

EXPLOSÃO OU COMBUSTÃO DIFUSA?

Wagner Alberto de Moraes¹
Charles Fabiano Acordi²

RESUMO

A combustão de nuvens de gás, pós ou vapores de líquidos inflamáveis é conhecida como explosão difusa ou pseudoexplosão. Explorando qualitativamente conceitos da mecânica dos fluidos, tais como fluidodinâmica e escoamento compressível, este artigo discute como a velocidade de propagação da zona de reação envolvendo combustíveis difusos é influenciada pela turbulência e pela onda de choque. Para diferenciar as reações envolvendo os combustíveis difusos, são propostas duas terminologias: combustão difusa, a qual o trabalho conclui como as reações onde o escoamento é incompressível e a velocidade de propagação não ultrapassa 20% da velocidade do som no meio e; explosão difusa, a qual pode ser deflagração ou detonação.

Palavras-chave: Explosão difusa. Mecânica dos fluidos. Investigação.

1 INTRODUÇÃO

O evento explosivo congrega aumento de volume instantâneo de gases com a liberação de energia, influenciando no sentido e velocidade de propagação do incêndio, nas marcas de combustão e danos estruturais remanescentes na edificação. Há como um incêndio por si só evoluir para uma explosão sem que houvesse um risco preexistente na edificação?

Blast (2007, p. 22), classifica as explosões dentro do grupo das reações de decomposição térmica, diferenciando-as pela velocidade de propagação da reação.

¹ 2º Tenente Bombeiro Militar, Perito em Incêndio e Explosão, graduado no Curso de Formação de Oficiais pelo Corpo de Bombeiros Militar de Santa Catarina (2014), graduado em engenharia de controle e automação pela Universidade Federal de Santa Catarina (2009), e mestre em engenharia mecânica pela Universidade Federal de Santa Catarina (2013). Email: wagnerm@cbm.sc.gov.br

² Major Bombeiro Militar, Perito em Incêndio e Explosão, graduado no Curso de Formação de Oficiais pela Polícia Militar de Santa Catarina (1994), graduado em direito pela Universidade do Planalto Catarinense (2004), mestre em direito pela Universidade Estácio de Sá (2010), e mestre em administração pela Universidade do Sul de Santa Catarina (2010). Email: charles@cbm.sc.gov.br

Sucintamente, a combustão ocorre sob baixas velocidades; a deflagração se propaga por condutividade térmica e; a detonação é associada a uma onda de choque com velocidade entre 1,5 e 9 km/s. De forma similar, a Instrução Técnica Nr 03 do Corpo de Bombeiros da Polícia Militar de São Paulo (CBPMESP, 2011) conceitua detonação como as explosões com propagação supersônica associadas à ocorrência de onda de choque e deflagração como as explosões com velocidade de propagação subsônica, sendo também sinônimo de “combustão muito viva”.

Para fins de perícia em incêndio e explosão, explosão é uma conversão instantânea de energia potencial em energia cinética com a produção de gases sob pressão os quais realizam trabalho mecânico (NFPA, 2011, p. 184). Os trechos chave da definição acima são: conversão instantânea de energia, relacionado à origem da explosão e; gases sob pressão que realizam trabalho, diretamente ligado a forma de desenvolvimento da explosão e seus resultados nas áreas próximas.

Este artigo aborda um caso específico de explosão, a explosão difusa, sob a ótica dos fenômenos físicos relacionados ao escoamento dos gases em expansão. Valendo-se da filosofia positivista e, explorando qualitativamente conceitos da mecânica dos fluidos tais como fluidodinâmica e escoamento compressível, relaciona-se a física à dinâmica observada em explosões difusas. Explosões com origem em artefatos explosivos não são objetos deste artigo.

2. A EXPLOSÃO

Segundo NFPA (2011, p. 185), as duas principais causas de explosão normalmente encontradas diferenciam-se pela fonte e mecanismo que originam a expansão dos gases, quais sejam: explosão mecânica e explosão química.

2.1 Explosão mecânica

A explosão mecânica é aquela causada pela ruptura de recipiente resultando na liberação de gases ou vapores sob pressão, sem a mudança de composição química das substâncias do recipiente (NFPA, 2011, p. 185). Quando as pressões no interior de um recipiente se elevam à valores superiores àqueles previstos em projeto e, os dispositivos de

alívio falham ao não controlar o aumento destas pressões, a força exercida pode superar a resistência mecânica do recipiente, causando sua ruptura abrupta.

