



2024

## Avaliação da ação gerada por explosão em ambiente interno

Vinícius Souza da Silva <sup>a</sup>; Andrés Batista Cheung <sup>b</sup>

<sup>a</sup> Aluno de Graduação em Engenharia Civil, [souza\\_vinicius@ufms.br](mailto:souza_vinicius@ufms.br)

<sup>b</sup> Professor Orientador, Doutor, [andres.cheung@ufms.br](mailto:andres.cheung@ufms.br)

Faculdade de Engenharias, Arquitetura e Urbanismo e Geografia. Universidade Federal de Mato Grosso do Sul. Av. Costa e Silva, s/nº | Bairro Universitário | 79070-900 | Campo Grande, MS, Brasil.

### RESUMO

Explosões internas em ambientes confinados ou parcialmente confinados geram ondas de choque que exercem pressões elevadas sobre os elementos estruturais das edificações, comprometendo sua estabilidade e podendo causar falhas localizadas ou até colapsos progressivos. Esses efeitos variam de intensidade dependendo da configuração do ambiente, da quantidade de gás acumulado, da presença de componentes de alívio de pressão e de outras características específicas. Compreender como esses fatores influenciam a propagação da onda de choque é essencial para o dimensionamento seguro de estruturas submetidas a essas ações, classificadas como excepcionais pela NBR 8681:2003. No contexto da engenharia estrutural, as análises dessas explosões podem ser realizadas por critérios de riscos, utilizando metodologias que considerem os fatores dinâmicos, as propriedades dos gases combustíveis e os materiais presentes no ambiente. Neste trabalho, o objetivo principal foi comparar duas metodologias para avaliar as pressões geradas por explosões internas em edificações residenciais, utilizando a norma EN 1991-1-7:2006 e o método Shock Wave (TNO). A pesquisa também explorou conceitos como limites de inflamabilidade, energia de combustão, variações de sobrepressão em função da distância e tempo de duração, bem como informações relevantes para o entendimento do assunto do fenômeno explosivo.

**Palavras-chave:** explosões internas, pressão, propriedades dos gases, método EN 1991-1-7:2006, método Shock Wave (TNO).

### ABSTRACT

Internal explosions in confined or partially confined environments generate shock waves that exert high pressures on the structural elements of buildings, compromising their stability and potentially causing localized failures or even progressive collapses. These effects vary in intensity depending on the configuration of the environment, the amount of accumulated gas, the presence of pressure relief components, and other specific characteristics. Understanding how these factors influence the propagation of the shock wave is essential for the safe design of structures subjected to these actions, classified as exceptional by NBR 8681:2003. In the context of structural engineering, analyses of these explosions can be performed using risk criteria, using methodologies that consider dynamic factors, the properties of combustible gases, and the materials present in the environment. The main objective of this study was to compare two methodologies to evaluate the pressures generated by internal explosions in residential buildings, using the EN 1991-1-7:2006 standard and the Shock Wave (TNO) method. The research also explored concepts such as flammability limits, combustion energy, variations in overpressure as a function of distance and duration, as well as information relevant to understanding the subject of explosive phenomena.

**Keywords:** internal explosions, pressure, gas properties, EN 1991-1-7:2006 method, Shock Wave (TNO) method.

## 1. INTRODUÇÃO

Na engenharia, o gerenciamento de riscos é uma etapa essencial na avaliação de ações de carregamento, sendo fundamental para o dimensionamento de estruturas e a implementação de medidas complementares de mitigação dos efeitos causados. É necessário admitir que os fundos para equilibrar os

custos associados à redução de riscos com os benefícios proporcionados, considerando critérios de desempenho baseados em estados limites, são geralmente restritos, em sua maioria acabam por serem tomados como riscos conscientemente aceitos. Assim, quando ultrapassados, esses critérios podem representar riscos indesejáveis, seja para a segurança das pessoas, seja para perdas econômicas. Explosões, por exemplo, exigem uma análise probabilística de

ocorrência, e, dependendo de sua intensidade, podem causar danos graves ao entorno (HINGORANI, 2007).

As explosões em ambientes internos representam um risco significativo para a estabilidade das construções assim como para a segurança das pessoas presentes no local. Este tipo de situação pode ocorrer tanto por acidentes como vazamentos de gás em prédios residenciais ou industriais quanto por ações intencionais. Segundo Bjerketvedt et al. (1997), a rápida liberação de energia durante uma explosão provoca ondas de choque que se propagam pelo ambiente, causando pressões adicionais nos elementos estruturais.

De acordo com Kinney e Graham (1985), as explosões em espaços sem áreas de aberturas para o meio externo, produzem ondas de impacto que são intensificadas devido à reflexão nas superfícies circundantes e resultam em danos mais significativos às estruturas internas. As aberturas em uma edificação - como portas e janelas - têm uma função importante na liberação de energia acumulada durante um impacto explosivo (válvulas). Por exemplo, se houver várias aberturas disponíveis, a pressão resultante pode escapar mais facilmente, reduzindo o dano geral à estrutura. Por outro lado, em espaços mais confinados, a onda de choque pode-se intensificar, resultando em danos mais severos.

Para compreender como o comportamento dos gases combustíveis e as aberturas influenciam na atmosfera explosiva no ambiente, é essencial avaliar os efeitos dinâmicos dessas variáveis. Embora ferramentas de simulação, como o Ansys, OpenFOAM ou demais softwares apresentados na Tabela 1 e listados por MORTAR et al. (2017), sejam frequentemente utilizadas para modelar cenários de explosão e analisar as interações entre ondas de choque e estruturas, neste trabalho optou-se por uma abordagem simplificada com base na revisão bibliográfica.

Por meio da análise de estudos existentes, será possível compreender o comportamento das ondas de choque e o seu impacto nos elementos construtivos das edificações submetidas a explosões internas, considerando variáveis como a configuração das aberturas, o volume do ambiente e as condições de deflagração do gás GLP de composição de butano.

O objetivo deste trabalho é apresentar uma análise comparativa utilizando duas metodologias para avaliação de pressões geradas por explosões internas. Para isso serão utilizados os procedimentos da norma EN 1991-1-7:2006 e o método *Shock Wave* (TNO).

Tabela 1 – Lista de programas para análise de explosão

| Software      | Autor/Desenvolvedor                                       |
|---------------|---|
| LS-DYNA       | Livermore Software Technology Corporation (LSTC)          |
| BLASTX        | SAIC  |
| CTH           | Sandia National Laboratories                              |
| FEFLO         | SAIC  |
| FOIL          | Applied Research Associates, Waterways Experiment Station |
| SHARC         | Applied Research Associates, Inc                          |
| DYNA3D        | Lawrence Livermore National Laboratory (LLNL)             |
| ALE3D         | Lawrence Livermore National Laboratory (LLNL)             |
| Air3D         | Royal Military of Science College, Cranfield University   |
| CONWEP        | US Army Waterways Experiment Station                      |
| ANSYS AUTODYN | Century Dynamics  |
| ABAQUS        | ABAQUS Inc.   |
| OpenFOAM      | OpenCFD Ltd   |

Fonte: Adaptado de Mortar et al. (2017).

