pode ser mais longo. No tempo t_2 os produtos da pirólise são suficientes para formar uma mistura flamável próxima a superfície do sólido. Estas concentrações flamáveis são pequenas e se formam rapidamente. A ignição poderá ocorrer através de uma fonte independente, e poderá produzir um *flash*, porém não é suficiente para sustentar o

processo de combustão. No tempo t_3 a taxa de voláteis produzidos pela pirólise é suficiente para sustentar a chama, se uma fonte de ignição estiver presente. Se no tempo t_2 e t_3 a fonte independente de ignição não estiver presente, a temperatura da camada gasosa continuará aumentando e a ignição espontânea ocorrerá (QUINTIERE, 2006).

2.1.3 Ignição Espontânea

A mínima temperatura que uma mistura inflamável contida em um recipiente deve atingir para iniciar o processo de combustão é denominada temperatura de auto-ignição, sendo também conhecida como temperatura de ignição espontânea. A temperatura de ignição sugere que a temperatura do ambiente é uniforme, a mistura gasosa é mantida em contato com as paredes aquecidas do recipiente durante 5 minutos. É observado que há um espaço de tempo entre a temperatura de ignição da mistura e o surgimento da chama, e este período de tempo é o tempo de ignição (também referido como tempo de indução).

Uma mistura inflamável não precisa ser aquecida a uma temperatura elevada para que a ignição ocorra. Uma centelha com uma energia de aproximadamente 1 milijoules poderá provocar a ignição de uma mistura inflamável. O termo ignição provocada é utilizado para enfatizar a natureza da energia de ignição, e inclui todas as formas de introduzir energia em uma mistura. Estudos indicam que o tempo em que a energia é liberada para o ambiente é relevante. Em outras palavras, o termo ignição provocada está associado a uma fonte de ignição localizada, ao contrário da ignição espontânea que se vincula ao aquecimento da mistura inflamável contida em um recipiente. A ignição acidental de gases que resultaram em muitos acidentes está associada a uma centelha, superfície aquecida, entre outras. Foi observado experimentalmente por Sir Humphrey Dave que uma mistura gasosa não é capaz de propagar a chama se muito diluída ou muito concentrada, ou seja, a mistura deve estar em uma faixa de concentração, a qual foi batizada de limites de inflamabilidades, a chama não poderá se propagar através de espaços pequenos. Esta mínima distância de extinção é relevante para o projeto de corta-chama, instalados, por exemplo, em tubulações que contenham fluido inflamável com a função de permitir a passagem de vapor em condições de operação e impedir a propagação da chama em uma condição de emergência (JONES, 1993)

Em nossa abordagem ênfase será dada a reação entre um combustível gasoso e o ar em um recipiente que ao ser aquecido reage exotermicamente. O termo combustão espontânea ou auto-ignição descreve a perda de controle da reação química decorrente do aumento do calor produzido. A taxa do calor produzido é maior do que a taxa de calor perdido. A

combustão espontânea está associada a materiais com uma baixa condutividade térmica, pois não permitem a dissipação do calor. Poderá ocorrer em uma pilha de material orgânico úmido onde o calor poderá ser fornecido pela respiração de bactérias ou fungo. Em uma faixa de temperatura de 50°C e 70°C, estes organismos não sobrevivem. Para temperaturas maiores é necessário que ocorra uma reação química (BOWES, 1984)

Se uma mistura de combustível e oxidante estiver dentro dos limites de flamabilidade, a uma temperatura baixa (a qual é inferior a temperatura de auto-ignição), a reação exotérmica não será iniciada, porém o aumento da temperatura poderá dar início ao processo de combustão, e a temperatura a partir da qual a reação poderá ser iniciada espontaneamente é conhecida como temperatura de auto-ignição. É observado que há um período de tempo entre o momento que a mistura atingiu a temperatura de ignição e o momento em que a chama é visível. Este período de tempo é chamado de tempo de ignição ou período de indução.

Os cientistas russos Nikolai Semenov e David Frank Kamenetskii são considerados os primeiros a entender e quantificar a temperatura de ignição. Em nossa análise, não será considerado o detalhamento da reação exotérmica, será considerada uma única reação exotérmica fortemente influenciada pela temperatura. O aumento da temperatura obedece a equação de Arrhenius.

Como já mencionado, o incêndio é iniciado por uma fonte de calor quando o ambiente estiver nas condições apropriadas, ou seja, a mistura combustível e ar estiverem dentro de seus limites de flamabilidades. E o incêndio produz calor e uma pequena fração de luz. A emissão de luz é devido a partículas sólidas incandescentes como o carbono presente na chama ou em razão de alguma espécie intermediária. Parte do calor gerado pela reação permanece na reação e parte é perdida para o ambiente.

Considere que o calor liberado em um pequeno volume é dado pela Equação 1, e o calor perdido para o ambiente pela Equação 2. A Figura 3 mostra esquematicamente a relação entre o calor liberado e o calor perdido. Vale ressaltar que este é um argumento válido apenas para uma análise qualitativa, pois não há uma indicação de que existe uma temperatura em que a mistura reage, devido à capacidade térmica do combustível e também devido às perdas de calor que serão alteradas para temperaturas elevadas, especialmente quando as perdas por radiação forem significativas.

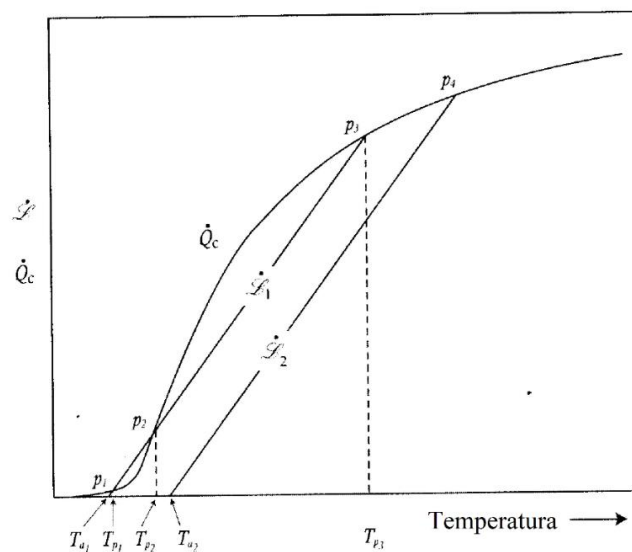
$$Q_c = \Delta H_c \cdot V \cdot C_i^n \cdot A \cdot \exp\left(\frac{-E_a}{R \cdot T}\right) \quad (1)$$

Observe que a Equação 1 indica que não há uma temperatura em que $Q_c = 0$ indicando que a oxidação ocorre mesmo na temperatura ambiente, a uma taxa insignificante, ou seja o calor é perdido, mas não há um aumento significativo da temperatura ambiente e Q_c permanece negligível.

$$\mathcal{L} = h \cdot S \cdot \Delta T \quad (2)$$

A Figura 3 mostra que para provocar a ignição de uma mistura inflamável na temperatura ambiente T_a , suficiente energia deve estar disponível para transferir o sistema de seu estado estável p , na temperatura T_{p1} para uma condição instável a uma maior temperatura T_{p2} . No ponto p_1 é um ponto de equilíbrio, $Q_c = \mathcal{L}$ e $\Delta T = T_{p1} - T_a$, uma pequena perturbação neste ponto o sistema retornará ao equilíbrio. Porém, no ponto p_2 apesar de equilíbrio do sistema ($Q_c = \mathcal{L}$) uma perturbação em p_2 conduz a uma instabilidade. Se no ponto p_2 a temperatura é reduzida observamos que $\mathcal{L} > Q_c$, indicando que o sistema será resfriado e caminhará para o ponto p_1 . Por outro lado, para um aumento de temperatura $Q_c > \mathcal{L}$, o que conduz o sistema para o ponto p_3 .

Figura 3 – Calor liberado pela reação química versus calor perdido para o ambiente em função da temperatura.



FONTE: DRYSDALE (2011).

2.1.4 Etapas do Desenvolvimento do Incêndio

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 liberará 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 (*flaming ignition*) ou espontânea. Diferentes materiais liberam diferentes quantidades de calor quando queimam. A transferência de calor influencia 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. Com a intenção de entender o desenvolvimento do incêndio, vamos dividi-lo em etapas, vide Figura 4. O incêndio faz uma transição entre: 1) uma ignição frágil e a ignição, 2) a ignição e o estabelecimento da chama, e 3) do estabelecimento da chama e o *flashover*.

Etapas 1: Quando há um aumento de calor acima do normal ou devido a uma fonte de calor externa próxima a um 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).

Etapas 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 (ou seja o 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 auto-sustentável 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 25 kW e 30cm, respectivamente, a transferência de calor é por radiação, ou seja há o retorno da energia liberada para o combustível. A duração das etapas 1 e 2 dependem do combustível e do calor incidente nos objetos (FAYH, 1985; FITZGERALD e MEACHAN, 2017).