O *BLEVE*³, exemplo de explosão mecânica apresentado pela NFPA (2011, p.185), ocorre quando a temperatura do líquido e vapor contido no interior de um recipiente é elevada pela exposição deste ao incêndio, até o ponto que o aumento da pressão interna causar a ruptura do recipiente. Após a explosão, ao atingir a pressão atmosférica, o líquido vaporiza quase instantaneamente, momento em que a energia potencial (confinamento sob pressão) é transformada em energia cinética (expansão dos gases), amplificando os efeitos da explosão. Se os vapores forem combustíveis, provavelmente a expansão será acompanhada de incêndio, caso contrário, não haverá incêndio, mas o fenômeno não deixa de ser considerado *BLEVE*, por exemplo, a explosão de uma caldeira de vapor, onde a vaporização repentina da água ocorre sem a mudança de sua estrutura química.

2.2 Explosão química

Explosões de origem química são aquelas em que o aumento de pressão é resultado de reações exotérmicas com a mudança química do combustível preexistente. Considerando que este artigo não trata dos artefatos explosivos, concentra-se o estudo nos fenômenos comuns às explosões que envolvem pó, gás ou vapor de combustível (combustíveis difusos).

2.2.1 COMBUSTÃO DIFUSA E EXPLOSÃO DIFUSA

Nem sempre a combustão de combustíveis difusos dá origem a explosões. Por exemplo, a NFPA (2011, p. 184-185) define *flash fire* como o incêndio que se propaga rapidamente através de combustíveis difusos, tais como poeira, gás ou vapor de líquido inflamável, sem necessariamente ocorrer uma explosão. Deflagração, ou até mesmo detonação, pode ocorrer associada ao *flash fire*, dependendo do combustível, ventilação e ambiente adjacente. Se explosão estiver associada ao *flash fire*, a NFPA o denomina *combustion explosion*. Aragão (2010, p. 110) nomina estes dois fenômenos distintos como pseudoexplosão ou explosão difusa, sem diferenciar se houve ou não uma explosão associada à queima do combustível difuso.

³ BLEVE: *boiling liquid expanding vapor explosion*, tradução livre: explosão de vapor de expansão de líquido sob pressão.

Visando nominar univocamente os fenômenos relacionados aos combustíveis difusos, adotam-se os seguintes termos: combustão difusa, como tradução do fenômeno acima descrito como *flash fire*, e explosão difusa, quando fenômenos explosivos estiverem associados à combustão difusa.

2.2.2 FATORES QUE POTENCIALIZAM A EXPLOSÃO

Segundo a NFPA (2011, p.190), os efeitos de qualquer explosão estão relacionados aos seguintes fatores: a) tipo e configuração do combustível; b) natureza, forma, volume e forma do compartimento ou recipiente; c) nível de congestionamento dos obstáculos; d) localização e magnitude da fonte de ignição; e) ventilação existente; f) máxima pressão relativa; g) taxa de crescimento da pressão. Os itens b, c, e, f e g estão diretamente relacionados aos fenômenos de mecânica de fluidos que serão abordados mais a frente.

Os combustíveis difusos que, sob condições específicas, podem originar explosão difusa são: os gases inflamáveis, a exemplo do gás natural ou gás liquefeito do petróleo; os vapores de líquidos combustíveis, tais como gasolina ou solventes; c) a poeira combustível (grãos, carvão, trigo, têxtil e metais pirofóricos) e; a fumaça e demais subprodutos da queima incompleta (NFPA, 2011, p. 185-186; NOON, 2000, p. 193).

Quanto à fonte de ignição, a qual da origem à explosão, ela pode variar conforme o tipo de combustível difuso e as condições ambientais envolvidas, podendo ser uma superfície aquecida ou uma centelha elétrica gerada por algum equipamento, por exemplo. Em alguns casos, sequer é o agente ígneo que desencadeia o processo explosivo, como é o caso do *backdraft*. Quando uma cena de incêndio possui um ambiente enclausurado, sob altas temperaturas, empobrecido de oxigênio, tomado por fumaça negra proveniente da combustão incompleta (combustível), o gatilho para gerar a explosão é a ventilação, ou seja, a inserção de oxigênio. Segundo NFPA (2011, p.191), o maior rendimento da explosão difusa ocorre quando a fonte de ignição está no centro de um estrutura cúbica. Quanto mais perto a fonte de ignição estiver de uma parede, mais cedo a zona de reação atingirá essa parede e se extinguirá, reduzindo a zona de reação. A energia da fonte de ignição, exceto em ignições muito poderosas, tem pouco efeito sobre o resultado da explosão.