## 2. FUNDAMENTOS TEÓRICOS

### 2.1 CASOS HISTÓRICOS DE EXPLOSÕES

Em 1968, no edifício Ronan Point, localizado na cidade de Londres, Inglaterra, uma explosão causada por vazamento de gás resultou em um colapso progressivo. Segundo a perícia e relatada pela reportagem do The Guardian (2018), a fonte de ignição foi a chama de um fósforo, que estava em uma cozinha de um apartamento no 18º andar. A explosão causou o desabamento de uma laje superior sobre a inferior, afetando os pilares e vigas que suportavam as cargas da edificação como mostra a Figura 1. O incidente, que deixou quatro mortos e 17 feridos, tornou-se um marco na conscientização dos engenheiros sobre o colapso progressivo, levando à revisão de códigos e regulamentos de construção no Reino Unido.

Figura 1 – Colapso do edifício Ronan Point.



Fonte: McGrath/The Observer (The Guardian, 2018).

No Brasil, um caso semelhante ocorreu em novembro de 2024 em Maceió-AL, quando uma explosão decorrida do vazamento de gás e armazenamento incorreto de botijões provocou o colapso total da edificação em um prédio residencial, conforme representada na Figura 2, formado por piso térreo e um andar, tendo quatro apartamentos em cada pavimento no estilo duplex, resultando em vítimas fatais e feridos. Esse episódio evidencia a relevância de adotar medidas preventivas e reforçar regulamentações de segurança estrutural e boas práticas de engenharia construtiva.

Figura 2 – Colapso de Prédio Residencial em Maceió após explosão de gás.



Fonte: G1 Alagoas (2024).

O caso ocorrido em Maceió-AL e registrado pelo G1 Alagoas, ilustra o potencial devastador de explosões envolvendo vazamentos de gás, capazes de gerar ondas de choque de alta intensidade. No exemplo específico, um duplex de 45 m<sup>2</sup> com dois quartos, sala, cozinha e banheiro foi completamente destruído. Este cenário evidencia como as ondas de choque interagem com o ambiente, sobrecarregando elementos construtivos e ocasionando o colapso.

## 2.2 FUNDAMENTOS DO ESTUDO DAS EXPLOSÕES

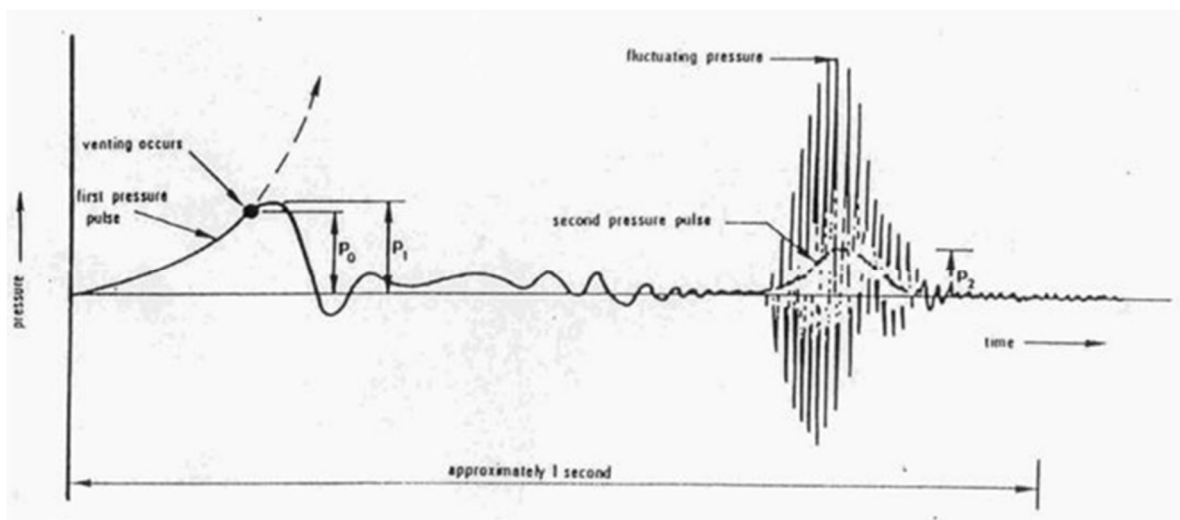
Para efeito de ocorrência de uma explosão química a gás é necessário que haja a presença simultânea de um material inflamável (combustível), oxigênio e fonte de ignição – chamas, centelhas, faísca, etc. – presentes em um ambiente que em sua combinação ocorre a deflagração, isto é, uma reação de combustão que ocorre de forma relativamente lenta fazendo com que a temperatura e pressão aumentem, onde é possível haver diferentes variações de intensidade e velocidade de propagação da onda de pressão, que provocam o efeito de ondas de choque (BJERKETVEDT et al., 1997).

De acordo com Garrison (1988), citado por Bjerketvedt et al. (1997), uma análise realizada sobre os cem maiores acidentes ocorridos na indústria de hidrocarbonetos entre 1957 e 1986 revelou que o tipo mais frequente de incidente foi a explosão de nuvem de vapor, representando 42% dos casos.

### 2.2.1 DEFLAGRAÇÕES E DETONAÇÕES

O ponto que se dá origem a deflagração da explosão é denominado como epicentro e a tendência é a diminuição da intensidade da explosão conforme o relativo distanciamento ao epicentro da explosão. Para entender isto, é necessário avaliar a forma como ocorre as pressões geradas por uma explosão. Assim, pode-se dividir as pressões em sobrepressão e sucção, que dão origem as ondas de choque que se propagam pelo ar, transportando energia que podem causar danos as estruturas da edificação ou as barreiras que encontrem em sua trajetória de distribuição no ambiente.

Figura 3 – Relação entre pressão x tempo característica de uma explosão por deflagração.



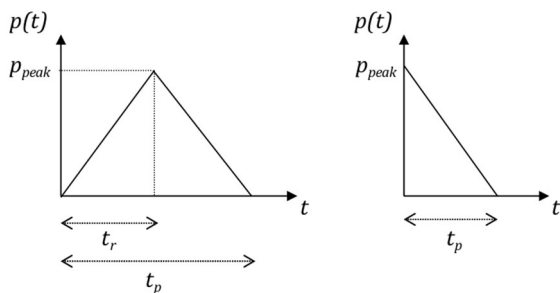
Fonte: Dragosavic (1973).

Conforme observado na figura 3, após uma explosão, a fase positiva de duração é o período em que a pressão no local da explosão está acima da pressão atmosférica. Durante esse tempo, a pressão atinge o pico e começa a diminuir, expondo as estruturas a forças significativas. O tempo negativo ocorre logo em seguida, quando a pressão cai abaixo da atmosférica, gerando uma sucção. Embora menos intensa, essa fase pode ainda influenciar nos danos estruturais, como falhas e fissuras. No entanto, a sucção será considerada de magnitude insignificante, assim como em outras literaturas.

É destacado por Dragosavic (1973) e observado na Figura 3, um segundo aumento de pressão que surge posteriormente, sendo associado à pós-combustão turbulenta de gases residuais. Essa combustão ocorre porque nem todo o gás é consumido no primeiro momento, e as turbulências criadas pela explosão inicial intensificam o contato do combustível restante com o oxigênio, gerando uma nova liberação de energia. Desde o início da explosão até a estabilização resultou em um tempo estimado de 1 segundo, sendo cerca de meio segundo um período de baixa pressão relativamente longo.