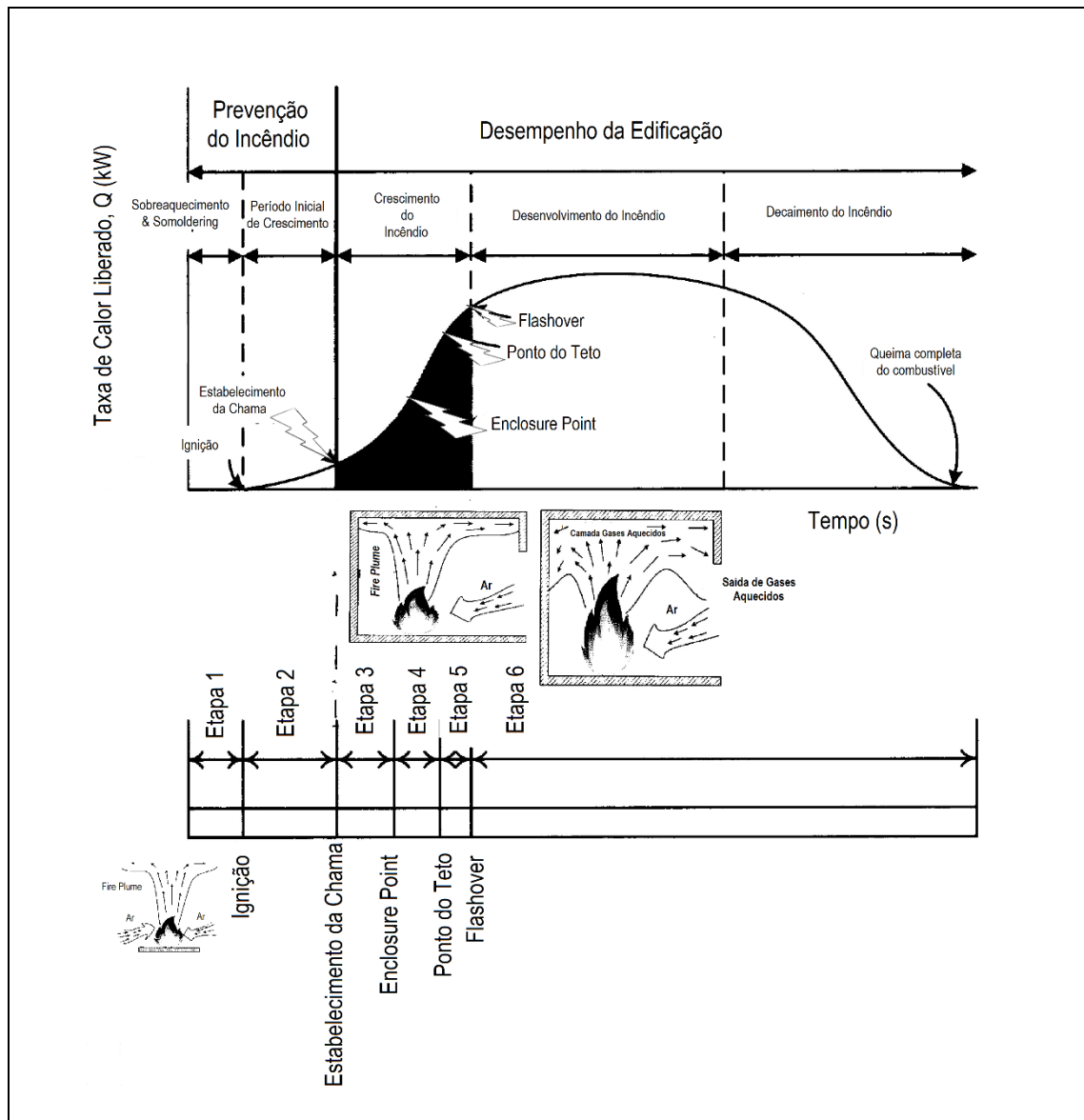
Etapa 3: O *enclosure point* caracteriza-se pela influência das características da sala de origem no desenvolvimento do incêndio. Para ambientes pequenos e moderados a altura do *enclosure point* é aproximadamente 1,5m, e a energia liberada pelo incêndio é estimada entre 300 kW e 400 kW. Nesta etapa a camada de gases quente no teto irradia uma quantidade substancial de calor de volta a superfície do combustível (FITZGERALD, 2004).

Etapa 4: O incêndio continua crescendo além do *enclosure point*. Há uma queima interativa entre os vários objetos. A chama atinge o teto, vide Figura 5. 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.

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 volatilização dos objetos presente no ambiente, podendo ocorrer a ignição espontânea de alguns objetos, e um incêndio adicional poderá ser iniciado no ambiente, como mostra na Figura 5.

Etapa 6: Para ambientes de aproximadamente 100m³, 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 o 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 quando as chamas envolver todos os itens no compartimento. Inicialmente o controle do incêndio é pelo combustível, após o *flashover* pela ventilação, o *flashover* caracteriza esta transição (DRYSDALE, 2011; QUINTIERE, 2006).

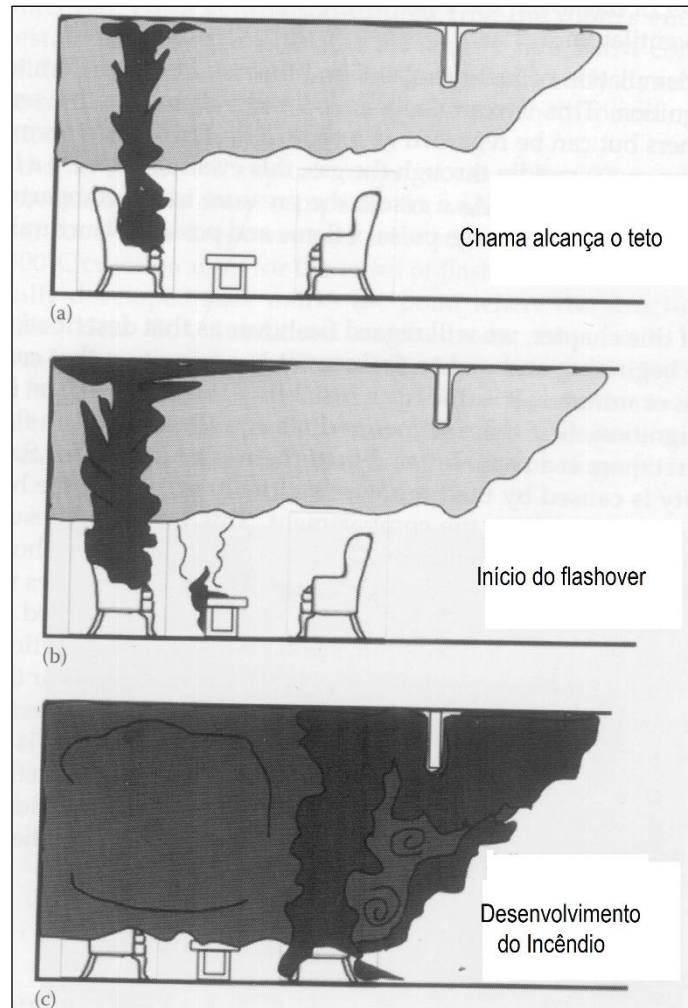
Figura 4 – Desenho esquemático das etapas do incêndio.



FONTE: FITZGERALD; MEACHAN (2017).

No período inicial de crescimento do incêndio em que ainda não ocorreu o estabelecimento da chama, visto na Figura 4, a probabilidade de extinguir o incêndio é maior, se 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.

Figura 5 – Etapas típicas do incêndio na sala de origem.



FONTE: QUINTIERE (2006).

Considerando que o incêndio teve origem em um compartimento que denominaremos sala de origem, uma coluna de flutuação térmica com gases aquecidos sobe acima de uma fonte de calor (a fonte de ignição) em direção ao teto, vide Figura 5. Ou seja, o fluxo ascendente, também conhecido como pluma do incêndio, é induzido pelo aumento da temperatura e conseqüente redução da densidade. Ao mesmo tempo em que os gases quentes ascendem, gases frios entram na pluma. A pluma do incêndio, para a Engenharia de Incêndio, é uma chama difusa turbulenta com um número de Froude menor do que 1,5 (DRYSDALE, 2011; QUINTIERE, 2006; SPFE, 2015)

A pluma, ao colidir com o teto, forma uma fina camada de gases quentes, que cresce em profundidade para formar uma camada de gases no teto. Em um primeiro momento a camada de gases no teto terá uma espessura negligível. A temperatura desta camada de teto

depende da taxa de calor adicionada pelo incêndio e da taxa de ar frio (na temperatura ambiente) que entra na pluma. Se o pé direito da sala de origem (H) for maior do que a altura máxima que a pluma poderá atingir (z_m), ou seja, $H > z_m$, a camada aquecida irá se formar abaixo do teto, sendo provável que o incêndio não irá se propagar para outros compartimentos. Ao contrário, se ($H < z_m$) a pluma colide com o teto e a camada de gases no teto poderá se propagar para compartimentos além da sala de origem. À medida que a espessura da camada de teto cresce devido à adição de produtos de combustão na pluma, a pluma penetra na camada de teto (ou seja, os gases da pluma são adicionados na camada de teto). A temperatura dos gases que alcançam o teto será maior do que os gases da camada de teto. Soma-se a isto a transferência de calor inicialmente por convecção e posteriormente por radiação para as paredes da sala de origem, o que contribui para reduzir a temperatura da camada de teto. Em um determinado momento haverá um fluxo de gás para fora da sala de origem, através de suas aberturas, sendo observada uma camada de teto nos compartimentos adjacentes a sala de origem (ZUKOSKI, 1985).