3 MECÂNICA DOS FLUIDOS E AS EXPLOSÕES DIFUSAS

Instalada uma condição de combustão difusa, os fenômenos relacionados ao escoamento dos gases resultantes da explosão influenciam fortemente a evolução e resultados da explosão. Os conceitos de mecânicas dos fluidos relacionados ao tema são a fluidodinâmica e o escoamento compressível.

3.1 Fluidodinâmica

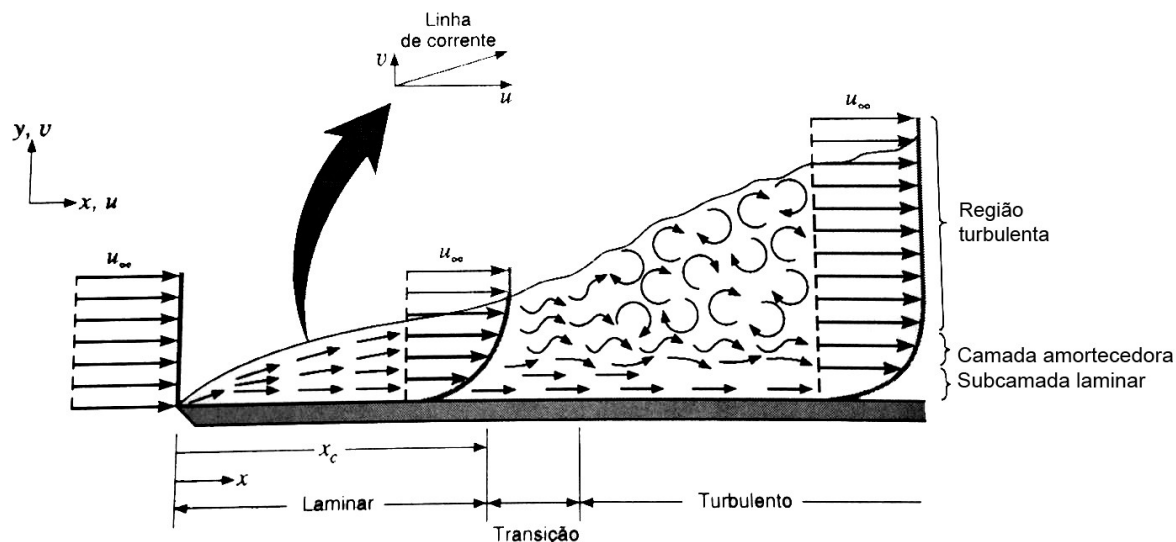
Quando partículas de um fluido aderem a uma superfície elas passam a ter velocidade nula. Essas partículas exercem força sobre as partículas das camadas de fluido adjacentes, atrasando-as até uma distância “ y ” da superfície onde o efeito é desprezível, e o fluxo não sofre a influência da superfície (INCROPERA, 1998). Quando não há perturbação do objeto sobre as linhas de fluxo, tem-se a seção no infinito do fluxo, e as linhas são nominadas como corrente ao longe enquanto que nas proximidades do objeto tem-se a formação da camada limite fluidodinâmica, a qual poderá ser laminar ou turbulenta (BRUNETTI, 2008).

3.1.1 ESCOAMENTO TURBULENTO

Na camada limite laminar o movimento do fluido é ordenado, identificado por linhas de corrente ao longo das camadas de partículas que se movem. O movimento do fluido em uma camada limite turbulenta é altamente irregular, sendo caracterizado por flutuações de velocidade, as quais melhoram as transferências de momento, energia e massa entre fluido e superfície. O fluxo através de uma superfície é ilustrado na Figura 1. Na região plenamente turbulenta, as condições do escoamento são caracterizadas por um movimento tridimensional, altamente aleatório, com grandes volumes de fluidos resultando no aumento da espessura da camada limite, da tensão de cisalhamento sobre a superfície (arraste) e nos coeficientes de transferência de calor por convecção (INCROPERA, 1998).