A Figura 4 apresenta uma comparação simplificada entre as curvas de pressão em função do tempo para dois tipos de explosões: a deflagração, onde a frente de chama se propaga em velocidade subsônica em relação ao gás não queimado, e a detonação, que ocorre com uma frente de chama supersônica. Essa distinção é fundamental para compreender as diferenças nos efeitos gerados por cada fenômeno, especialmente quando o primeiro está associado a explosão a gás e o segundo a explosivos, conforme discutido por Bjerketvedt et al. (1997).

Figura 4 – Simplificação da curva de sobrepressão em relação ao tempo.



Fonte: Schmidt (2003).

De acordo com Hingorani (2017) apud Schmidt (2003), o comportamento da pressão gerada por explosões pode ser representado por um pulso triangular simétrico, onde o tempo de subida ( $t_r$ ) é metade do tempo total do pulso ( $t_p$ ), ou seja,  $t_r = t_p/2$ .

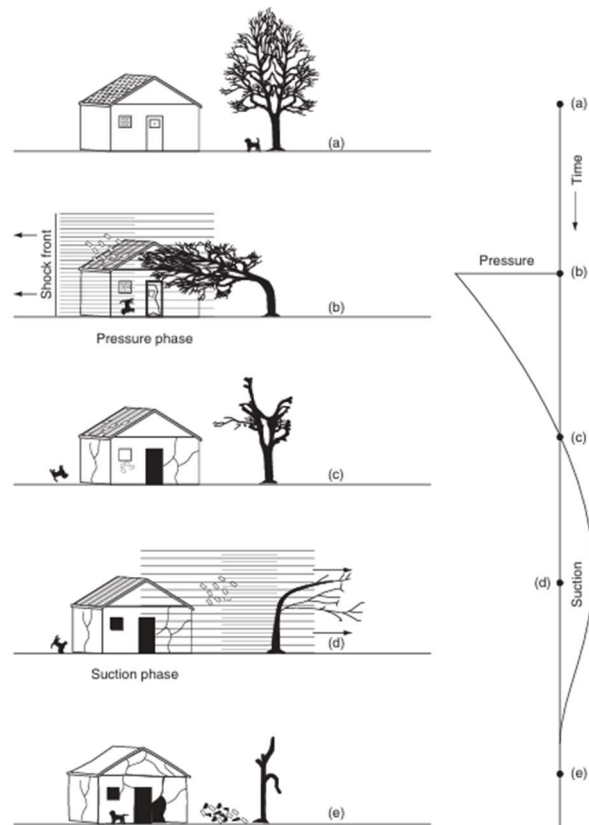
Já Beshara (1994), citando as recomendações de Bela (1990), destaca que o tempo total do pulso ( $t_p$ ) aumenta proporcionalmente ao volume ( $V$ ) do ambiente. As seguintes relações são indicadas:

- Para  $V \leq 100 \text{ m}^3$ :  $t_p = 0,2 \text{ a } 0,3 \text{ s}$
- Para  $100 < V \leq 1000 \text{ m}^3$ :  $t_p = 0,4 \text{ a } 0,5 \text{ s}$
- Para  $V > 1000 \text{ m}^3$ :  $t_p = 0,6 \text{ a } 0,8 \text{ s}$

Para as detonações, devido à alta densidade dos explosivos sólidos em relação às misturas gasosas, o volume necessário para cargas equivalentes é significativamente menor. Isso permite que os explosivos sólidos sejam tratados como cargas concentradas, resultando na formação de ondas de pressão esféricas no ar, conforme apontado por Silva (2007). Essas ondas de pressão são intensas e se propagam rapidamente a partir do ponto de origem, causando danos significativos às estruturas e ao ambiente ao redor.

A Figura 5, ilustra as etapas de uma explosão externa, decorrente de detonação, e seus impactos em edificações e elementos circundantes. No gráfico adjacente, o comportamento da sobrepressão ao longo do tempo é descrito, apresentando um pico abrupto seguido por uma queda, representando a fase de sucção.

Figura 5 – Fases de pressão em explosões externas.



Fonte: Smith e Cormie et al. (2009).

## 2.3 EXPLOSÕES EM AMBIENTES INTERNOS

Os gases confinados ou parcialmente confinados em ambientes internos possuem características físicas e dinâmicas que exercem grande influência em eventos como explosões internas. Quando submetidos a variações de pressão, volume ou temperatura, esses gases seguem as leis fundamentais da termodinâmica e da mecânica dos fluidos, como as leis de Boyle-Mariotte, Charles e Gay-Lussac, que culminam na equação de Clapeyron, expressa como:

$$P.V = n.R.T$$

Essa equação relaciona pressão (P), volume (V), número de mols (n), constante universal dos gases (R) e temperatura absoluta (T), descrevendo o comportamento de um gás ideal. Essas propriedades permitem compreender e realizar estimativas de fenômenos como compressibilidade, expansão e interação dos gases com as superfícies do ambiente, fornecendo bases para análises de eventos dinâmicos, como explosões.

Segundo Bjerketvedt et al. (1997), em ambiente totalmente confinado a formação de nuvem de ar-combustível de hidrocarboneto pode resultar em pressões de até cerca de 800 kN/m<sup>2</sup>. Para ambientes parcialmente confinados existem componentes que favorecem o alívio de pressão das ondas de choque provocadas por explosões, o que diminui os efeitos sobre os elementos construtivos.

### 2.3.1 COMPONENTES DE ALÍVIO DE PRESSÃO

Ambientes confinados ou parcialmente confinados apresentam dinâmicas específicas durante explosões, influenciadas por fatores como a presença de componentes de alívios de pressão. Os componentes atuam na redução das sobrepressões ao permitir a saída de gases quentes da combustão e, em alguns casos, dos reagentes, diminuindo a turbulência e os efeitos da expansão dos produtos (BJERKETVEDT et al., 1997). A eficiência dos componentes depende de sua área, localização e capacidade de direcionar o escoamento para longe de obstáculos. Esses mecanismos de alívios podem ser compostos por janelas, portas, paredes divisórias leves e paredes de alvenaria, como apresentados na Tabela 2. A tendência é que, quanto maiores forem, maior será a redução do grau de confinamento e, conseqüentemente, as sobrepressões (HARRIS RJ, 1983).

Tabela 2 - pressões de falhas típicas de componentes de alívio de pressão.

| Elemento                        | Pressão de falha típica (kN/m <sup>2</sup> ) |
|---------------------------------|--|
| Janela de vidro                 | 2 à 7  |
| Portas                          | 2 à 3  |
| Paredes divisórias leves        | 2 à 5  |
| Paredes de blocos breeze (50mm) | 4 à 5  |
| Parede de alvenaria             | 7 à 15                                       |

Fonte: Harris RJ (1983).

## 2.4 COMBUSTÃO COMPLETA E INCOMPLETA

A combustão é uma reação química exotérmica entre um combustível e um comburente (geralmente o oxigênio), que libera energia na forma de calor. Dependendo da disponibilidade de oxigênio, a combustão pode ser classificada como completa ou incompleta. Fogaça (s.d.) apresenta a diferença entre os tipos de combustão, resumidas na Tabela 4.

A combustão completa ocorre quando há uma quantidade suficiente de oxigênio para oxidar completamente o combustível, produzindo produtos mais estáveis, a chama é geralmente azulada, devido à completa oxidação do carbono e traz um menor impacto ambiental, pois o principal produto gasoso é o dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), que não contém partículas tóxicas ou fuligem. A Tabela 3 apresenta os balanços estequiométricos dos principais hidrocarbonetos.