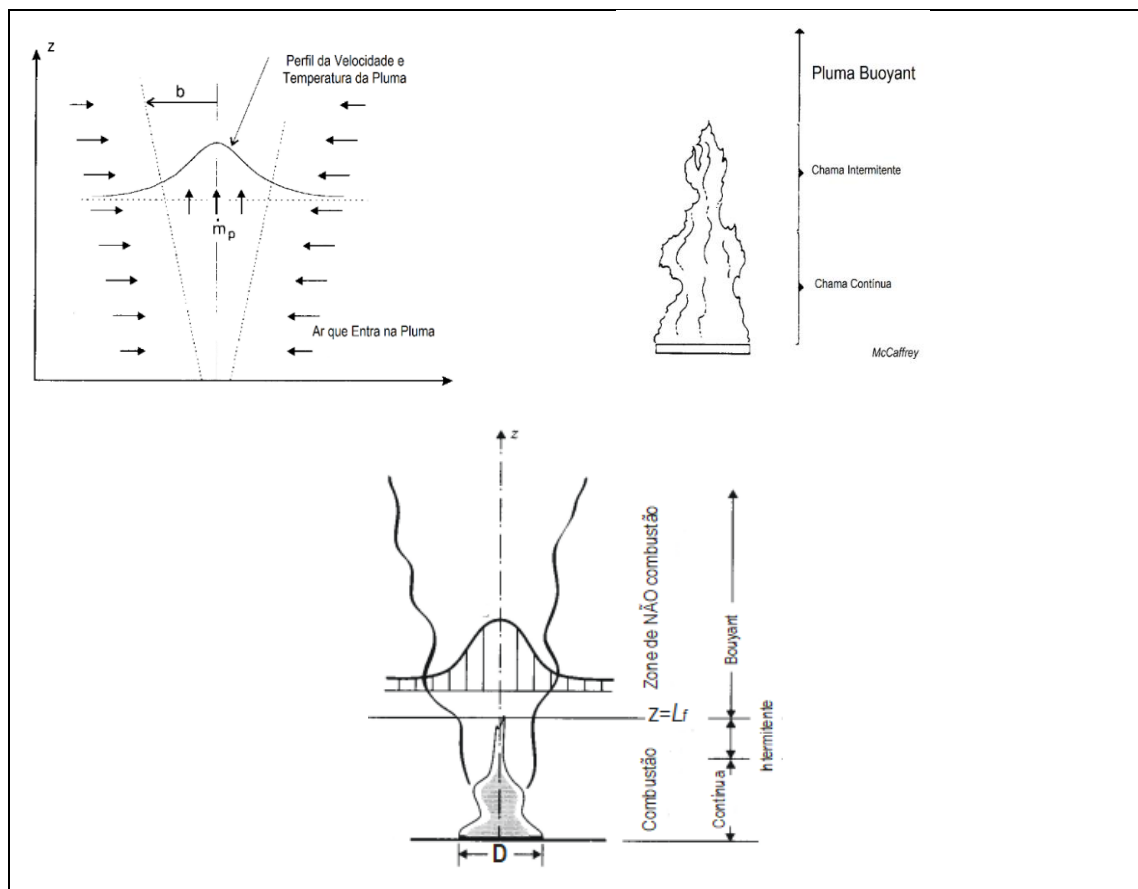
2.2 PLUMA DE INCÊNDIO

A pluma do incêndio é uma coluna turbulenta de gases aquecidos que ascende devido às forças de flutuabilidade. O efeito da turbulência causará a mistura dos gases quentes da pluma com o ar frio próximo da pluma. O mecanismo de mistura turbulento é conhecido como arrastamento, o qual resultará na diminuição da velocidade e aumento da largura da pluma, bem como redução da temperatura. Na região visível da chama há combustão, porém na região não visível da pluma não há combustão. A pluma do incêndio na sala de origem é uma pluma axissimétrica (ou seja, que apresenta simetria em relação ao eixo) causada por uma chama difusa turbulenta. Um eixo de simetria é assumido existir em uma linha vertical no centro da chama, o ar entra horizontalmente em todas as direções, vide Figura 6. A temperatura da pluma varia com a largura da pluma, sendo máxima na linha central e diminui na direção das bordas (a semelhança da distribuição gaussiana). A pluma axissimétrica é convencionalmente dividida em três regiões: 1) uma região de chama persistente próxima ao corpo aquecido, 2) uma região intermitente e 3) *buoyant plume*.

- 1) A região contínua da chama é caracterizada por uma temperatura constante (aproximadamente 900°C). Na superfície do queimador a velocidade é zero e aumenta com a altura ($velocidade \propto z^{1/2}$). Doravante referida como chama.

- 2) Na região intermitente a velocidade da chama é quase constante e a temperatura diminui com a altura ($temperatura \propto z$). Na ponta da chama visível a temperatura é 300°C.
- 3) Na região da pluma a chama não é visível. Sendo a $velocidade \propto z^{-1/3}$ e a $temperatura \propto z^{-5/3}$. Doravante referida como pluma.

Figura 6 – Perfil da pluma axissimétrica.



FONTE: KARLSSON; QUINTIERE (2000). MCCAFFREY (1979). QUINTIERE (2006).

Em outras palavras, a geometria da pluma de incêndio mais estudada é a axissimétrica (Figura 6). A análise teórica da pluma de incêndio assume a distribuição gaussiana da velocidade e temperatura para a região de não combustão da chama (ou seja, a região em que a pluma não é visível). É também assumido que o ar ambiente arrastado para dentro da pluma é uma mistura turbulenta baseado na velocidade axial da pluma ou que o momento é devido à diferença de densidade. É assumido que a velocidade de arrasto é proporcional a velocidade da pluma e que a constante de proporcionalidade é constante. O ar arrastado para dentro da pluma contribui para o processo de queima dos gases combustíveis

provenientes da pirólise, mas também dilui e esfria os produtos do incêndio (ou seja, produtos do processo de combustão) à medida que ascendem acima da região da chama, causa o aumento progressivo do volume de fumaça produzida pelo incêndio. Há uma íntima relação entre a altura da pluma e o arrasto de ar para dentro da pluma (DELICHATSIOS, 1987; DRYSDALE, 2011).

Freqüentemente as soluções assumem que a energia da pluma está concentrada em um ponto para a região não visível da chama. Para as regiões em que há reações químicas (ou seja, a região contínua e intermitente da chama), o ponto de origem da chama é substituído pela origem virtual da chama para ajustar os resultados experimentais obtidos. A consideração da energia da pluma concentrada em um ponto apresentou-se satisfatória para correlacionar velocidade, temperatura e fluxo de massa acima da ponta da chama (região não visível da pluma) (BEYLER, 1986).

A pluma de incêndio tem sido estudada experimentalmente e teoricamente por vários pesquisadores, um dos pioneiros foi Morton, Taylor e Turner (1956) que estabeleceu soluções aproximadas para uma pluma ideal com energia concentrada em um ponto em uma atmosfera estratificada e estável. Recentemente incluímos os estudos do Instituto de Tecnologia da Califórnia desenvolvidos por Zukoski e Kubota (1982), pelo Instituto Nacional de Padrões e Tecnologia (NIST) realizados por McCaffrey (1983) e a FM Global em especial pelas pesquisas realizadas por Heskestad (1983-1984). Não é nossa intenção abordar todos os detalhes da pluma, porém estruturaremos os pilares para o seu entendimento teórico, por ser imprescindível ao entendimento das estratégias para proteger as pessoas, projeto de sistemas de fumaça, detectores e sprinklers.

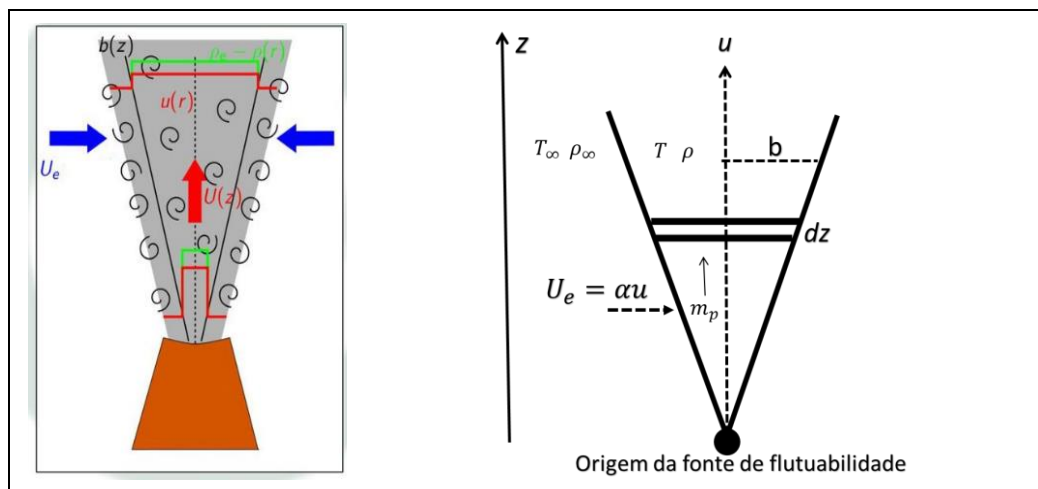
2.2.1 A Pluma Ideal

O nosso entendimento sobre a pluma axissimétrica está baseado no estudo pioneiro de Taylor em 1940, descrito em artigo publicado pela Academia de Ciência do Reino Unido. As primeiras teorias da pluma assumiram (MORTON, TAYLOR e TURNER, 1956):

1. O perfil da velocidade, da velocidade média vertical e das forças de buoyant são similares nas seções horizontais em diferentes alturas. Ou seja, o perfil da velocidade vertical e das forças de flutuabilidade são similares em todas as alturas (e a mesma para qualquer que seja z (altura da chama)). Está hipótese é referida atualmente como *Top Hat*, sendo substituída por uma distribuição gaussiana, vide Figura 7.

2. A variação de densidade local é pequena quando comparada com a diferença entre a densidade média da pluma e do ambiente em torno da pluma. Esta aproximação é referida na literatura como uma aproximação Boussinesq. Em outras palavras, o fluido é incompressível, e o volume não muda quando misturado, e que a variação da densidade através do movimento é pequena quando comparada com uma densidade de referência. A densidade de referência é a densidade do fluido ambiente no nível da fonte de calor.
3. A energia da pluma está concentrada em um ponto (*point source*), em uma atmosfera estratificada estável e uniforme. Heskestad sugere uma expressão para estimar a altura da origem virtual para a pluma (z_o).
4. A taxa de arrastamento na borda do fluido em qualquer altura é proporcional a velocidade característica naquela altura. Ou melhor, a taxa, na qual o fluido é arrastado para a pluma é proporcional à velocidade vertical (naquele nível) naquela altura.

Figura 7 – Pluma ideal.



FONTE: DRYSDALE (2011).

A pluma do incêndio foi matematicamente descrita por Zukoski, Heskestad, McCaffrey e Thomas.

2.2.2 Pluma de Zukoski

Zukoski realizou experimentos onde a pluma de gás foi coletada por uma capela, vide Figura 8. O fluxo foi controlado no exaustor da capela, e a camada de gases aquecidos

foi mantida constante. O fluxo no exaustor da capela foi igual ao fluxo de massa na interface da camada. Foi possível realizar experimentos em que a altura e energia da pluma foram função do fluxo de massa. Zukoski utilizou os resultados experimentais para ajustar teoria da pluma ideal aos resultados obtidos.

