

RESENHA CRÍTICA

**DEFLAGRAÇÕES: ESTUDO DE CASOS DE EXPLOSÕES
UTILIZANDO A METODOLOGIA ESTABELECIDNA NA NFPA 921
EDIÇÃO 2024**

Mario Ernesto Ramirez Saavedra¹

<https://orcid.org/0009-0002-1194-8078>

Devido ao crescimento populacional nas grandes cidades, cada vez mais pessoas residem em edifícios, não apenas são mais altos, mas que albergam uma maior quantidade de habitantes. Esses edifícios modernos costumam estar equipados com sistemas de gás para o funcionamento de aquecedores de água, secadores de roupa e estufas, essenciais para as atividades cotidianas.

Para compreender melhor os riscos associados à ocupação de edifícios altos, é crucial definir, segundo as normativas, o que se considera um edifício de grande altura em termos de segurança e resposta ante emergências. De acordo com a NFPA 101, edição 2024, capítulo 3.3.37.7, um edifício de grande altura é aquele que tem um piso ocupável a mais de 75 pés (23 metros) por cima do nível mais baixo de acesso para veículos do Corpo de Bombeiros.

No que se refere aos arranha-céus, se considera que um edifício se qualifica como tal quando sua altura supera os 100 metros (328 pés). No entanto, alguns experts elevam essa definição a partir dos 150 metros (492

¹CEO - Chief Executive Officer – Fire & Chem. Mestre em Engenharia Química. Professor da Universidade do Panamá. Cidade do Panamá – Panamá. Email: mario@firechemconsultants.com

pés). Hoje em dia, existem muitos arranha-céus que superam os 400 metros (1.300 pés) de altura, o que propõe desafios cada vez mais complexos em termos de segurança e proteção contra incêndios, assim como em respostas diante de emergências.

As explosões causadas por fugas de gás em edifícios habitacionais têm ficado cada vez mais comuns. Os sistemas de gás são vulneráveis a defeitos nos equipamentos, práticas ruins de instalação e a negligência dos usuários ao utilizar os sistemas. Este tipo de incidentes propõe um risco considerável para os ocupantes dos edifícios e ressalta a importância de manter altos padrões na instalação, uso e manutenção dos sistemas de gás.

Para compreender melhor este fenômeno, a NFPA 921, edição 2024, capítulo 22.1.3 define uma explosão como a conversão repentina de energia potencial, seja ela química ou mecânica, em energia cinética, com a liberação de gases a alta pressão. Esses gases, gerados pela explosão, realizam um trabalho mecânico que pode destruir a própria estrutura de confinamento, assim como mover, mudar ou romper materiais próximos.

Uma explosão tem como primeiro protagonista a onda de pressão explosiva, que gera a maioria dos danos na estrutura durante seu desenvolvimento. Numa explosão ideal, a onda de pressão seria esférica, se expandindo uniformemente em todas as direções desde o epicentro.

No entanto, em situações reais, fatores como o confinamento, a obstrução, a localização do ponto de ignição, a forma da nuvem de gás, e a distribuição da concentração alteram a direção, a forma e a força da onda de pressão. Esses elementos contribuem para que os efeitos destrutivos da explosão variem em intensidade e alcance, complicando a sua predição e controle. Esse conhecimento é chave para compreender os padrões de dano nas estruturas e para desenhar medidas de segurança mais efetivas nos entornos de risco.

Os investigadores de incêndios e explosões enfrentam novos desafios para determinar as causas e a origem das explosões provocadas por fugas de gás em edifícios de grande altura. No entanto, a NFPA, através de seu documento **NFPA 921: Guia para a investigação de incêndios e explosões**, proporciona linhas chaves que ajudam os investigadores a estabelecer os seus objetivos e metodologias ao abordar esse tipo de cenário complexo.

Esses edifícios, devido ao seu tamanho e características, apresentam dificuldades adicionais, como a análise da dispersão do gás, os padrões de dano estrutural e a identificação precisa das fontes de ignição. A guia da NFPA oferece ferramentas fundamentais para investigar esses incidentes de forma efetiva, minimizando a margem de erro e ajudando a desenvolver medidas de prevenção mais adequadas.