Tabela 3 – Estequiometria de combustão completa dos hidrocarbonetos.

| Hidrocarboneto | Fórmula Química                | Reação de Combustão Completa   | Nº de mols de O <sub>2</sub> |
|----------------|--------------------------------|--|------------------------------|
| Metano         | CH <sub>4</sub>                | CH <sub>4</sub> + 2O <sub>2</sub> → CO <sub>2</sub> + 2H <sub>2</sub> O                    | 2                            |
| Etano          | C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>  | C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> + 3,5O <sub>2</sub> → 2CO <sub>2</sub> + 3H <sub>2</sub> O   | 3,5                          |
| Propano        | C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>  | C <sub>3</sub> H <sub>8</sub> + 5O <sub>2</sub> → 3CO <sub>2</sub> + 4H <sub>2</sub> O     | 5                            |
| Butano         | C <sub>4</sub> H <sub>10</sub> | C <sub>4</sub> H <sub>10</sub> + 6,5O <sub>2</sub> → 4CO <sub>2</sub> + 5H <sub>2</sub> O  | 6,5                          |
| Pentano        | C <sub>5</sub> H <sub>12</sub> | C <sub>5</sub> H <sub>12</sub> + 8O <sub>2</sub> → 5CO <sub>2</sub> + 6H <sub>2</sub> O    | 8                            |
| Hexano         | C <sub>6</sub> H <sub>14</sub> | C <sub>6</sub> H <sub>14</sub> + 9,5O <sub>2</sub> → 6CO <sub>2</sub> + 7H <sub>2</sub> O  | 9,5                          |
| Heptano        | C <sub>7</sub> H <sub>16</sub> | C <sub>7</sub> H <sub>16</sub> + 11O <sub>2</sub> → 7CO <sub>2</sub> + 8H <sub>2</sub> O   | 11                           |
| Octano         | C <sub>8</sub> H <sub>18</sub> | C <sub>8</sub> H <sub>18</sub> + 12,5O <sub>2</sub> → 8CO <sub>2</sub> + 9H <sub>2</sub> O | 12,5                         |

Fonte: Autor.

A combustão incompleta ocorre quando há insuficiência de oxigênio para oxidar completamente o combustível. Esta reação pode formar um gás tóxico e inflamável, pois parte da energia química do combustível permanece nos produtos parcialmente oxidados, produz chama amarelada ou alaranjada.

Tabela 4 – Diferenças entre os tipos de combustão.

| Combustão hidrocarbonetos         |                                    |                                 |
|-----------------------------------|------------------------------------|---------------------------------|
| Aspecto                           | Completa                           | Incompleta                      |
| Disponibilidade de O <sub>2</sub> | Quantidade suficiente              | Quantidade insuficiente         |
| Produtos                          | CO <sub>2</sub> e H <sub>2</sub> O | CO, (fuligem), H <sub>2</sub> O |
| Eficiência Energética             | Alta                               | Baixa                           |
| Impacto Ambiental                 | Menor (apenas CO <sub>2</sub> )    | Maior (CO e partículas tóxicas) |
| Cor da Chama                      | Azulada                            | Amarelada ou alaranjada         |

Fonte: Autor.

## 2.5 NORMAS SOBRE ESTUDOS E PREVENÇÕES DE EXPLOSÕES

As normas brasileiras existentes com foco em explosões visam o gerenciamento de riscos por meio de implementação de sistemas e prevenções que eliminem e/ou amenizem os efeitos da formação de atmosferas explosivas, como é o caso da ABNT NBR 15662:2009. Para tanto, foi desenvolvido o Programa de Gerenciamento de Riscos de Explosão – PGRE, que segundo a norma, possui foco em projetos industriais e/ou comerciais e para instalações existentes que contenham risco de explosão. Esta norma possui como referência a ABNT NBR ISO 6184:2007 e suas partições que norteiam a conjuntura do objetivo em questão. Em específico a este estudo, a Parte 2 da NBR ISO 6184:2007, auxilia na determinação dos índices de explosão dos gases combustíveis no ar, que permite o desenvolvimento de projetos que possam fornecer condições de construção e operação de uma instalação capaz de ser um sistema de proteção contra explosões.

Enquanto, que de acordo com a EN 1991-1-7:2006 (*Eurocode 1 Part 7*), durante a concepção de edifícios ou estruturas civis, além de locais de armazenamento ou transporte de produtos inflamáveis como gases e líquidos, as explosões devem ser levadas em consideração quanto ao impacto que podem vir a causar devido as ondas de choque. De acordo com a EN 1990, 2.1 (4)P:2002, norteia que os projetos devem ser elaborados para serem capazes de resistir ao colapso, até mesmo permitindo a ruptura de parte da edificação, porém, que os elementos estruturais principais permaneçam resistentes aos limites máximos de carga ou deformação.

Em situações em que a explosão é de escala pequena e o edifício não foi projetado para suportar os impactos, a capacidade de resistência da estrutura varia conforme o tipo de material utilizado. Segundo Bangash e Bangash (2006), estruturas metálicas devido à sua resistência equivalente a esforços de tração e compressão, têm uma melhor capacidade em absorver os impactos de uma explosão e redistribuir as cargas diminuindo as condições de colapso

imediatamente da estrutura. Enquanto sistemas estruturais em concreto armado nas condições citadas anteriormente apresentam vulnerabilidades em explosões, especialmente quando a direção dos impactos não é previsível, sendo a resistência a compressão resistida pelo concreto e a tração resistida pela armadura.

Para projetos estruturais que consideram a resistência a explosões, o concreto armado se destaca em relação a estruturas metálicas por sua massa elevada e capacidade de absorver energia, proporcionando melhor amortecimento das ondas de choque.

## 2.6 MATERIAL GASOSO COM TEOR EXPLOSIVO - GLP

O Gás Liquefeito de Petróleo (GLP) é um combustível amplamente utilizado devido à sua versatilidade e eficiência energética. De acordo com o Manual Técnico da Petrobras sobre GLP (2022), este produto pode ser comercializado em botijões com capacidades de peso de produto liquefeito entre 2 kg e 90 kg, atendendo aplicações residenciais (normalmente utilizado de 7 (P-7), 8 (P-8) e 13 kg (P13)), industriais e comerciais, incluindo cozinhas, empilhadeiras e sistemas de combustão, assim como apresentado na Tabela 5. Sua composição química consiste em proporções variáveis de propano/propeno e butanos/butenos, com até 2% de hidrocarbonetos mais pesados.

Tabela 5 –Tipos de embalagens de GLP.

| Embalagem | Capacidade (kg) | Aplicação            |
|-----------|-----------------|----------------------|
| P-2       | 2               | Camping e ambulantes |
| P-5       | 5               | Camping e ambulantes |
| P-7       | 7               | Uso Residencial      |
| P-8       | 8               | Uso Residencial      |
| P-13      | 13              | Uso Residencial      |
| P-20      | 20              | Empilhadeiras        |
| P-45      | 45              | Condomínios          |
| P-90      | 90              | Restaurantes         |

Fonte: Petrobras (2022).