A Equação 3 expressa o fluxo de massa da pluma ideal. A Equação 4 foi proposta por Zukoski.

$$\dot{m}_p = 0,20 \cdot \left(\frac{\rho_\infty^2 \cdot g}{c_p \cdot T_\infty} \right)^{1/3} \cdot Q^{1/3} \cdot z^{5/3} \quad (3)$$

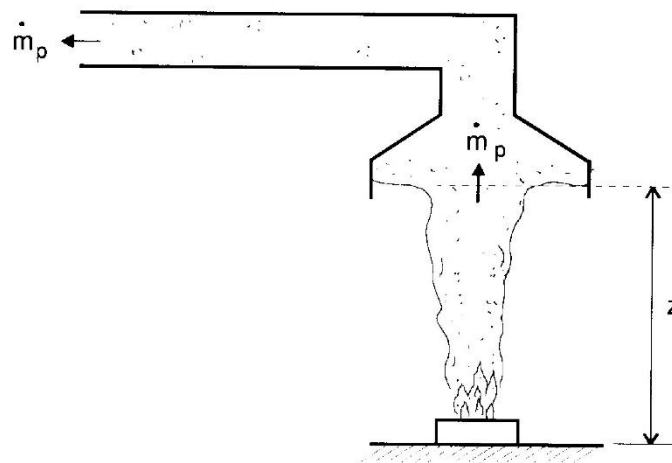
$$\dot{m}_p = 0,21 \cdot \left(\frac{\rho_\infty^2 \cdot g}{c_p \cdot T_\infty} \right)^{1/3} \cdot Q^{1/3} \cdot z^{5/3} \quad (4)$$

Se na Equação 4 assumirmos que:

$T_\infty = 293K$, $\rho_\infty = 1,1 \cdot kg/m^3$, $c_p = 1,0 \cdot kJ/kg \cdot K$ e $g = 9,81 \cdot m/s^2$, então a Equação 2 toma a forma da Equação 5 abaixo:

$$\dot{m}_p = 0,071 \cdot Q^{1/3} \cdot z^{5/3} \quad (5)$$

Figura 8 – Desenho esquemático do aparato experimental utilizado por Zukoski.



FONTE: DRYSDALE (2011).

As Equações 6 e 7 estimam a velocidade e a temperatura da pluma ideal. As Equações 6 e 7 também são associadas ao modelo de pluma de Zukoski, visto que não há uma diferença significativa entre as Equações 3 e 4.

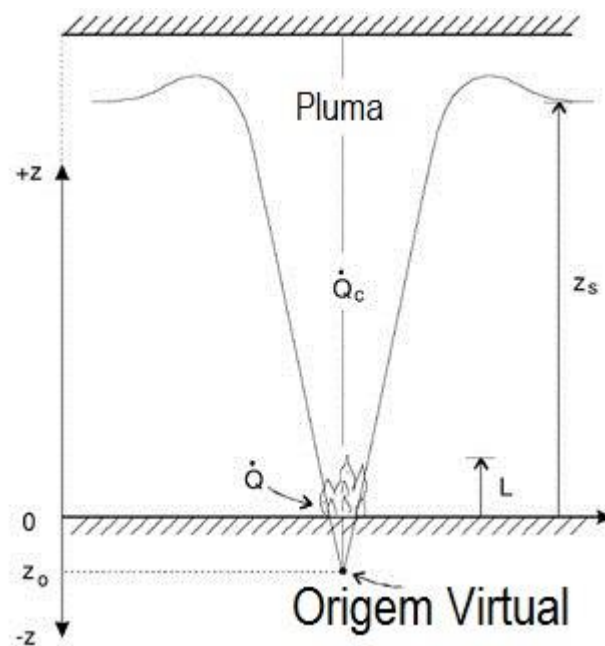
$$u = 1,94 \cdot \left(\frac{g}{c_p \cdot T_\infty \cdot \rho_\infty} \right)^{1/3} \cdot Q^{1/3} \cdot z^{-1/3} \quad (6)$$

$$\Delta T = 5,0 \cdot \left(\frac{T_\infty}{g \cdot c_p^2 \cdot \rho_\infty^2} \right)^{1/3} \cdot Q^{2/3} \cdot z^{-5/3} \quad (7)$$

2.2.3 Pluma de Heskestad

No modelo de pluma proposto por Heskestad, o ponto em que toda a energia da pluma ideal é concentrada é substituído por uma origem virtual, vide Figura 9. A origem virtual da pluma depende do diâmetro da fonte de combustível e da energia total liberada, sendo estimada através da Equação 8. No modelo proposto a pluma é considerada forte, pois ao contrário da pluma de Zukoski, a diferença de densidade na pluma é significativa. Além disto, as propriedades da pluma dependem das perdas de energia por convecção através da pluma, Q_c . As perdas por convecção são $Q_c = 0,6 \cdot Q$ ou $Q_c = 0,8 \cdot Q$. E os perfis de velocidade e temperatura serão mais próximos da realidade, pois serão dependentes da altura da pluma (z). A altura da pluma é estimada através da Equação 9 (HESKESTAD, 1983).

Figura 9 – Desenho esquemático da pluma de Heskestad.



FONTE: DRYSDALE (2011).

$$z_0 = 0,083 \cdot Q^{2/5} - 1,02 \cdot D \quad (8)$$

A Equação 8 estima a localização da origem da pluma virtual, e foi obtida experimentalmente por Heskestad para incêndios de poça. Observe que se z_0 for negativo, a origem virtual está abaixo da fonte de combustível, indicando que a área do combustível é maior do que a energia liberada. Ao passa que se z_0 é positivo há a liberação de uma energia significativa em uma área pequena.

$$L = 0,235 \cdot Q^{2/5} - 1,02 \cdot D \quad (9)$$

A Equação 10 expressa o raio da pluma. As Equações 11 e 12 a temperatura na linha central da pluma. E as Equações 13 e 14 a velocidade no centro da pluma. As Equações 12 e 14 foram obtidas assumindo que (HESKESTAD, 1984):

$T_\infty = 293K, \rho_\infty = 1,2 \text{ kg/m}^3, c_p = 1 \text{ kJ/kgK}$ e $g = 9,81 \text{ m/s}^2$. Observe que foi assumido que $Q_c = 0,6 \cdot Q$ ou $Q_c = 0,8 \cdot Q$.

$$b = 0,12 \cdot \left(\frac{T_0}{T_\infty} \right)^{1/2} \cdot (z - z_0) \quad (10)$$

$$\Delta T_0 = 9,1 \cdot \left(\frac{T_\infty}{g \cdot c_p^2 \cdot \rho_\infty^2} \right)^{1/3} \cdot Q_c^{2/3} \cdot (z - z_0)^{-5/3} \quad (11)$$

$$\Delta T_0 = 25 \cdot \left(\frac{Q_c^{2/5}}{(z - z_0)} \right)^{5/3} \quad (12)$$

$$u_0 = 3,4 \cdot \left(\frac{g}{c_p \cdot T_\infty \cdot \rho_\infty} \right)^{1/3} \cdot Q_c^{1/3} \cdot (z - z_0)^{-1/3} \quad (13)$$

$$u_0 = 1,0 \cdot \left(\frac{Q_c}{(z - z_0)} \right)^{1/3} \quad (14)$$

Heskestad sugere duas equações para estimar o fluxo de massa na pluma, Equações 15 e 16 se

$z > L$ e $z < L$, respectivamente. Para $z \geq L$, na qual o fluxo de massa é acima da altura da chama, tem-se a Equação 15:

$$m_p = 0,071 \cdot Q_c^{1/3} \cdot (z - z_0)^{5/3} + 1,92 \cdot 10^{-3} \cdot Q_c \quad (15)$$

E para $z < L$ tem-se a Equação 16:

$$m_p = 0,0056 \cdot Q_c \cdot \frac{z}{L} \quad (16)$$

2.2.4 Pluma de McCaffrey

Em 1979 McCaffrey mostra que a pluma do incêndio acima de um queimador com 30cm^2 consiste de três regiões: chama contínua, chama intermitente e *buoyant plume*, vide Figura 6. O modelo de pluma proposto por McCaffrey não incluiu experimento em que a altura média da chama, L , foi significativamente menor do que o diâmetro da chama, D .

E a partir de resultados experimentais e de uma análise dimensional estimou a temperatura e velocidade na linha central da pluma em função da região da chama, Equações 17 e 18 e Tabela 1.

$$\Delta T_0 = \left(\frac{\kappa}{0,9 \cdot \sqrt{2g}} \right)^2 \cdot \left(\frac{z}{Q^{2/5}} \right)^{2\eta-1} \cdot T_\infty \quad (17)$$

$$u_0 = \kappa \cdot \left(\frac{z}{Q^{2/5}} \right)^\eta \cdot Q^{1/5} \quad (18)$$

Tabela 1 – Constantes para as equações da pluma de McCaffrey.

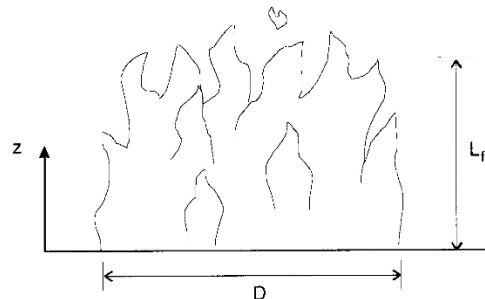
Região	$\frac{z}{Q^{2/5}} m/kW^{2/5}$	η	κ
Chama Contínua	$< 0,08$	$1/2$	$6,8 \text{ m}^{1/2}/s$
Chama Intermitente	$0,08-0,2$	0	$1,9 \text{ m}/kW^{1/5}s$
<i>Buoyant Plume</i>	$\geq 0,2$	$-1/3$	$1,1 \text{ m}^{4/4}/kW^{1/3}s$

FONTE: MCCAFFREY (1979).