Entre os objetivos gerais de uma investigação de explosões, não diferem significativamente dos de uma investigação de incêndios. Os passos chave incluem:

- Determinar a origem (epicentro): Identificar o ponto exato onde começou a explosão.
- Identificar o combustível e a fonte de ignição: Estabelecer qual substância foi a causa da explosão e qual fator a acendeu.
- Descrever a sequência de ignição: Entender como e em que ordem ocorreu a ignição.
- Determinar a causa: Definir quais fatores contribuíram para que a explosão se desencadeou.
- Estabelecer a responsabilidade pelo incidente: Investigar se houve negligência ou falha humana, e assignar a responsabilidade correspondente.
-

Esses objetivos são fundamentais para esclarecer o acontecido, identificar lições aprendidas e, quando for necessário, estabelecer medidas preventivas ou corretivas no futuro.

O aspecto mais crucial numa investigação de incêndios é determinar o método adequado a se seguir; no entanto, numa cena de explosão, é ainda mais relevante que o perito estabeleça um enfoque sistemático para examinar a cena. Diferentemente dos incêndios, as explosões costumam gerar cenas mais amplas e com maior grau de perturbação. Por isso, se as tarefas de investigação se realizam sem um enfoque previamente planejado, a complexidade das explosões podem fazer com que a investigação seja mais difícil ou inclusive impossível de se executar de forma efetiva.

O primeiro dever dos investigadores numa cena de explosão é assegurar a área afetada. Uma vez feito isso, o investigador deve realizar uma avaliação preliminar para identificar o tipo de incidente que se está enfrentando. Antes de proceder com as tarefas investigativas, o perito deve contatar a Unidade Técnica de Explosivos para que esta determine, através de seus procedimentos de busca, se a explosão foi causada por um artefato explosivo ou uma arma de destruição massiva. Se se detecta a presença de algum artefato ou resto de material explosivo, os peritos devem se retirar e entregar o controle da cena aos agentes especializados da unidade de explosivos para uma investigação criminal.

Caso a unidade técnica não encontre rastros de explosivos, a equipe de investigação de incêndios e explosões pode proceder com uma avaliação detalhada da cena. O investigador começará analisando os danos exteriores e a estrutura da cena, com o apoio de experts em estruturas, e posteriormente realizará uma análise mais detalhada dos danos internos, incluindo o movimento de paredes e vidros dentro da área afetada pela explosão.

A análise detalhada de uma cena de explosão implica identificar os efeitos da explosão, os danos causados por incêndios anteriores ou

posteriores, e a coleta de evidências. Um aspecto crucial é a identificação e análise dos vetores de força, que se manifestam em elementos como muros derrubados, a trajetória de objetos movidos, e a dispersão dos escombros. Esses elementos seguem padrões específicos que indicam a direção e a intensidade da explosão. Observar a direção e a origem desses vetores é essencial para delimitar a área onde se originou a explosão.

Para determinar o epicentro, o investigador deve rastrear desde as áreas menos estragadas na direção das mais afetadas, seguindo a trajetória dos vetores de força. Uma vez identificada a origem da explosão, se deve estabelecer o tipo de combustível envolvido e a possível fonte de ignição.

No caso de explosões em edifícios residenciais de grande altura, o combustível responsável costuma ser petróleo liquefeito (GLP), utilizado para fogões, aquecedores de água e secadoras. A fuga desse gás, geralmente por instalações defeituosas ou mal uso, é uma das principais causas de explosões nesse tipo de edificação.

Nos casos onde se suspeita que uma explosão foi causada por gás liquefeito de petróleo (GLP) utilizado em sistemas de edifícios, é fundamental que o investigador realize provas de pressão para detectar possíveis fugas no sistema. Essas provas devem seguir os métodos estabelecidos na NFPA 54: Código Nacional de Gás Combustível, especificamente na seção 8.3.2.1, que define as provas de pressão como uma operação que verifica a integridade dos tubos de gás depois de sua instalação ou modificação.

Apesar de que a NFPA 921 (Guia para a investigação de incêndios e explosões) não detalha provas adicionais para o sistema de gás, é recomendável também avaliar a concentração de odorante no GLP. Isso permite determinar se as pessoas no lugar da explosão puderam perceber o odor a gás antes do incidente, o que ajuda a estabelecer a sequência de eventos.

As provas de odorante devem ser regidas por um procedimento cientificamente comprovado para garantir a validade e confiabilidade, especialmente se os resultados forem apresentados em juízo. Portanto, se sugere utilizar os métodos da ASTM, tais como:

- ASTM D 1265: Método de amostragem de gás propano em tanques.
- CAN/CGSB-3.0 No. 18.5-2015 Parte B: Método para determinar o mercaptano de estilo em gases combustíveis.