Segundo os requisitos de qualidade e especificação do Manual Técnico, o GLP apresenta características de ser facilmente liquefeito sob pressão, permitindo o armazenamento em estado líquido e facilitando a vaporização em condições ambientes, o que melhora a combustão. Durante o processo, a queima ocorre de forma limpa, sem fuligem ou resíduos, sendo não poluente, não corrosivo e com elevado poder calorífico, características exigidas pela ANP (Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis).

Entretanto, seu manuseio requer cuidados devido ao risco de vazamentos e inflamabilidade. Como é mais pesado que o ar, o GLP tende a se acumular na região inferior do ambiente em caso de escape, com alto risco de ignição em concentrações específicas. Para permitir a identificação em casos de vazamento, é adicionado um odorante, geralmente o etil-mercaptan ( $C_2H_5SH$ ), que é um composto à base de enxofre. Essa adição garante que mesmo pequenas concentrações do gás no ambiente sejam perceptíveis por meio do olfato, aumentando a segurança no uso doméstico e industrial.

Por ser uma fonte energética concentrada, o GLP é regulado rigorosamente para atender às normas de segurança. Em áreas residenciais e comerciais, ele é vital para o cozimento de alimentos e outros usos diários. Já em ambientes industriais, é utilizado em sistemas de tratamento térmico e galvanização, além de máquinas como empilhadeiras, mostrando sua ampla aplicabilidade e relevância no setor energético.

## 2.7 LIMITE DE INFLAMABILIDADE INFERIOR, SUPERIOR E PONTO DE COMBUSTÃO COMPLETA

Os limites de inflamabilidade são uma das características mais importantes para o entendimento de combustões em misturas de combustível e ar. Essas misturas só serão inflamáveis enquanto a concentração do combustível estiver entre os limites inferior e superior de inflamabilidade (LII e LIS, respectivamente). O limite inferior de inflamabilidade (LII) é a menor concentração de combustível na mistura que pode sustentar a combustão, enquanto o limite superior de inflamabilidade (LIS) é a maior concentração de combustível que ainda permite que a combustão ocorra. Esses valores são determinados experimentalmente e dependem de fatores como a pressão e a temperatura iniciais da mistura (BJERKETVEDT, 1992).

O Manual Técnico da Petrobras também cita estas condições dos limites de inflamabilidade sugerindo, por exemplo, que para o propano puro, o limite de inflamabilidade está entre 2,1% e 9,5%, enquanto para o butano, varia de 1,8% a 8,4%. Nessas condições, a presença de uma fonte de ignição pode iniciar a combustão. No entanto, outras literaturas acabam por fornecer dados que variam relativamente entre si.

A Tabela 6 fornece uma visão geral dos limites de inflamabilidades superior e inferior e apresenta entre parênteses a concentração estequiométrica dos gases com o ar, isto é, uma condição ideal de percentual de combustível em relação ao ar necessário para que

ocorra combustão completa de determinado gás, queimando-o por completo, além disso, é destacada a Temperatura de Autoignição, que representa a menor temperatura na qual o gás se inflama espontaneamente, sem a necessidade de uma fonte externa de ignição. Outro parâmetro relevante é a Velocidade Máxima de Combustão Laminar, que mede a rapidez com que a chama se propaga em uma mistura estequiométrica. Por fim, a Tabela 6 inclui o Calor de Combustão, que quantifica a energia liberada durante a combustão completa do gás.

Tabela 6 - Propriedades de inflamabilidade e combustão de gases e vapores combustíveis.

| gas or vapour | flammability limits <sup>1)</sup><br>(vol.%) | auto-ignition temperature<br>(C) | maximum laminar burning velocity<br>(m/s) | heat of combustion <sup>2)</sup><br>(MJ/m <sup>3</sup> ) |
|---------------|--|----------------------------------|---|--|
| methane       | 5.0-( 9.5)-15.0                              | 595                              | 0.448                                     | 3.23   |
| ethane        | 3.0-( 5.6)-15.5                              | 515                              | 0.476                                     | 3.39   |
| propane       | 2.1-( 4.0)- 9.5                              | 470                              | 0.464                                     | 3.46   |
| ethene        | 2.8-( 6.5)-28.6                              | 425                              | 0.735                                     | 3.64   |
| butane        | 1.3-( 3.1)- 8.5                              | 365                              | 0.449                                     | 3.48   |
| propene       | 2.0-( 4.4)-11.0                              | 455                              | 0.512                                     | 3.59   |
| hydrogen      | 4.0-(29.5)-75.6                              | 560                              | 3.25                                      | 3.01   |
| cyclohexane   | 1.2-( 2.3)- 8.3                              | 260                              | 0.440                                     | 3.85   |

Fonte: Mercx e Van Den Berg.

A Base de Dados de Substâncias GESTIS do IFA propõe valores alternativos para representar os limites de inflamabilidade ou explosão de diferentes substâncias. Para o metano, n-propano e butano, os intervalos inferior e superior estão, respectivamente, nos seguintes valores:

- Metano: 4,4% a 17%;
- n-Propano: 1,7% a 10,8%;
- Butano: 1,4% a 9,4%.

Além disso, são fornecidos os valores de massa por volume correspondentes a esses percentuais para o metano e butano:

- Metano: 29 g/m<sup>3</sup> (limite inferior) e 113 g/m<sup>3</sup> (limite superior);
- Butano: 33 g/m<sup>3</sup> (limite inferior) e 231 g/m<sup>3</sup> (limite superior),

Para o n-propano, esses dados de massa por volume não são fornecidos.

Para calcular a massa mínima e máxima de gás necessária para formar uma mistura explosiva com o ar nos limites de inflamabilidade (LII e LIS) foi seguida pelas proposições apresentadas no livro *Princípios de Combustão Aplicada*, de Carvalho Jr. e McQuay (2007). As equações apresentadas a seguir foram desenvolvidas com base nas proposições do livro, com adaptações realizadas pelo autor deste trabalho em função de variáveis específicas. Essas

adaptações visam adequar as formulações ao contexto analisado e facilitar o entendimento do tema, preservando, entretanto, a precisão e os resultados originais.

a) cálculo do número de mols de ar ( $x$ ) presente na mistura:

$$LI = \frac{1 \cdot c_{(\%)}}{0,5 + x} \quad (1)$$

$LI$  é o limite de inflamabilidade (Inferior, superior ou de combustão completa) do combustível (%);

$c_{(\%)}$  é o percentual de molaridade do gás combustível presente no balanço estequiométrico (%);

b) O número total de mols da mistura gás-ar dos limites de inflamabilidade ( $n'_{LI}$ ) é calculado:

$$n'_{LI} = c_{(\%)} + x \quad (2)$$

A depender da situação avaliada,  $n'_{LI}$  pode ser calculado como limite de inflamabilidade inferior ( $n'_{LII}$ ) ou superior ( $n'_{LIS}$ ) ou ponto de inflamabilidade de combustão completa ( $n'_{PICC}$ )

c) Equação do número de mols da mistura em 1 m<sup>3</sup> de gás ( $n''$ ):

$$n'' = \frac{V_u \cdot T_{0^\circ C}}{V \cdot T_{amb}} \quad (3)$$

$V_u$  é o volume unitário de gás combustível ocupado no ambiente (dm<sup>3</sup>);

$T_{0^\circ C}$  é a temperatura à 0°C (K);

$V$  é o volume molar de um gás perfeito (dm<sup>3</sup>);

$T_{amb}$  é a temperatura ambiente no momento da reação.

d) Equação do número de mols do gás combustível em 1 m<sup>3</sup> de gás:

$$n = c_{(\%)} \cdot \frac{n''}{n'_{LI}} \quad (4)$$

e) Equação da massa de gás combustível necessária para formar uma mistura explosiva com o ar nos limites de inflamabilidade em um volume de 1 m<sup>3</sup>:

$$m' = n \cdot M \quad (5)$$

$M$  é a massa Molar do gás combustível (g/mol).