Segundo a NFPA (2011, P. 190) a turbulência no interior da mistura ar combustível potencializa a velocidade de propagação da zona de reação, aumentando a taxa de combustão e a taxa de aumento da pressão, mesmo em condições de pouco combustível ou em concentrações abaixo ou acima dos limites de inflamabilidade. O tamanho, forma e localização dos obstáculos dentro do compartimento ou recipiente tem relação direta com a turbulência, a qual é potencializada em ambiente congestionados. Além dos obstáculos, sistemas de ventilação também influem na turbulência.

Figura 1 - Desenvolvimento da camada limite fluidodinâmica sobre uma placa plana.



Fonte: Incropera (1998, p. 160)

O aumento da taxa de combustão, ou seja, a velocidade de propagação da zona de reação, é consequência, entre outros fatores: do aumento da probabilidade de choques entre as moléculas de combustível e comburente e da homogeneização do combustível difuso no ambiente, formando atmosfera com maiores volumes cujas concentrações encontram-se dentro do limite de inflamabilidade. A forma como o combustível estaria previamente distribuído depende da espécie de combustão difusa em análise. Por exemplo, a fumaça resultante da queima incompleta acumula-se ao nível do teto, o pó combustível deposita-se por todo o maquinário em uma indústria e o gás liquefeito de petróleo (GLP), quando vaza em uma residência, tende a distribuir-se ao nível do solo.

3.1.2 FORÇAS GERADAS PELO ESCOAMENTO

Ao analisar uma cena de combustão difusa, o investigador deve observar a posição e orientação dos objetos arremessados, buscando relacionar com as posições e orientações iniciais. Desta forma é possível formular hipóteses a respeito da trajetória dos objetos, a qual estaria diretamente relacionada às forças geradas pelo escoamento dos gases da explosão sobre os objetos.

NFPA (2011, p. 190) relata que a distância atingida pelos escombros depende da direção inicial, massa, velocidade, características aerodinâmicas, obstruções e ricocheteamentos. Em primeira análise, o investigador não deve considerar a distância entre o ponto em que o escombros foi encontrado e o epicentro como sendo a distância total percorrida pelo escombros.

Apesar das condições encontradas em uma cena real de combustão difusa não serem “ideais” (objetos podem ricochetear, entre outros fatores), pode-se tomar o maior número de trajetórias possíveis, inferindo sobre uma região em que, com maior probabilidade, iniciou-se a explosão difusa. Esta informação, analisada em conjunto com as possíveis fontes de ignição encontradas no local, auxilia o investigador na validação e descarte das hipóteses.

Brunetti (2008, p. 224) considera que as forças aplicadas por um fluido em uma superfície sólida podem ser decompostas em ação normal, devido a pressão, e ação tangencial, devido a tensão de cisalhamento. A força aplicada é diretamente proporcional: ao peso específico do fluido; ao quadrado da velocidade relativa entre fluido e objeto e; à área de contato do objeto com o fluido. A ação normal é resultado da diferença entre as pressões dinâmicas resultantes na superfície do objeto, resultando em uma força aplicada pelo escoamento ortogonalmente à superfície do objeto. A ação tangencial pode ser decompostas em duas componentes: força de arrasto (de superfície ou de forma), paralela às linhas de corrente ao longe e; força de sustentação, normal às linhas de corrente ao longe.

3.1.2.1 Força de sustentação

Está relacionada a diferença de velocidade entre a linha de fluxo acima e abaixo de um determinado objeto, causando diferencial de pressão e, conseqüentemente, uma força será aplicada ortogonalmente à direção do movimento linha de fluxo ao infinito. É a geometria do objeto e seu posicionamento com relação às linhas de fluxo que define o sentido da sustentação, tal como ocorre nos aerofólios e asas (BRUNETTI, 2008).