Os resultados dessas provas devem ser comparadas com as normas nacionais ou federais de concentração e qualidade do gás. Na América Central, a referência é o RTCA 75.01.21:19, que estabelece especificações físico-químicas para o propano comercial, regulando as concentrações de odorantes entre 12 e 24mg/m³. No entanto, na indústria de gás combustível se trabalha com uma concentração de 14mg/m³pros tanques de GLP comercial.

A **análise da fonte de ignição** numa investigação de explosão, especialmente quando se trata de gases combustíveis como propano ou butano, é um dos aspectos mais complexos. Isso se deve à possível presença de múltiplas fontes de ignição competentes. A quantidade de energia necessária para iniciar a combustão desses gases pode vir de diversas fontes, como os **arcos de separação** que são gerados numa tomada energizada, a chispa de um interruptor de luz ao ser acesa ou apagada, ou até mesmo o acender um eletrodoméstico.

Segundo a **NFPA 921** (Guia para a investigação de incêndios e explosões), edição 2021, seção 9.9.4.4, se define “os **arcos de separação** como uma descarga breve que se produz quando se **abre um circuito elétrico energizado enquanto flui corrente elétrica**, como ao apagar um interruptor ou desconectar uma tomada. Geralmente no se percebem arcos num interruptor, mas podem ser vistos quando se desconecta a tomada enquanto

flui corrente elétrica. Os motores com escovas podem produzir uma visualização quase contínua de arcos entre as escovas e o interruptor. A 120/240V, o arco de separação não se mantém e se extingue rapidamente. Os arcos de separação ordinários nos sistemas elétricos costumam ser tão curtos e de baixa energia que só os gases, vapores e pós combustíveis podem ser acesos”.

Quando o investigador consegue determinar tanto a fonte da fuga de gás como a fonte de ignição dentro do compartimento afetado, é preciso estabelecer a causa da explosão utilizando os seguintes aspectos chave:

- **Análise da linha do tempo:** Estabelecer o momento em que ocorreu a fuga de gás, o tempo que tomo para que o gás se acumulasse em concentrações explosivas, e o momento em que se produziu a ignição.
- **Análise do padrão de danos:** Examinar os danos causados pela explosão para identificar os pontos de maior impacto e correlacionar estes com a possível localização da fuga e a ignição.
- **Análise de escombros:** Avaliar a dispersão e o tipo de escombros, o que pode indicar a magnitude e direção da força explosiva.
- **Correlação do tipo de explosão e a energia com os danos sofridos:** Comparar a natureza da explosão (deflagração, detonação, etc.) e a energia liberada com o dano estrutural observado para validar a hipótese sobre o tipo de explosão.
- **Análise de elementos e estruturas danificados:** Estudar como as estruturas, objetos e materiais dentro da área afetada foram danificados, para rastrear o caminho e a extensão da onda de pressão.
- **Correlação de efeitos térmicos:** Observar as marcas de queimaduras, o nível de carbonização ou qualquer outro efeito para determinar se o fogo exerceu um papel na sequência da explosão, e como os elementos ao redor foram afetados pelo calor.

Este enfoque ajuda a consolidar a causa específica da explosão ao integrar todas as evidências físicas e as relações entre os diferentes fatores que influenciaram no incidente.

Na última versão da **NFPA 921**, a guia sugere que os investigadores elaborem **mais de uma hipótese provável** para determinar a causa de uma explosão. Este enfoque múltiplo permite uma investigação mais robusta e exaustiva, ao considerar diferentes cenários que poderiam ter causado o incidente. Entre os aspectos relevantes que devem ser tomados em consideração ao formular essas hipóteses, se propõe os seguintes:

- A coincidência dos vetores de força com a posição da zona de origem (epicentro).
- A localização da fuga deve coincidir com a zona de origem (epicentro).
- A dinâmica da onda de pressão explosiva deve estar relacionada com a posição da fuga.
- Os efeitos do vento, a fricção, a queda de paredes e janelas devem ser relacionados com a área de origem e os vetores de força.
- A avaliação dos eletrodomésticos (dispositivos de gás) deve ser realizada com cuidado para detectar qualquer dano diferente ao de outros dispositivos de gás.