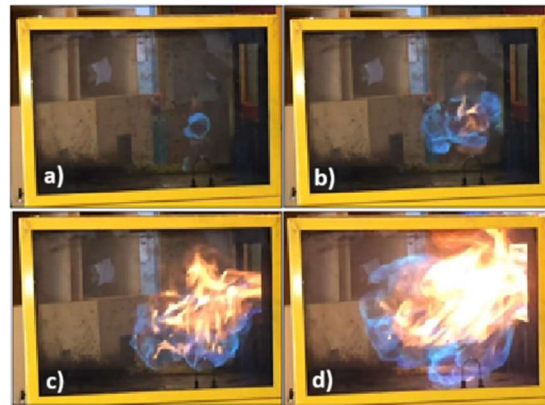
f) Massa de gás combustível total necessária para formar uma mistura inflamável com ar dentro dos limites de inflamabilidade:

$$m = V_{amb} \cdot m' \quad (6)$$

$V_{amb}$  é o volume do ambiente (m<sup>3</sup>).

O ponto de inflamabilidade para combustão completa é a condição específica, dentro do intervalo entre os limites inferior e superior de inflamabilidade, em que a proporção de combustível e comburente está perfeitamente balanceada para que toda a massa do combustível seja convertida em produtos de combustão, como dióxido de carbono e vapor d'água, sem a formação significativa de subprodutos como monóxido de carbono ou fuligem. Estes valores podem ser encontrados entre parênteses na Tabela 6 e posteriormente serão utilizados para calcular as condições de massa necessária para formar uma atmosfera explosiva.

Figura 6 - Propagação da frente de chama em mistura de gás e ar em ambiente confinado.



Fonte: Lambert (2016).

As análises do experimento representados na Figura 6 por Lambert (2016), serão feitas a seguir. A primeira imagem (a), é possível observar o instante inicial da ignição da mistura gasosa. Nesse momento, ocorre a formação de uma frente de chama que se propaga em todas as direções de forma aproximadamente esférica, já que a mistura de gás e ar está homogênea. Essa reação é exotérmica, liberando energia térmica que gera gases quentes em expansão.

Na segunda imagem (b), percebe-se um aumento significativo no volume das chamas, o que ocorre devido à rápida combustão da mistura. Durante o processo, os produtos da combustão (como dióxido de carbono e vapor d'água) ocupam um volume maior do que os reagentes iniciais, devido ao aumento da temperatura e à liberação de energia. Esse comportamento reflete a natureza altamente dinâmica das reações de combustão, especialmente em ambientes confinados.

Fatores como a composição da mistura combustível (proporção entre o gás e o ar), as condições de



confinamento e a homogeneidade da mistura influenciam diretamente a propagação da chama. Em ambientes confinados, o aumento da pressão local pode intensificar a reação, tornando-a mais violenta e aumentando os riscos de explosões (LAMBERT, 2016).

As imagens que se sucedem ilustram a sequência final do processo iniciado. Na imagem (c), observa-se a chama se expandindo e propagando ainda mais longe, abrangendo uma área maior do volume de gás confinado. A imagem (d) mostra o estágio avançado da propagação da chama, com o aumento significativo do volume e da intensidade das chamas. Este fenômeno ocorre porque a mistura de gás e ar permanece dentro dos limites de inflamabilidade, permitindo a continuidade da reação. À medida que a frente de chama se propaga, o calor liberado aquece a mistura adjacente, promovendo novas ignições e mantendo a expansão até consumir completamente o combustível disponível no volume confinado (LAMBERT, 2016).

Esse tipo de experimento tem aplicações práticas importantes, sendo importante para avaliar os riscos associados a explosões em ambientes confinados. Portanto, o experimento demonstra, de maneira visual, a dinâmica da combustão em uma mistura inflamável, fornecendo informações para a compreensão dos processos de propagação de chamas e seus impactos em aplicações em segurança e pesquisas.

## 2.7 PARÂMETROS DE EXPLOSÕES EM AMBIENTES INTERNOS

De acordo com a norma EN 1991-1-7:2006, a pressão estática equivalente nominal gerada por uma explosão de gás natural em ambientes internos pode ser determinada pelas seguintes expressões, conforme aplicável:

Expressões para determinação da pressão:

A pressão dinâmica  $p_{eq}$  é calculada com base nas equações:

$$p_{eq} = 3 + p_{est} \quad (7)$$

Outro critério adotado:

$$p_{eq} = 3 + \frac{p_{est}}{2} + \frac{0,04}{\left(\frac{A_v}{V}\right)^2} \quad (8)$$

O maior valor de  $p_{eq}$  deve ser utilizado para o dimensionamento.

Definições de Parâmetros:

Os parâmetros necessários para os cálculos são:

$p_{est}$  é a pressão estática uniformemente distribuída em que os componentes de ventilação falham (kN/m<sup>2</sup>);

$A_v$  é a área dos componentes de ventilação (m<sup>2</sup>);

$V$  é o volume do ambiente (m<sup>3</sup>).

As expressões são válidas para ambientes com volume total até 1.000 m<sup>3</sup>.

Condições Adicionais:

A relação entre a área dos componentes de ventilação e o volume do recinto deve atender:

$$0,05 \leq A_v/V \leq 0,15 \quad (1/m)$$

Caso múltiplos componentes de construção contribuam para a ventilação, deve-se utilizar o maior valor de  $p_{est}$ . Além disso, nenhum valor de pressão dinâmica superior a 50 kN/m<sup>2</sup> precisa ser considerado para o dimensionamento.

A EN 1990:2002, que trata das bases para o projeto de estruturas, especifica que as combinações de cargas devem ser feitas considerando as pressões e as cargas permanentes, além das variáveis (como as de uso e ocupação da estrutura). No Brasil, a NBR 8681:2003 estabelece procedimentos que trata justamente das ações de combinações e segurança nas estruturas, essenciais para garantir a análise estrutural em diferentes cenários. Posteriormente, no estudo de caso, será avaliado as condições de carregamento seguindo as diretrizes da norma brasileira citada para combinação excepcional.

Segundo Vrouwenvelder (2000), quando a carga aplicada é transitória e intensa, como uma explosão, a estrutura pode resistir a um esforço maior por um curto período, devido a sua inércia, o que é chamado de aumento dinâmico na capacidade de suporte de carga ( $p_{RED}$ ). O fator dinâmico ( $\phi_d$ ) ajusta a capacidade de carga para refletir essa resistência aumentada multiplicando pela resistência da estrutura contra cargas acidentais ( $p_{rd}$ ). Fórmula do Fator Dinâmico:

$$\phi_d = 1 + \frac{g_k}{p_{rd}} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot u_{max}}{g \cdot \Delta t^2}} \quad (9)$$

Sendo:

$g_k$  é a carga permanente (kN/m<sup>2</sup>);

$p_{rd}$  é a resistência de projeto sob cargas normais (kN/m<sup>2</sup>);

$g$ : aceleração da gravidade ( $m/s^2$ );

$u_{max}$  é a deflexão máxima do meio vão da laje no colapso (m).