2.2.5 Pluma de Thomas

Thomas observou que na região continua da chama o fluxo de massa na pluma era mais ou menos independente da taxa de energia liberada. Ele observou que o fluxo de massa era uma função do perímetro do incêndio, P , e da altura acima da fonte de combustível. Nos experimentos realizados a altura média da chama foi consideravelmente menor do que o diâmetro. A equação proposta por Thomas para estimar o fluxo de massa é expressa na Equação 19, a qual é apropriada para grandes incêndios, ou seja, $D > L$. Observe que a pluma de Thomas é cônica e não cilíndrica vide Figura 10.

Figura 10 – Desenho esquemático da pluma de Thomas.



FONTE: DRYSDALE (2011).

$$m_p = 0,188.P.z^{3/2} \quad (19)$$

Os modelos da pluma do incêndio são incorporados no projeto de sistemas de controle de fumaça. Alguns destes documentos são orientações úteis para o dimensionamento dos sistemas, e utilizadas em alguns países. Os países possuem velocidades distintas no entendimento, avaliação e prevenção dos incêndios, em função da sua história e tradições, logo métodos utilizados em um país podem ser questionados em outros, como resultado não há uma única recomendação. Os modelos de pluma mais recomendados são os propostos por Thomas (1963) e Heskestad (1983), como mostrado na Tabela 2 (CANTIZANO, GUTIÉRREZ, REI, VIGNE e WEGRZYNSKI, 2019).

Tabela 2 – Modelos da pluma de incêndio recomendados para diferentes locais.

Recomendação	Abrangência	Origem	Modelo da Pluma de Incêndio Utilizado
NFPA 92 <i>Standard for smoke control systems.</i>	Nacional	USA	Heskestad
EN 12101-5 <i>CEN, CEN/TR 12101-5:2005 (2005) Smoke and heat control system. Guidelines on functional recommendations and calculation methods for smoke and heat exhaust ventilation systems.</i>	Internacional	EU União Europeia	Thomas Heskestad
TM 19 <i>CIBSE, TM19 (1995). Relationships for smoke control calculations (Technical Memoranda). Chartered institution of building Services Engineers.</i>	Recomendações de Projeto	UK	Heskestad O modelo da pluma proposto por Thomas é uma alternativa.
NBS S21-208-1 <i>NBN (1995) Bradbeveiliging van gebouwen-Ontwerpenberekening van rook-enwarmteafvoerinstallaties(RWA) -Deel 1: groteonverdeelderuimten met eenbouwlaag. In: NBN S 21-208-1.</i>	Nacional	Bélgica	Thomas
BRE 368 <i>Morgan HP, Ghosh BK, Garrad G, Pamitschka R, De Smedt J-C, Schoorbaert LR (1999). Design methodology for smoke and heat exhaust ventilation. BRE, Wal-ford.</i>	Recomendações de Projeto	Europa	Thomas Zukoski
BS 5588-7 <i>BS 5588-7: 1997Fire precautions in design, construction and use of building-Part 7: Code of practice for the incorporation of atria in buildings.</i>	Recomendações de Projeto	UK	Thomas Heskestad
BS 9999:2017 <i>BS 9999:2017 (2017) Fire safety in the design, management and use of building. Code of practice.</i>	Nacional	UK	Thomas Heskestad
AS1668.3-2001 <i>Standards Australia (2001) The use of ventilation and airconditioning in buildings smoke control systems for large single compartments or smoke reservoirs. In: AS 1668.3-2001.</i>	Nacional	Austrália	Thomas
Principles of Smoke Management <i>Klote JH, Milke JA (2002) Principle of smoke management. American Society of Heating, Refrigerating and Air-conditioning Engineers Inc., Atlanta.</i>	Recomendações de Projeto	USA	Heskestad
Handbook of Smoke Control Engineering <i>Klote JH, Milke JA, Turnbull PG, Kashef A, Ferreira MJ (2012) Handbook of smoke control engineering. ASHRAE, Atlanta.</i>	Recomendações de Projeto	USA	Heskestad

FONTE: CANTIZANO; GUTIÉRREZ; REI; VIGNE; WEGRZYNSKI (2019).

3 METODOLOGIA

Quando um engenheiro estrutural projeta uma viga, a carga a que ela estará submetida deve ser prevista de forma similar um engenheiro de segurança contra incêndios deve projetar o incêndio. O engenheiro de incêndio deve decidir a quantidade de material que irá queimar e o tempo associado. Não há uma metodologia ou procedimento que possa ajudar o engenheiro a estruturar o projeto do incêndio. O engenheiro deve usar todas as informações disponíveis sobre tipo de construção e ocupação, o que há dentro do edifício, juntamente com o seu conhecimento *a priori* para formular o projeto do incêndio.

1. **Entendimento do problema:** Entender as variáveis que influenciam na dinâmica dos incêndios em espaço confinados, definido como ambiente com um volume menor do que 100m^3 , tais como a pirólise, mecanismo de ignição e pluma do incêndio, o qual foi detalhado na seção de fundamentação teórica.
2. **Caracterização e cálculo:** Caracterização do procedimento utilizado, como fornecer as variáveis utilizadas da pluma do incêndio e explicar o método utilizado para calcular, encontrado na seção de metodologia. Após caracterização, calcular e ilustrar em tabelas e gráficos os resultados obtidos, encontrado na seção de resultados.
3. **Avaliação do impacto do uso da origem virtual:** Avaliar quantitativamente o impacto do uso da origem virtual no cálculo do fluxo de massa e na temperatura e velocidade de linha de centro em uma pluma de incêndio, encontrado na seção de resultados.

Para fim de avaliar o impacto do uso da origem virtual no fluxo de massa e na temperatura e velocidade da linha central em uma pluma de incêndio, utilizaremos dados da densidade de calor liberado, altura e calor liberado pelo incêndio mais realísticos possíveis, através de dados tabelados e situações próximas as reais. Valores para a densidade de calor liberado para alguns casos se encontram descritos na Tabela 3. A densidade de calor liberado pelo incêndio é dada pela Equação 20, na qual essa equação é útil para determinar a área (A) do incêndio (Equação 21) e consequentemente o diâmetro (Equação 22) do incêndio, sendo este último importante para calcular a origem virtual da pluma de incêndio através da equação proposta por Heskestad (Equação 8).

$$q = Q/A \quad (20)$$

$$A = \pi D^2/4 \quad (21)$$

$$D = 2\sqrt{\frac{Q}{\pi q}} \quad (22)$$

Tabela 3 – Densidade de calor liberado por alguns materiais.

Materiais	Densidade do Calor Liberado (q) em kW/m^2
Dielétrico utilizado em transformadores: silicone, em uma poça de 1,74m de diâmetro.	90
Dielétrico utilizado em transformadores: silicone, em uma poça de 2,44m de diâmetro.	90
Malotes do correio cheios estocados a uma altura de 1,52m.	400
Dielétrico utilizado em transformadores: hidrocarboneto, em uma poça de 1,74m de diâmetro.	900
Palete (<i>pallets</i>) de madeira empilhados a 0,46m de altura (umidade 6%-12%).	1.400
Garrafas de polietileno (PE) em caixa, empilhadas a 4,57m de altura.	2.000
Partes de brinquedo de poliestireno em caixas, empilhadas a 4,57m de altura.	2.000
Poça de metanol com 0,16m de diâmetro	2.000
Poça de heptano com 1,22m de diâmetro.	3.000
Poça de heptano com 1,74m de diâmetro.	3.200
Garrafas de PCV (polyvinyl choloride) embaladas em caixas, empilhadas compartimentadas com 4,57m de altura.	3.400
Palete de madeira empilhados a 4,88m de altura (umidade 6%-12%).	10.000

FONTE: KLOTE; MILKE (2002).

Para calcular o impacto quantitativo do uso da origem virtual (proposto por Heskestad) no fluxo de massa, serão selecionados os valores da densidade de liberação de calor (ver Tabela 3) de $q = 400 \text{ kW/m}^2$, $q = 680 \text{ kW/m}^2$, $q = 1.400 \text{ kW/m}^2$, $q = 3.400 \text{ kW/m}^2$ e $q = 10.000 \text{ kW/m}^2$, e para cada valor da densidade de liberação de calor a origem virtual da chama foi estimada através da Equação 8 (equação da origem virtual proposta por Heskestad), para valores de $Q = 2.000 \text{ kW}$, $Q = 5.000 \text{ kW}$, $Q = 10.000 \text{ kW}$, $Q = 15.000 \text{ kW}$, $Q = 20.000 \text{ kW}$ e $Q = 25.000 \text{ kW}$. A altura acima da fonte do incêndio foi mantida constante e considerada de 20 metros, para fim de cálculo. O fluxo de massa depende do calor convectivo liberado pelo incêndio (Q_c), e foi assumido $Q_c = \chi \cdot Q$, sendo χ a fração de calor convectivo, a qual varia de 0,15 - 0,90. O SFPE Handbook recomenda 0,75, porém para fins de projeto é recomendado 0,70, que foi o valor assumido no presente estudo. Com valores da origem virtual, altura e calor convectivo liberado pelo incêndio, foi calculado para cada cenário o fluxo de massa (Equação 15, proposta por Heskestad) com e sem a inserção da origem virtual (z_0).

Já para calcular o impacto quantitativo do uso da origem virtual na temperatura e velocidade da linha central, utilizaremos um valor constante para a densidade de calor liberado de 250 kW/m^2 , na qual foi calculada a origem virtual (Equação 8) com valores do calor liberado pelo incêndio (Q) de 1.000 kW , 1.500 kW , 2.000 kW , 2.500 kW e 3.000 kW para alturas de 10, 20, 30, 40, 50 e 60 metros, para fim de cálculo. A fração de calor convectivo utilizado para esse caso também foi de 0,7 ($Q_c = \chi \cdot Q$). Com valores da origem virtual, altura e calor convectivo liberado pelo incêndio, foi calculado para cada cenário a temperatura (Equação 12, proposta por Heskestad) e velocidade (Equação 14, proposta por Heskestad) da linha de centro, com e sem a inserção da origem virtual (z_0).