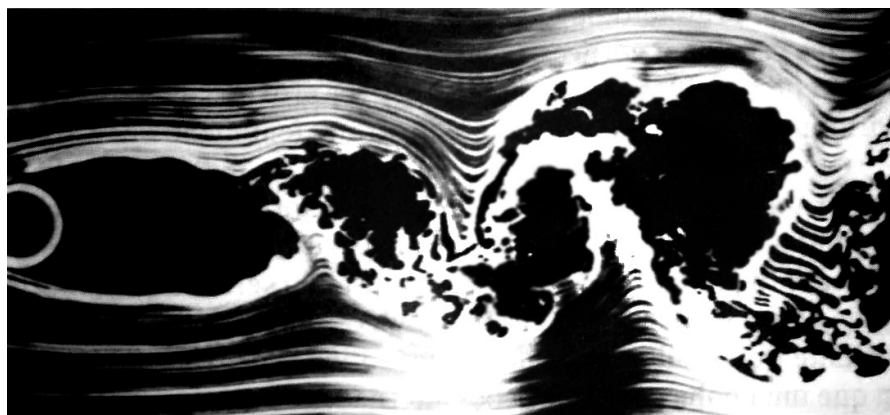
3.1.2.2 Força de arrasto de superfície

A existência da camada limite nos objetos dá origem às tensões de cisalhamento quando este objeto é imerso em um fluxo. Quanto maior for o gradiente de velocidades ao longo das perpendiculares da superfície, maior será o arrasto (BRUNETTI, 2008).

3.1.2.3 Força de arrasto de forma ou de pressão

A passagem de fluido transversalmente ao eixo de um cilindro circular é apresentada na Figura 2. Neste caso, além do atrito viscoso acima descrito, tem-se a separação da camada limite com a formação de vórtices e turbilhões (regiões de movimento circular do fluido), região conhecida como esteira do deslocamento. Dentro da esteira, o fluido praticamente não possui movimento de translação e os vórtices não convertem sua energia cinética em energia potencial (pressão), fazendo com que a pressão ao longo da esteira de deslocamento seja próxima ao valor mínimo (BRUNETTI, 2008; POTTER, 2004; INCROPERA, 1998). A força de arrasto de forma ou de pressão, é o fenômeno atrelado aos fluxos dos gases em uma explosão que causa maiores danos aos objetos cilíndricos esguios. A NFPA (2011, p. 197) descreve tais danos como rompimentos de tubulações, dutos e postes, os quais, caso possuam produtos perigosos, podem aumentar os danos inicialmente causados pela explosão.

Figura 2 - Espalhamento de vórtices após escoamento transversal ao eixo de cilindro circular.



Fonte: Potter (2004, p. 293)

Toda análise fluidodinâmica acima formulada é baseada na premissa que o fluido escoar sem variações consideráveis em seu peso específico. Todavia, eventos explosivos ocorrem sob elevadas taxas de conversão de energia potencial em energia cinética no fluido. Efeitos térmicos e efeitos da pressão atuam sobre a densidade específica do fluido e seu escoamento passa a ser compressível.

3.2 Escoamento compressível

Em mecânica dos fluidos, o equacionamento do escoamento incompressível desconsidera variações no peso específico do fluido, utilizando apenas parcelas de energia mecânica, quais sejam: energia cinética, potencial e pressão. No escoamento compressível, os conceitos de termodinâmica devem ser acrescentados à formulação (energia interna, entalpia e entropia). Na sequência é feito um resumo das formulações presentes no Capítulo 12 de Brunetti (2008), restringindo ao mínimo necessário ao entendimento dos fenômenos de escoamento compressível relacionados às explosões difusas, tais como o número de Mach, propagação de uma onda de pressão e ondas de choque.

3.2.1 NÚMERO DE MACH

Seja o número de Mach (M) a relação entre a velocidade do fluido (v) numa seção e a velocidade do som (c) na mesma seção:

$$M=v/c \quad (1)$$

O número de Mach permite classificar os escoamentos: a) escoamento incompressível ($M<0,2$); b) escoamento subsônico ($0,2<M<1$); c) escoamento sônico ($M=1$); d) escoamento supersônico ($M>1$).