$\Delta t$  é o tempo de duração de explosão da carga (s).

Vrouwenvelder (2000) propõe que a deflexão máxima no meio do vão no momento de colapso,  $u_{max}$ , seja determinada com base nas propriedades de ductilidade e nas conexões com a estrutura adjacente.

Pressão Atuando nas Superfícies: conforme a norma EN 1991-1-7:2006, a pressão de deflagração atua efetivamente e de forma simultânea em todas as superfícies limitantes do recinto.

### 2.7.1 RESISTÊNCIA DO CONCRETO

A resistência do concreto dos elementos estruturais (vigas, pilares, lajes e fundações) em construções projetadas para resistir a explosões deve ser relativamente maior do que a utilizada em estruturas convencionais devido à magnitude das cargas dinâmicas e à necessidade de grandes deflexões. Recomenda-se uma resistência mínima de 4.000 psi ou para valores convertidos, serem maiores ou igual a 30 MPa, aproximadamente, para o concreto, conforme especificado na norma UFC 3-340-02. O cobrimento mínimo de concreto também deve seguir as especificações normativas, neste caso, a NBR 6118:2023 garantindo a proteção da armadura.

### 2.7.2 EQUIVALÊNCIA DE TNT

O uso da equivalência de TNT para gases é essencial na análise de pressões, pois permite que engenheiros e pesquisadores adaptem as metodologias de cálculo e segurança desenvolvidas para explosivos sólidos às características específicas de gases inflamáveis. Por meio da equivalência, é possível prever os efeitos de ondas de choque, pressões refletidas e impactos estruturais de explosões gasosas em edificações.

Pela UFC 3-340-02 (2008), o cálculo da equivalência de TNT para explosões de gases em ambientes confinados é uma tarefa que envolve diferentes parâmetros relacionados ao calor de combustão, calor de detonação e à proporção entre o material explosivo e o TNT. A fórmula básica é apresentada como:

$$W_{EG} = \frac{\phi \cdot (H_{EXP}^c - H_{EXP}^d) + H_{EXP}^d}{\phi \cdot (H_{TNT}^c - H_{TNT}^d) + H_{TNT}^d} \cdot W_{EXP} \quad (10)$$

Sendo:

- $W_{EG}$  é o peso equivalente do gás em TNT (kg);
- $\Phi$  é o fator de conversão para o gás, fornecido por tabelas experimentais;
- $H_{TNT}^c$  e  $H_{EXP}^c$  é o calor de combustão do TNT e do gás, respectivamente;
- $H_{TNT}^d$  e  $H_{EXP}^d$  é o calor de detonação do TNT e do gás, respectivamente;
- $W_{EXP}$  é o peso do material explosivo em questão.

No eixo da abscissa, mostra a razão  $W/V_f$ , que representa o peso da carga de composição do gás (kg) dividido pelo volume livre ( $m^3$ ). Este é um parâmetro que correlaciona o peso da carga com o espaço no qual ela está armazenada. No eixo da ordenada, encontra-se o fator de conversão que se deseja determinar, que como apresentado mede a equivalência do explosivo em relação ao TNT.

Além do método apresentado, é possível adotar métodos alternativos para calcular o equivalente em TNT de uma explosão, com o objetivo de analisar pressões geradas. Esses métodos utilizam parâmetros de eficiência, como a energia liberada durante a reação, o volume e a densidade do gás, bem como características específicas da combustão, tendo o calor de combustão apresentado na Tabela 7.

$$W_{TNT} = \frac{n \cdot M \cdot E_c}{E_{TNT}} \quad (11)$$

Sendo:

$n$  é a eficiência de explosão empírica (%);

$M$  é a massa de hidrocarboneto (kg);

$E_c$  é o calor de combustão do gás inflamável (kJ/kg).

$E_{TNT}$  é o calor de combustão do TNT (kJ/kg).

A eficiência de explosão empírica, segundo Lees (1996), varia entre 1% e 10%. Esse parâmetro é utilizado para ajustar os cálculos do equivalente em TNT, considerando que nem toda a energia liberada em uma explosão química é convertida diretamente em energia mecânica para gerar sobrepressões. Além disso, o calor de combustão do TNT, que serve como referência para tais cálculos, está entre 4437 e 4765 kJ/kg.

Tabela 7 – Poder calorífico de hidrocarbonetos.

| Gás inflamável | Fórmula Química                | Calor de Combustão (cal/g) | Calor de Combustão (kJ/kg) |
|----------------|--------------------------------|----------------------------|----------------------------|
| Metano         | CH <sub>4</sub>                | 11.954                     | 50.016                     |
| Etano          | C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>  | 11.274                     | 47.170                     |
| Propano        | C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>  | 10.990                     | 45.982                     |
| Butano         | C <sub>4</sub> H <sub>10</sub> | 10.840                     | 45.355                     |
| Pentano        | C <sub>5</sub> H <sub>12</sub> | 10.751                     | 44.982                     |
| Hexano         | C <sub>6</sub> H <sub>14</sub> | 10.692                     | 44.735                     |
| Hidrogênio     | H <sub>2</sub>                 | 27.823                     | 116.411                    |

Fonte: CETESB.

Bangash e Bangash (2006) classificam a intensidade da carga explosiva em relação ao peso equivalente de TNT, conforme apresentado na Tabela 8.

Tabela 8 – Classificação da intensidade de peso equivalente a TNT.

| Carga Explosiva | Peso Equivalente TNT (kg)    |
|-----------------|------------------------------|
| Pequena         | ≤ 5                          |
| Média           | 5 < P <sub>Eq</sub> ≤ 20     |
| Grande          | 20 < P <sub>Eq</sub> ≤ 100   |
| Imensa          | 200 ≤ P <sub>Eq</sub> ≤ 2500 |

Fonte: BANGASH e BANGASH (2006).

### 2.7.3 MÉTODO DO SHOCK WAVE – TNO

O Método do Shock Wave – TNO foi desenvolvido para analisar explosões de gases, sendo especialmente projetado para cenários em que a nuvem de vapor é homogênea e se forma em torno de um ponto de ignição central em um ambiente confinado, uma vez que não é levado em consideração aberturas áreas de ventilação, podendo considerar apenas as paredes como componentes de alívio de pressão. Este método considera a mistura estequiométrica e se destaca por sua capacidade de modelar explosões em curtas distâncias do epicentro, proporcionando uma avaliação dos efeitos da onda de choque.

Primeiramente, é necessário calcular o comprimento característico ( $L_0$ ), uma medida usada no método TNO para descrever a dimensão de uma explosão considerando as propriedades físicas e químicas da mistura gás-ar e a energia liberada pela combustão, conforme a equação:

$$L_0 = \left( V_0 \cdot \frac{E_{VC}}{p_{atm}} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (12)$$

Sendo:

$L_0$  é o comprimento característico (m);

$V_0$  é o volume ocupado pela mistura estequiométrica gás-ar (m<sup>3</sup>);

$E_{VC}$  é a energia específica da combustão (J/m<sup>3</sup>);

$p_{atm}$  é a pressão atmosférica ao nível do mar (kN/m<sup>2</sup>).