4 RESULTADOS: CARACTERIZAÇÃO DA PLUMA DO INCÊNDIO

Nesta seção presente veremos os resultados dos cálculos realizados que foram vistos e explicados na seção de metodologia anteriormente. Primeiramente, serão ilustrados os resultados da influência do uso da origem virtual (Equação 8) proposto por Heskestad no fluxo de massa (Equação 15), com os dados relatados na seção anterior. As Tabelas 4 a 8 a seguir mostram esses resultados.

Tabela 4 – Influência da origem virtual da chama no fluxo de massa para $q = 400 \text{ kW/m}^2$.

<i>Para $q = 400 \text{ kW/m}^2$</i>							
Q (kW)	D (m)	z_v (m)	L (m)	$z > L$ (m)	Q_c (kW)	m (kg/s) Considerada origem virtual	m (kg/s) Não considerada origem virtual
2000	2,5	-0,8	2,4	20	1400	127,5	119,6
5000	4,0	-1,6	3,0	20	3500	187,1	165,2
10000	5,6	-2,5	3,6	20	7000	256,5	212,7
15000	6,9	-3,2	4,0	20	10500	312,8	248,0
20000	8,0	-3,8	4,2	20	14000	362,8	277,4
25000	8,9	-4,3	4,4	20	17500	408,1	303,1

Tabela 5 – Influência da origem virtual da chama no fluxo de massa para $q = 680 \text{ kW/m}^2$.

<i>Para $q = 680 \text{ kW/m}^2$</i>							
Q (kW)	D (m)	z_v (m)	L (m)	$z > L$ (m)	Q_c (kW)	m (kg/s) Considerada origem virtual	m (kg/s) Não considerada origem virtual
2000	1,9	-0,2	3,0	20	1400	121,6	119,6
5000	3,1	-0,6	3,9	20	3500	173,3	165,2
10000	4,3	-1,1	5,0	20	7000	231,7	212,7
15000	5,3	-1,5	5,6	20	10500	277,8	248,0
20000	6,1	-1,9	6,1	20	14000	319,2	277,4
25000	6,8	-2,2	6,6	20	17500	355,5	303,1

Tabela 6 – Influência da origem virtual da chama no fluxo de massa para $q = 1.400 \text{ kW/m}^2$.

<i>Para $q = 1.400 \text{ kW/m}^2$</i>							
Q (kW)	D (m)	z_v (m)	L (m)	$z > L$ (m)	Q_c (kW)	m (kg/s) Considerada origem virtual	m (kg/s) Não considerada origem virtual
2000	1,3	0,4	3,6	20	1400	115,8	119,6
5000	2,1	0,3	4,9	20	3500	161,4	165,2
10000	3,0	0,2	6,3	20	7000	209,7	212,7
15000	3,7	0,1	7,2	20	10500	246,6	248,0
20000	4,3	0,0	8,0	20	14000	278,0	277,4
25000	4,8	-0,1	8,6	20	17500	306,2	303,1

Tabela 7– Influência da origem virtual da chama no fluxo de massa para $q = 3.400 \text{ kW/m}^2$.

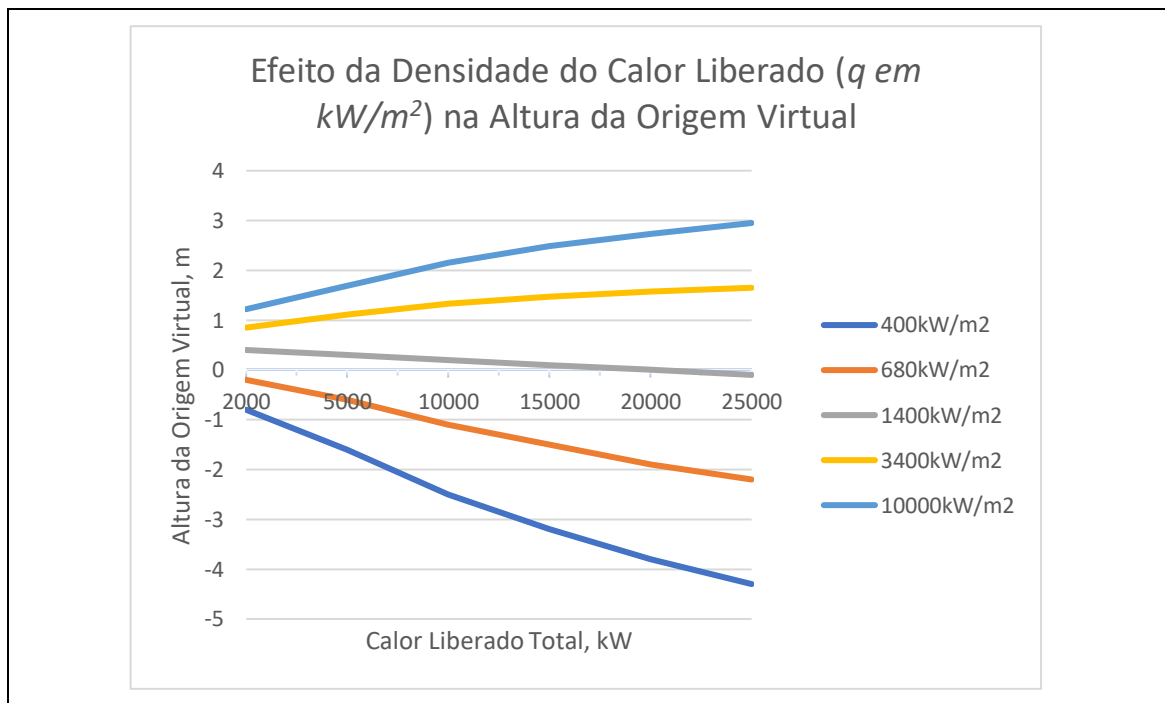
<i>Para $q = 3.400 \text{ kW/m}^2$</i>							
Q (kW)	D (m)	z_v (m)	L (m)	$z > L$ (m)	Q_c(kW)	m (kg/s) Considerada origem virtual	m (kg/s) Não considerada origem virtual
2000	0,9	0,85	4,0	20	1400	111,5	119,6
5000	1,4	1,11	5,7	20	3500	150,9	165,2
10000	1,9	1,33	7,4	20	7000	191,4	212,7
15000	2,4	1,47	8,6	20	10500	221,1	248,0
20000	2,7	1,57	9,6	20	14000	245,9	277,4
25000	3,1	1,65	10,3	20	17500	267,6	303,1

Tabela 8 – Influência da origem virtual da chama no fluxo de massa para $q = 10.000 \text{ kW/m}^2$.

<i>Para $q = 10.000 \text{ kW/m}^2$</i>							
Q (kW)	D (m)	z_v (m)	L (m)	$z > L$ (m)	Q_c (kW)	m (kg/s) <i>Considerada origem virtual</i>	m (kg/s) <i>Não considerada origem virtual</i>
2000	0,5	1,22	4,4	20	1400	108,0	119,6
5000	0,8	1,69	6,3	20	3500	143,6	165,2
10000	1,1	2,15	8,2	20	7000	178,5	212,7
15000	1,4	2,48	9,6	20	10500	203,1	248,0
20000	1,6	2,73	10,7	20	14000	223,3	277,4
25000	1,8	2,95	11,7	20	17500	240,5	303,1

Se a origem virtual da chama não é considerada, podemos avaliar da Tabela 4 a 8 que o fluxo de massa é independente da densidade do calor liberado, sendo função do calor total (Q). Podemos avaliar também que a origem virtual (Equação 8) se encontra abaixo (valor negativo) da base do fogo para densidades de liberação de calor de $q = 400 \text{ kW/m}^2$ e $q = 680 \text{ kW/m}^2$, e acima (valor positivo) para densidades de $q = 1.400 \text{ kW/m}^2$, $q = 3.400 \text{ kW/m}^2$ e $q = 10.000 \text{ kW/m}^2$. O comportamento da origem virtual pode ser visto na Figura 11 abaixo.