Essas hipóteses devem ser provadas com um enfoque científico, descartando aquelas que não sejam sustentáveis diante da evidência disponível, até chegar à explicação mais provável da causa do incidente. Entre os aspectos científicos que o investigador deve considerar, enumeramos os seguintes:

1. Mistura estequiométrica: A explosão ou combustão rápida ocorre quando a mistura de gás e ar está perto dos limites baixos de inflamabilidade.

2. Retrocesso da chama: Considera os danos e efeitos causados pelo retrocesso de chama. Esse fenômeno pode indicar que a chama regressa ao ponto de fuga.

3. Efeito de retrocesso: Se a chama não regressa ao ponto de fuga, se deve explicar as razões desse fenômeno.

4. Condições de combustão: Em explosivos de nuvens de vapor (VCE), a combustão pode acontecer em condições laminares, onde a velocidade da chama é baixa e não produz sobrepressão significativa.

5. Turbulência e combustão: A turbulência melhora a velocidade de combustão em deflagrações, o que incrementa a pressão da onda explosiva.

6. Cenários de turbulência.

7. Liberação de gases inflamáveis que resultam num nuvem dispersa explosiva.

8. Interação do fluxo de expansão com obstáculos em áreas congestionadas.

9. Marcas e padrões de chama: Identificar marcas e padrões de chama perto da área da fuga. As rupturas em paredes não são consideradas padrões de chama.

10. Efeitos térmicos: Evidenciar os efeitos térmicos em áreas perto da origem da explosão.

11. Aspectos do combustível:

a. Densidade do gás: Pode ser mais pesado ou leve que o ar.

b. Efeito de dispersão e diluição do gás em ambiente, que pode evitar que a nuvem alcance os limites explosivos.

12. Comportamento da nuvem de vapor: Em fugas de gás a fluxo constante, a nuvem pode subir ou descer de acordo com a densidade; para gases como GNL e GLP, a diluição com ar pode evitar esse comportamento.

13. Densidade de misturas: A densidade de misturas de baixa concentração de propano com ar pode permanecer na área média do compartimento, com a tendência a subir ou descer de acordo com o caudal.

14. Dinâmica de explosão instável: Numa fuga de nuvem de vapor, a dispersão do gás até alcançar o limite baixo de inflamabilidade pode gerar danos concentrados no compartimento.

15. Restrições na liberação: As liberações podem estar restritas por estruturas como lajes de concreto, o que pode causar um fluxo lento.

16. Diluição e desconcentração: Em liberações lentas, é preciso considerar a diluição e desconcentração da mistura de combustível e ar.

17. Energía de ignição: Conhecer a quantidade de energia necessária para acender o combustível e os elementos que podem gerá-la no compartimento.

18. Frente de chama débil: O combustível pode começar a arder de forma laminar pertoda fuga, aumentando a turbulência e gerando a explosão.

19. Cálculos de pressão: Conhecer o caudal de gás escapado para realizar cálculos de pressão incidente, pressão refletida, tempo de chegada, impulso incidente, reflexão do impulso e duração da fase positiva.

Esses aspectos são fundamentais para que o investigador estabeleça uma análise completa e rigorosa que permita determinar a causa da explosão e seus efeitos, assegurando que a investigação seja efetiva e fundamentada.

O que deve tomar em consideração um investigador ao descartar a hipótese de uma explosão?

Depois de identificar a origem, o tipo de combustível e a fonte de ignição, o investigador deve analisar e determinar o que uniu o combustível e a ignição na origem.

Esse processo implica uma análise cuidadosa da provável sequência de ignição e a elaboração de mais de duas hipóteses que relacionem as causas e os efeitos observados na cena.

Na NEFPA 921, edição 2021, Prova de hipótese na literatura científica, seções 19.6.4 e 19.6.4.1, se define como a validação de uma hipótese se sustenta porque todas as variáveis mantiveram uma relação causal, que se manifesta de modo congruente, e se estabelece uma relação causa-efeito diretamente vinculada à causa da explosão com base na literatura científica descrita a seguir como indica a NFPA 921.

No livro de Roberto Sampieri, Metodología de la investigación, edição 2023, se indica que *“A hipótese que estabelece relações causais é o tipo de hipótese que, além de afirmar a relação ou as relações entre duas ou mais variáveis e a forma em que se manifestam, também propõe um ‘sentido de compreensão’ das relações. Tal significado pode ser mais ou menos completo, isso depende da quantidade de variáveis que se incluam, mas sempre estabelecendo uma relação causa-efeito”*.