3.2.2 PROPAGAÇÃO DE UMA ONDA DE PRESSÃO

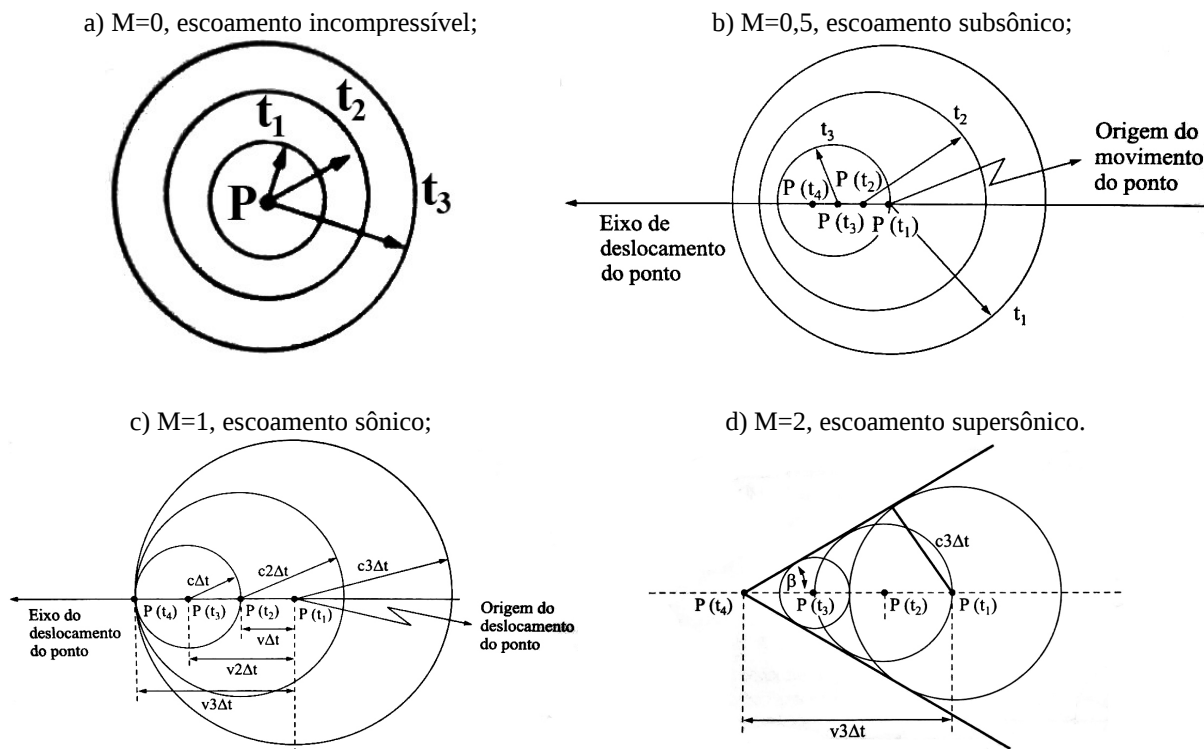
Seja a propagação de ondas com a velocidade do som, em todas as direções, a partir de um único ponto emissor, formando frentes de onda esféricas, que no plano da figura serão vistas como circunferências. As emissões são observadas em instantes sucessivos, em intervalos de tempo discretos e iguais, para diversas condições do número de Mach, conforme a Figura 3 (BRUNETTI, 2008).

3.2.2.1 Escoamento incompressível e combustão difusa

Na combustão difusa, a reação de combustão ao longo da nuvem contendo combustível disperso em comburente ocorre em uma frente de chama, ou zona de reação a

qual se expande em todas as direções separando volumes de fluido queimados dos ainda não queimados (NFPA, 2011, p. 185).

Figura 3 - Classificação dos escoamentos pelo número de Mach:



Fonte: adaptado de Brunetti (2008, p. 347-349).

Na Figura 3.a, o ponto está em repouso, as ondas, emitidas em instantes sucessivos e iguais, propagam-se radialmente. Quando o ponto P aumenta localmente a pressão, o fluido nessa posição fica mais comprimido que o vizinho, contra qual irá se expandir. Essa expansão, por sua vez, comprime a camada vizinha que se expandirá para a próxima, e assim por diante, provocando a propagação da variação da pressão através do fluido. Todavia, como a propagação é igual em todas as direções, a região perturbada permanece com suas propriedades distribuídas homoganeamente, ou seja, a mesma pressão, temperatura e densidade (BRUNETTI, 2008).

Portanto, caso a velocidade da zona de reação seja menor que 20% a velocidade do som no meio, provavelmente o escoamento resultante será laminar e incompressível e não haverá explosão, apenas a combustão difusa.

3.2.2.2 Explosão difusa – deflagração

Para AICE (1994, p. 52), na deflagração, o mecanismo de propagação da zona de reação é a difusão térmica associada ao escoamento turbulento que potencializa a reação entre combustíveis e comburente.

Na Figura 3.b, é adotado $M=0,5$, ou seja, a velocidade do ponto emissor é a metade da velocidade de propagação da onda de pressão, ou no mesmo intervalo de tempo, a onda emitida num certo instante percorrerá o dobro da distância percorrida pelo ponto no mesmo intervalo de tempo. Nota-se a aproximação das ondas no sentido do movimento e um afastamento em sentido contrário, dando origem ao efeito Doppler, além de alterar a distribuição da pressão, temperatura e peso específico do fluido na zona perturbada, o que não ocorre no escoamento incompressível (BRUNETTI, 2008).