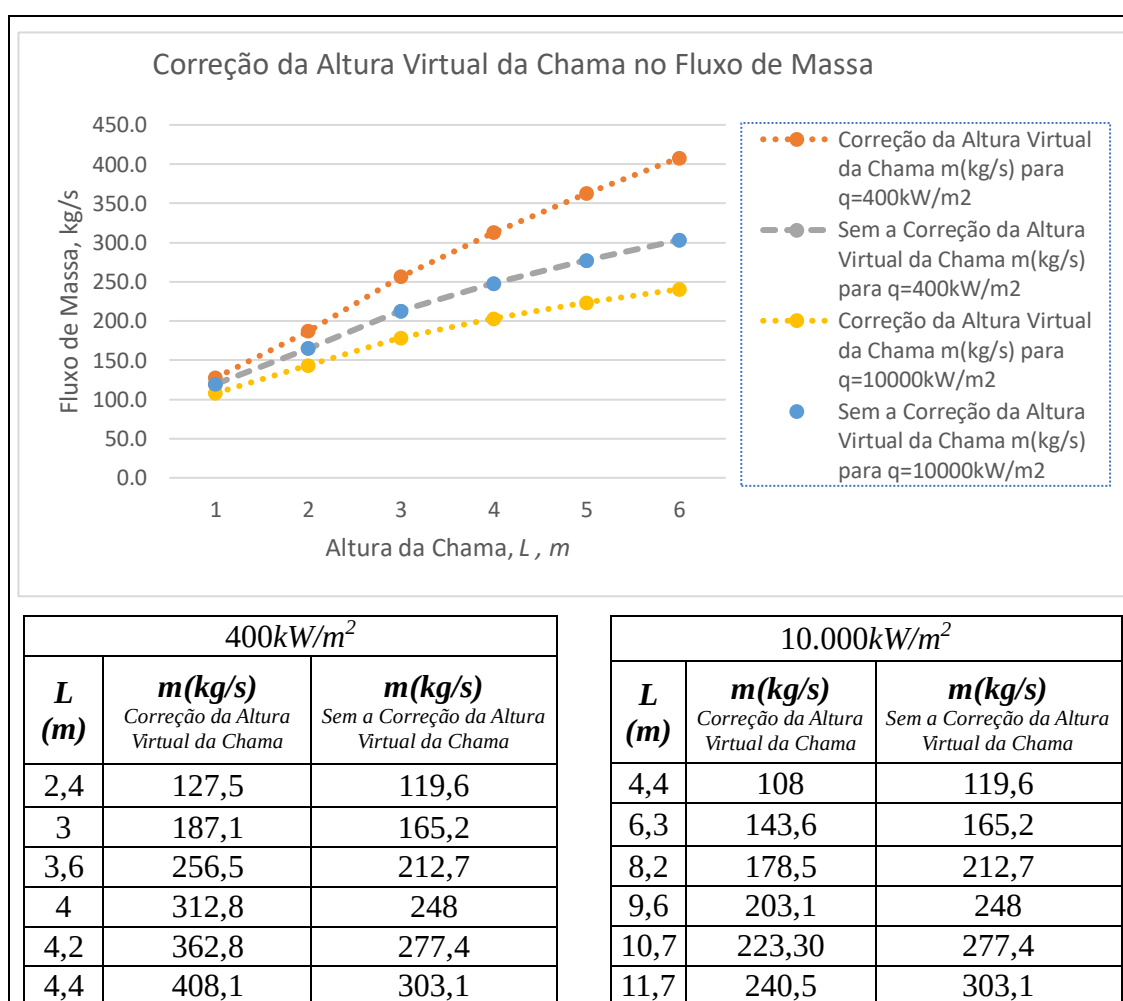
Figura 11 – Efeito da densidade de calor na origem virtual da chama.



Podemos concluir que para uma densidade de liberação de calor de 400 kW/m^2 a equação com a correção da origem virtual subestimou o fluxo de massa, na qual o fluxo de massa com o uso da origem virtual foi maior do que o fluxo de massa sem o uso da origem virtual. Porém, para densidades de energia mais elevadas o fluxo de massa com a correção da origem virtual tendeu a diminuir, na qual para uma densidade de liberação de calor de 10.000 kW/m^2 o fluxo de massa com a correção da origem virtual sobreestimou o fluxo de massa sem o uso da origem virtual. A Figura 12 abaixo

detalha a correção da altura virtual da chama no fluxo de massa para $q = 400 \text{ kW/m}^2$ e $q = 10.000 \text{ kW/m}^2$.

Figura 12 – Efeito da correção da altura virtual da chama no fluxo de massa.



Agora serão postos os resultados da influência do uso da origem virtual (Equação 8) proposto por Heskestad na temperatura (Equação 12) e velocidade (Equação 14) de linha de centro, com os dados relatados na seção de metodologia. As Tabelas 9 a 13 a seguir mostram os resultados.

Tabela 9 – Correção da altura virtual da chama para a temperatura e velocidade na linha central da pluma incêndio para $q = 250 \text{ kW/m}^2$ e $Q = 1000 \text{ kW}$.

Q (kW)	$D_f(m)$	$z_v(m)$	$L(m)$	$z > L$ (m)	Q_c (kW)	ΔT_o (K) Considerada a altura virtual	ΔT_o (K) NÃO considerada a altura virtual	$u_o(m/s)$ Considerada a altura virtual	$u_o(m/s)$ NÃO considerada a altura virtual
1000	2,3	-1,0	1,4	10	700	36,2	42,5	4,0	4,1
1000	2,3	-1,0	1,4	20	700	12,3	13,4	3,2	3,3
1000	2,3	-1,0	1,4	30	700	6,4	6,8	2,8	2,9
1000	2,3	-1,0	1,4	40	700	4,0	4,2	2,6	2,6
1000	2,3	-1,0	1,4	50	700	2,8	2,9	2,4	2,4
1000	2,3	-1,0	1,4	60	700	2,1	2,1	2,3	2,3

Tabela 10 – Correção da altura virtual da chama para a temperatura e velocidade na linha central da pluma incêndio para $q = 250 \text{ kW/m}^2$ e $Q = 1500 \text{ kW}$.

Q (kW)	$D_f(m)$	$z_v(m)$	$L(m)$	$z > L$ (m)	Q_c (kW)	ΔT_o (K) Considerada a altura virtual	ΔT_o (K) NÃO considerada a altura virtual	$u_o(m/s)$ Considerada a altura virtual	$u_o(m/s)$ NÃO considerada a altura virtual
1500	2,8	-1,3	1,5	10	1050	45,4	55,6	4,5	4,7
1500	2,8	-1,3	1,5	20	1050	15,8	17,5	3,7	3,7
1500	2,8	-1,3	1,5	30	1050	8,3	8,9	3,2	3,3
1500	2,8	-1,3	1,5	40	1050	5,2	5,5	2,9	3,0
1500	2,8	-1,3	1,5	50	1050	3,6	3,8	2,7	2,8
1500	2,8	-1,3	1,5	60	1050	2,7	2,8	2,6	2,6

Tabela 11 – Correção da altura virtual da chama para a temperatura e velocidade na linha central da pluma incêndio para $q = 250 \text{ kW/m}^2$ e $Q = 2000 \text{ kW}$.

Q (kW)	$D_f(m)$	$z_v(m)$	$L(m)$	$z > L$ (m)	Q_c (kW)	ΔT_o (K) Considerada a altura virtual	ΔT_o (K) NÃO considerada a altura virtual	$u_o(m/s)$ Considerada a altura virtual	$u_o(m/s)$ NÃO considerada a altura virtual
2000	3,2	-1,5	1,7	10	1400	53,4	67,4	5,0	5,2
2000	3,2	-1,5	1,7	20	1400	18,8	21,2	4,0	4,1
2000	3,3	-1,5	1,5	30	1400	10,0	10,8	3,5	3,6
2000	3,2	-1,5	1,7	40	1400	6,3	6,7	3,2	3,3
2000	3,2	-1,5	1,7	50	1400	4,4	4,6	3,0	3,0
2000	3,2	-1,5	1,7	60	1400	3,3	3,4	2,8	2,9

Tabela 12 – Correção da altura virtual da chama para a temperatura e velocidade na linha central da pluma incêndio para $q = 250 \text{ kW/m}^2$ e $Q = 2500 \text{ kW}$.

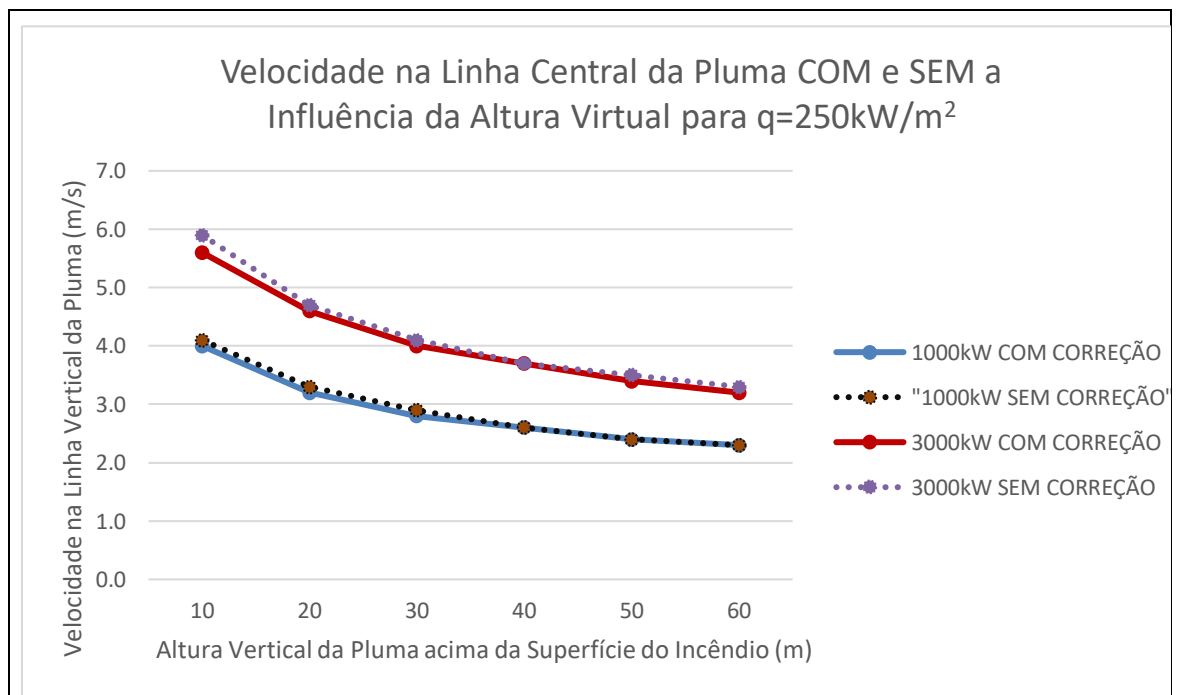
Q (kW)	$D_f(m)$	$z_v(m)$	$L(m)$	$z > L$ (m)	Q_c (kW)	ΔT_o (K) Considerada a altura virtual	ΔT_o (K) NÃO considerada a altura virtual	$u_o(m/s)$ Considerada a altura virtual	$u_o(m/s)$ NÃO considerada a altura virtual
2500	3,6	-1,7	1,7	10	1750	60,2	78,2	5,3	5,6
2500	3,6	-1,7	1,7	20	1750	21,5	24,6	4,3	4,4
2500	3,6	-1,7	1,7	30	1750	11,4	12,5	3,8	3,9
2500	3,6	-1,7	1,7	40	1750	7,2	7,8	3,5	3,5
2500	3,6	-1,7	1,7	50	1750	5,1	5,3	3,2	3,3
2500	3,6	-1,7	1,7	60	1750	3,8	3,9	3,0	3,1

Tabela 13 – Correção da altura virtual da chama para a temperatura e velocidade na linha central da pluma incêndio para $q = 250 \text{ kW/m}^2$ e $Q = 3000 \text{ kW}$.