O que não podemos esquecer ao preparar a análise final?

Existem dois tipos principais de explosões com as que os investigadores se involucram rotineiramente: mecânicas e químicas. No entanto, não se deve descartar as explosões **elétricas y nuclear como parte das suas possíveis causas**. Pro caso de edifícios de tipo habitacional onde a causa da explosão tenha sido classificada como de tipo químico, devido à geração de sobrepressão por reação exotérmica e participação de gás combustível GLP.

As explosões químicas mais comuns são as provocadas pela queima de hidrocarburetos combustíveis. Trata-se de explosões de combustão e se caracterizam frequentemente pela presença de um combustível com ar como oxidante.

Como se classificam os danos estruturais numa cena de explosão?

A comunidade de investigação de incêndios caracteriza os danos por explosão utilizando os termos dano de ordem superior ou dano de ordem inferior. As diferenças nos danos são uma função de carga de explosão aplicada às superfícies e a resistência da estrutura ou recipiente de confinamento ou restrição, ao invés das pressões máximas que são alcançadas.

Recomenda-se essa prática para reduzir a confusão com termos similares utilizados para descrever a liberação de energia dos explosivos.

Como se classificam as explosões químicas?

As explosões químicas também são conhecidas como explosões por combustão e se classificam como deflagrações e detonações, dependendo da velocidade de propagação da frente de chama através da mistura de ar e combustível.

É importante identificar se houve um incêndio prévio à explosão?

Os danos por incêndio ou calor devem ser identificados como causados por um incêndio preexistente ou pelo efeito térmico da explosão.

Ao analisar os padrões presentes numa explosão, o primeiro evento gerado foi a fuga de gás. Essa fuga, misturada com o ar dentro do compartimento, alcançou o limite inferior de inflamabilidade. Como resultado disso, a mistura ar-propano se acendeu e foi produzida uma explosão, gerando uma frente de chama e uma onda de pressão explosiva. A concatenação de eventos determinou que a explosão produziu um frente de chama e não ao contrário. A concatenação de evento pode ser totalmente diferente se o incêndio acontece antes da explosão e mudar todo o formato da investigação.

Quando e por que é importante avaliar o fenômeno da reflexão?

O efeito de reflexão modifica a onda de pressão explosiva. Quando a onda de pressão explosiva encontra objetos no seu caminho, a onda pode se amplificar devido à sua reflexão gerando uma sobrepressão.

Algumas explosões podem ser consideradas muito fortes devido à amplificação da onda de pressão explosiva devida ao efeito de reflexão. Esse efeito é gerado em circunstâncias nas que existem obstáculos ao redor do epicentro.

A onda de reflexão impacta com esses obstáculos e regressa com um efeito de rebote em direção à zona de origem.

Que otros aspectos devem ser considerados ao estudar a cena da explosão?

A onda de pressão de fase positiva afeta os demais andares do edifício, já que a onda de pressão explosiva pode mover-se pelos fossos dos elevadores produzindo vibração de toda a estrutura do edifício.

A análise das vítimas, se a explosão causou vítimas, seja pela exposição ao calor de alta intensidade num curto período de tempo, seja pelo impacto da onda de pressão, é crucial identificar e analisar as lesões e os tipos de queimaduras que sofreram. Isso inclui as feridas causadas tanto pelo incêndio como por força da explosão, já que oferecem informações valiosas para a investigação.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- **Guide for Fire and Explosion Investigations, NFPA 921 ed. 2021, chapter 22, explosions.**
- **National Fuel Gas Code Handbook , NFPA 54, ed.2018, chapter 8, Pressure test.**
- **Methods for the calculation of Physical Effects (yellow book), CPR 14E, Editors: C.J.H. van den Bosch, R.A.P.M. Weterings, third ed. 2005.**
- **Guidelines for Chemical Process Quantitative Risk Analysis, American Institute of Chemical Engineers, second ed., 2000.**

- **Combustion**, from basics to applications, Wiley-vch, Maximilian Lackner, Árpád B. Palotás, and Franz Winter, first ed. , 2013.
- **NTP 321: “Explosions of unconfined vapor clouds: evaluation of overpressure.**
- *Physico-chemical specifications for commercial propane in the Central American Technical Regulation RTCA 75.01.21:19 – Petroleum products liquefied petroleum gases.*
- **Research Methodology**, Roberto Hernández Sampieri, sixth edition, 2018.