Analisando o ponto P da Figura 3.b como sendo o deslocamento da zona de reação, em uma deflagração, pode-se inferir que, o efeito Doppler prepara o volume (alterando pressão, temperatura e peso específico) de combustível difuso que ainda não reagiu para a chegada da frente de reação (zona de reação), resultando em reações químicas bem mais eficientes e energéticas que no caso do escoamento incompressível. Nos casos em que a nuvem possui tamanho e homogeneidade suficiente, existe a tendência de crescimento da velocidade de propagação da onda de reação podendo, em condições de elevada turbulência, resultar em escoamento supersônico.

3.2.2.3 Explosão difusa – transição deflagração para detonação

Na Figura 3.c, o ponto emissor viaja na velocidade do som e não haverá propagação, pois as perturbações se acumularão no próprio ponto, criando uma região denominada “barreira do som”. Mach 1, é conhecido como estado crítico, pois é uma fronteira para uma modificação no comportamento do escoamento (BRUNETTI, 2008).

3.2.2.4 Explosão difusa – detonação

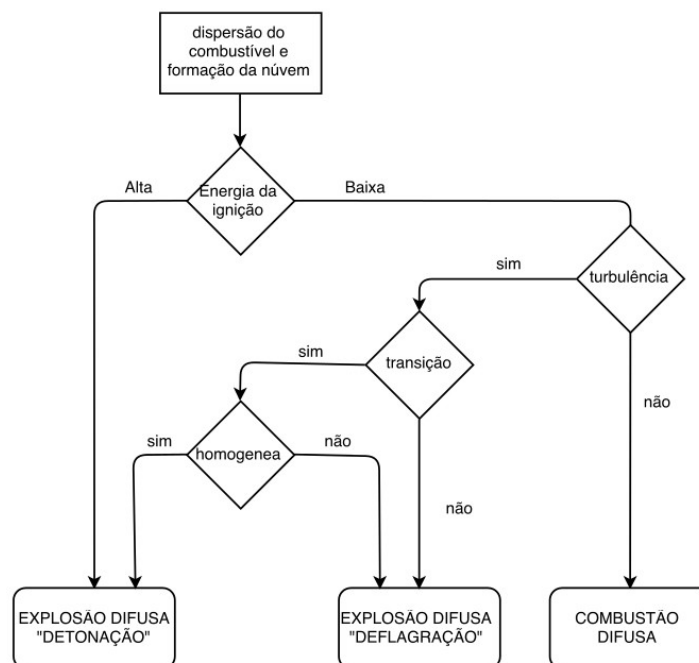
Para AICE (1994, p. 52), a zona de reação na detonação é propagada pela onda de choque que comprime o combustível difuso não reagido até sua temperatura de autoignição, e a onda de choque é mantida pelo calor da reação.

Na Figura 3.d, a velocidade do ponto é maior que a velocidade de propagação da onda de pressão causada no meio. O ponto passa de repente pelo fluido e a propagação da perturbação acontece posteriormente. As esferas propagadas pela passagem do ponto tem como superfície envolvente comum um cone, denominado cone de Mach. O espaço fica dividido em duas regiões distintas, uma interna ao cone, em que o meio está perturbado pela passagem do ponto, e outra externa, denominada zona de silêncio, em que o fluido ainda não foi perturbado (BRUNETTI, 2008).

Seja um escoamento que a montante tenha condições supersônicas. Se a jusante as condições de contorno forem tais que ele tenha de assumir um escoamento subsônico, as partículas rápidas a montante em alguma seção encontrarão as lentas do escoamento subsônico, provocando um choque na interface. Esse choque provocará uma redução brusca da velocidade, com um conseqüente aumento de pressão, temperatura e densidade do fluido. A onda de choque é um fenômeno que pode acontecer em escoamentos supersônicos os quais, através da criação da onda de choque, passam a ser subsônicos (BRUNETTI, 2008).

A Figura 4 traz a árvore de eventos das explosões difusas e da combustão difusa.

Figura 4. Árvore de eventos das explosões difusas e da combustão difusa.