Q (kW)	D_f (m)	z_v (m)	L (m)	$z > L$ (m)	Q_c (kW)	ΔT_o (K) Considerada a altura virtual	ΔT_o (K) NÃO considerada a altura virtual	u_o (m/s) Considerada a altura virtual	u_o (m/s) NÃO considerada a altura virtual
3000	3,9	-1,9	1,8	10	2100	66,1	88,3	5,6	5,9
3000	3,9	-1,9	1,8	20	2100	23,9	27,8	4,6	4,7
3000	3,9	-1,9	1,8	30	2100	12,8	14,2	4,0	4,1
3000	3,9	-1,9	1,8	40	2100	8,1	8,8	3,7	3,7
3000	3,9	-1,9	1,8	50	2100	5,7	6,0	3,4	3,5
3000	3,9	-1,9	1,8	60	2100	4,2	4,5	3,2	3,3

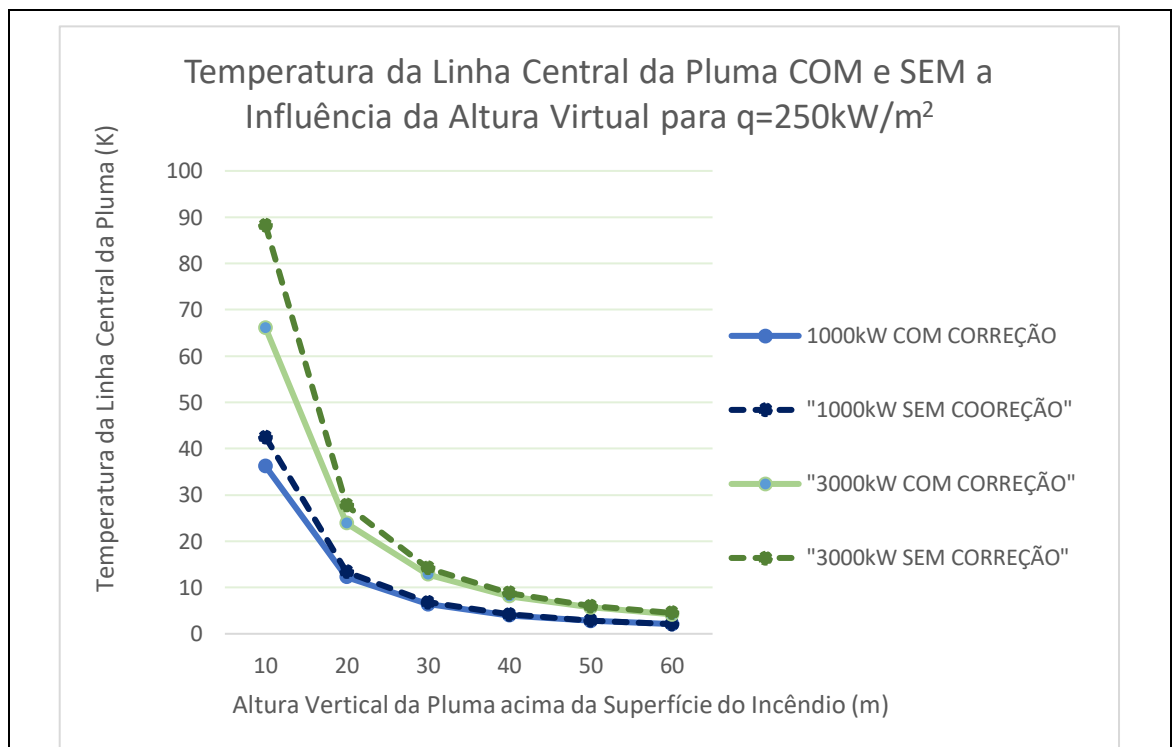
Podemos avaliar desses resultados de que a influência da altura virtual na velocidade de linha de centro pode ser considerada desprezível, mostrado no gráfico da Figura 13 abaixo, chegando ao resultado de que a temperatura da linha de centro não é sensível ao uso da origem virtual proposta por Heskestad, para esses dados.

Figura 13 – Efeito do uso da origem virtual na velocidade da linha central em função da altura da pluma.



Já a temperatura da linha de centro sofre uma influência significativa para baixos valores da altura vertical da pluma acima da superfície, como mostra no gráfico da Figura 14, porém há uma altura acima da superfície do incêndio para a qual a temperatura da pluma não é influenciada pelo uso da origem virtual, para esses dados. Essa transição pode ser vista em uma altura em torno de 30 a 20 metros de altura acima da superfície do incêndio.

Figura 14 – Efeito do uso da origem virtual na temperatura da linha central em função da altura da pluma.



5 CONCLUSÃO

O entendimento da pluma do incêndio é relevante para o entendimento das estratégias para proteger as pessoas, sendo imprescindível para o projeto de sistema de fumaça, detectores e sprinklers. Os sistemas de fumaça são baseados na estimativa da massa de fumaça produzida pelo incêndio, a qual é assumida como sendo igual à massa de ar que entra na pluma do incêndio. As variáveis avaliadas foram o fluxo de massa, temperatura e velocidade ao longo do eixo da pluma. Foram utilizadas as equações propostas por Heskestad, pois o mesmo é um dos mais recomendados para o projeto de sistemas de fumaça. A variação do fluxo de massa na altura virtual para uma altura acima da superfície do incêndio de 20m indicou que para densidades de energia menores a equação do fluxo de massa com a origem virtual proposto por Heskestad subestimou o fluxo de massa, enquanto que para densidades de energia maiores a origem virtual sobreestimou. Por outro lado, para uma densidade de energia constante, e ao variar a altura da pluma, a velocidade da pluma no seu eixo central não é sensível ao uso da origem virtual da pluma de incêndio. Já a temperatura do eixo central é sensível à origem virtual para baixos valores de altura da chama, na qual o resultado com o uso da origem virtual sobreestimou a temperatura da linha de centro, porém para grandes valores de altura a temperatura do eixo central não é sensível ao uso da origem virtual na pluma de incêndio. Dito isso, o objetivo central de avaliar o impacto quantitativo do uso da origem virtual proposto por Heskestad em variáveis como o fluxo de massa e a temperatura e velocidade da linha de centro, foi atingido, na qual foram observados comportamentos específicos para cada variável. Dentro deste contexto, são abertas portas interessantes para trabalhos futuros, como avaliar a possibilidade de omitir a origem virtual da pluma para determinados casos, visto que o modelo de Heskestad é um dos mais recomendados por diversas normas e livros, e para isso o uso de ferramentas estatísticas que calculam a dispersão de dados podem ser de grande valia, como o Coeficiente de Variação (CV), o qual um baixo valor de variação de dados (definido de maneira apropriada, na qual explica-se o motivo) do fluxo de massa com e sem o uso da origem virtual possa permitir que o uso da origem virtual seja omitido. Indo mais fundo ainda, pode-se elaborar também um trabalho que permita avaliar o impacto do uso da origem virtual em projetos de sistema de fumaças e em projeto de equipamentos como detectores e chuveiros automáticos (conhecidos como sprinklers).

REFERÊNCIAS

- BEYLER, Craig L. **Fire Safety Journal 11: 53-75**. Worcester: Elsevier, 1986.
- CANTIZANO, Alexis; GUTIÉRREZ, Cándido; REIN, Guillermo; VIGNE, Gabriele; WEGRZYNSKI, Wojciech. **Review and validation of the current smoke plume entrainment models for large-volume buildings**. In: Published by Springer, 2019.
- DRYSDALE, Dougal. **An Introduction to Fire Dynamics**. 3. ed. Chichester: John Wiley & Sons Ltd, 2011.
- FAYH, Rita. **Fire Safety Journal: Building fire simulation model. An overview**. Quincy: Elsevier, 1985.
- FITZGERALD, Robert W. **Building Fire Performance Analysis**. New York: John Wiley & Sons, 2004.
- FITZGERALD, Robert W.; MEACHAN, Brian. **Fire Performance Analysis for Buildings**. United States: Springer, 2017.
- HESKESTAD, Gunnar. **Engineering Relations for Fire Plumes**. Boston: Factory Mutual Research Corporation, 1984.
- HESKESTAD, Gunnar. **Virtual Origins of Fire Plumes**. Boston: Factory Mutual Research Corporation, 1983.
- JONES, J.C. **Combustion Science: Principles and Practices**. Newtown: Millennium Books, 1993.
- KARLSSON, Bjorn; QUINTIERE, James G. **Enclosure Fire Dynamics**. Boca Raton: CRC Press, 2000.
- KLOTE, John H.; MILKE, James A. **Principles of Smoke Management**. Atlanta: American Society of Heating, Refrigerating and Air-conditioning Engineers, Inc, 2002.
- KUČERA, Petr; POKORNY, Jiri. **Study of necessity of use of virtual origin in assessment of selected Fire Plume Characteristics**. Ostrava: MM Science Journal, 2016.
- MCCAFFREY, Bernard Ambrose. **Purely Buoyant Diffusion Flames: Some Experimental Results**. Washington: NBS, 1979.
- MORTON, Boyd Rutherford; TAYLOR, Geoffrey Ingram; TURNER, John Stewart. **Turbulent Gravitational Convection from Maintained and Instantaneous Sources**. London: Royal Society, 1956.

QUINTIERE, James G. **Fundamentals of Fire Phenomena**. Chichester: John Wiley & Sons Ltd, 2006.

SPFE, Society of Fire Protection Engineers. **The SPFE Handbook of Fire Protection Engineering**. 5. ed. New York: Springer, 2015.

ZUKOSKI, Edward Edom. **Fire safety Science, Proceedings of the First International Symposium**. New York: Springer, 1985.