Fonte: Adaptado de AICE (1994)

Analisando-se de cima para baixo, se a energia de ignição for suficientemente grande, como no caso de artefatos explosivos, tem-se uma detonação. Caso contrário, analisa-se o

escoamento. Se a combustão propagar-se com escoamento laminar, tem-se combustão difusa, se houver turbulência, evolui para explosão, inicialmente deflagração.

A deflagração poderá evoluir para uma detonação caso as energias liberadas na zona de reação gerem escoamentos supersônicos. Por sua vez, o escoamento supersônico só será autossustentável se a nuvem de combustível disponível para reagir for homogênea. Caso contrário, ocorrerá apenas uma detonação localizada, e o escoamento retornará ao regime subsônico, propagando-se novamente como deflagração.

4. CONCLUSÃO

O presente artigo diferenciou explosão e combustão difusa baseando-se nos princípios da mecânica dos fluidos que influenciam na velocidade de propagação da zona de reação. Adotando-se as denominações combustão difusa e explosão difusa, ficou definida a primeira como sendo aquela onde o escoamento é incompressível e a velocidade de propagação não ultrapassa 20% da velocidade do som no meio. A explosão difusa, deflagração ou detonação, é caracterizada pelo princípio de mecânica dos fluidos que predominar, escoamento turbulento ou escoamento compressível, respectivamente.

A investigação da combustão e explosão envolvendo pós, gases e vapores combustíveis deve considerar as particularidades dos combustíveis, fontes de ignição e ventilações existentes, características essas abordadas com maior frequência pelos investigadores. O estudo da dinâmica dos fluidos aplicado à investigação de incêndio e explosão auxilia o investigador na correta caracterização da forma de propagação e evolução da explosão difusa, evitando-se o erro de correlacionar grandes danos apenas aos casos onde poderosas fontes de ignição estiverem presentes. Portanto, mesmo que os produtos perigosos em uma edificação estejam corretamente dimensionados e controlados, uma combustão difusa poderá evoluir para uma explosão difusa caso os fenômenos de fluidodinâmica potencialize as reações químicas.

A explosão difusa, muitas vezes investigada apenas sob a ótica dos fenômenos químicos envolvidos, é dependente da interação dos gases em expansão com o ambiente através do qual a reação se propaga. Para quantificar essa dependência, recomenda-se a aplicação de experimentos em escala em trabalhos futuros.

REFERÊNCIAS

ACORDI, Charles Fabiano. **Apostila de Metodologia da investigação de incêndios**. Florianópolis, 2015.

AMERICAN INSTITUTE OF CHEMICAL ENGINEERS (AICE). **Guidelines for Evaluating the Characteristics of Vapor Cloud Explosion, Flash Fires and BLEVES**. Nova York, EUA, 1994.

ARAGÃO, Ranvier Feitosa. **Incêndios e explosivos: uma introdução à engenharia forense**. Campinas, SP: Millennium, 2010.

BRUNETTI, Franco. **Mecânica dos fluidos**. Pearson Prentice Hall, 2007.

CORPO DE BOMBEIROS DA POLÍCIA MILITAR DO ESTADO DE SÃO PAULO (CBPMESP). Regulamento de segurança contra incêndio das edificações e áreas de risco do estado de São Paulo. **Instrução Técnica, v. 3**, 2011.

CORPO DE BOMBEIROS MILITAR DO DISTRITO FEDERAL (CBMDF). **Guia para investigação de incêndios e explosões**. Brasília, 2010.

DRYSDALE, Dougal. **An introduction to fire dynamics**. John Wiley & Sons, 2012.

INCROPERA, Frank; DEWITT, David. **Fundamentos de transmissão de calor e de massa**. Tradução da 4a. edição americana, Ed. Guanabara Koogan SA, RJ (1998).

MACIEL, Homero Santiago. **Blast-efeitos da onda de choque no ser humano e nas estruturas**. 2007. Tese de Mestrado. Instituto Tecnológico de Aeronáutica.

NATIONAL FIRE PROTECTION ASSOCIATION [NFPA]. **NFPA 921: Guide for fire and explosion investigations**. National Fire Protection Association, 2011.

NOON, Randall. **Forensic engineering investigation**. CRC Press, 2000.

POTTER, Merle; WIGGERT, David. **Mecânica dos Fluidos**, 2004.

SANTIAGO, Gustavo Fuhr. **Efeitos de explosão de nuvem de vapor inflamável**. 2003. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