Considerar para energia específica da combustão ( $E_{VC}$ ) que o valor médio para hidrocarbonetos seja de  $3,5 \times 10^6$  J/m<sup>3</sup> e  $p_{atm}$  seja igual a 101,325 kN/m<sup>2</sup>.

Para determinar o valor de volume ocupado pela mistura estequiométrica que é o espaço físico preenchido pela mistura gás-ar, é considerado o ar contendo 20% de oxigênio, tendo a seguinte equação para o cálculo:

$$V_0 = \frac{(1 + 5 \cdot n) \cdot m \cdot R \cdot T}{M \cdot p_{atm}} \quad (13)$$

Sendo:

$m$  é a massa de gás entre Limite Inferior de Inflamabilidade (LII) e Limite Superior de Inflamabilidade (LSI) (kg);

$R$  é a constante dos gases (J/kmol.K);

$T$  é a Temperatura da mistura (K);

$M$  é a massa molar do gás (kg/kmol);

$n$  é o número de moles necessários para reação estequiométrica com oxigênio.

Para realizar os cálculos do volume ocupado pela mistura estequiométrica, é necessário determinar alguns parâmetros essenciais. A constante dos gases ( $R$ ) é definida como 8314,4 J/kmol.K, valor recomendado pela CODATA (2018) para gases ideais. A massa molar dos principais hidrocarbonetos é apresentada na Tabela 9, servindo como referência para cada combustível. Já o número de moles necessários para a reação com oxigênio é obtido a partir do balanceamento estequiométrico da combustão, avaliando quantos moles de O<sub>2</sub> são consumidos por mol do hidrocarboneto considerado.

Tabela 9 - Massa molar de hidrocarbonetos.

| Substância | Fórmula                        | Massa Molar (g/mol) |
|------------|--------------------------------|---------------------|
| Metano     | CH <sub>4</sub>                | 16                  |
| Etano      | C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>  | 30                  |
| Propano    | C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>  | 44                  |
| Butano     | C <sub>4</sub> H <sub>10</sub> | 58                  |
| Pentano    | C <sub>5</sub> H <sub>12</sub> | 72                  |
| Hexano     | C <sub>6</sub> H <sub>14</sub> | 86                  |
| Heptano    | C <sub>7</sub> H <sub>16</sub> | 100                 |
| Octano     | C <sub>8</sub> H <sub>18</sub> | 114                 |
| Nonano     | C <sub>9</sub> H <sub>20</sub> | 128                 |

Fonte: Autor.

A Tabela 6, como citado anteriormente, apresenta as propriedades de explosão de gases e vapores inflamáveis em condições atmosféricas de alguns exemplos de hidrocarbonetos. Os limites de inflamabilidade indicam a faixa de concentração no ar dentro da qual o gás ou vapor pode ser inflamado, como visto previamente, apresentado pelo Manual Técnico da Petrobras (2022), os valores em parênteses representam a concentração estequiométrica com o ar, que é ideal para a combustão completa.

A equação (14), visa estimar os níveis de sobrepressão, ou seja, o aumento de pressão gerado pela explosão em relação à pressão atmosférica padrão. Ela leva em consideração a reatividade do gás, que influencia diretamente a intensidade da explosão.

- Baixa reatividade: gases menos propensos a gerar explosões intensas, como o metano.
- Média reatividade: inclui gases com propriedades intermediárias, como propano.
- Alta reatividade: gases extremamente explosivos, como hidrogênio.

A classificação permite ajustar a previsão de impacto com base nas características químicas específicas do gás envolvido.

$$\frac{p_0}{p_{atm}} = \Phi \cdot \left(\frac{L_0}{x}\right) \tag{14}$$

Sendo:

$p_0$  é o pico de sobrepressão da onda de choque (N/m<sup>2</sup>);

$\Phi$  é o nível de reatividade;

$x$  é a distância do ponto tomado até o centro da explosão (m).

Para o cálculo do tempo de duração da fase positiva, é apresentado a seguinte equação e os parâmetros correspondentes na Tabela 10:

$$t_a = \frac{L_0}{a} \cdot \left( 0,456 \cdot \left(\frac{a}{u_f} - 1\right) + \frac{3 \cdot \Phi}{7} \cdot \ln \left( \frac{1 + \frac{7}{3 \cdot \Phi} \cdot \frac{x}{L_0}}{1 + \frac{1,064}{\Phi}} \right) \right) \tag{15}$$

Sendo:

$a$  é a velocidade do som no ar em relação a temperatura ambiente (m/s);

$u_f$  é a velocidade de propagação da chama (m/s).

A velocidade do som no ar é calculada com base nas propriedades termodinâmicas do ar, utilizando a equação padrão:

$$a = 331,4 \cdot \sqrt{\frac{T_{\circ C} + 273,15}{273,15}} \tag{16}$$

Sendo:

$T_{\circ C}$  é a temperatura do ar - considerando o ar seco (°C).

Tabela 10 – Parâmetros de velocidade da chama e níveis de reatividade dos gases.

| Reatividade | $u_f$ (m/s) | $\Phi$ | Exemplos de gases                           |
|-------------|-------------|--------|---|
| Baixa (A)   | 40          | 0,02   | Metano, monóxido de carbono, etc.           |
| Média (B)   | 80          | 0,06   | Etano, propano, butano, etc.                |
| Alta (C)    | 160         | 0,15   | Hidrogênio, acetileno, óxido de eteno, etc. |

Fonte: Silva (2007) apud TNO (1997).

### 2.7.4 AÇÕES EXCEPCIONAIS

De acordo com a NBR 8681:2003, as ações excepcionais são caracterizadas por uma baixa probabilidade de ocorrência e curta duração, como explosões, sismos, enchentes, incêndios ou choques de veículos. Essas ações devem ser consideradas em alguns projetos estruturais, pois seus carregamentos podem gerar efeitos catastróficos e, portanto, não devem ser desprezados. A norma ressalta que, para os carregamentos excepcionais, realiza-se apenas a verificação da segurança em relação aos estados limites últimos, utilizando uma única combinação última excepcional de ações.

As combinações últimas excepcionais são dadas pela seguinte expressão:

$$F_d = \sum_{i=1}^m \gamma_{gi} \cdot F_{Gi,k} + F_{Q,exc} + \gamma_q \sum_{j=2}^n \psi_{0j,ef} \cdot F_{Qj,k} \tag{17}$$

Sendo:

$\gamma_{gi}$  é o coeficiente de ponderação da carga permanente;

$F_{Gi,k}$  é o valor característico das ações permanentes;

$\gamma_q$  é o coeficiente de ponderação da carga variável;

$(\psi_{0j,ef} \cdot F_{Qj,k})$  é o valor reduzido de combinação de cada uma das demais ações variáveis;

$F_{Q,exc}$  é o valor da ação transitória excepcional.

Cargas no mesmo sentido da gravidade (positivas): essas cargas exercem pressão sobre a laje, pressionando-a para baixo, o que contribui para o esforço de compressão no elemento estrutural. Neste

caso estão inclusas as cargas permanentes agrupadas ( $g_k$ ); e a carga acidental ( $q$ ).

Cargas contrárias à gravidade (negativas): essas cargas geram uma força oposta, pressionando a laje para cima, o que pode levar a esforços de tração. No caso de uma explosão interna, a onda de pressão gerada atua contra a gravidade, criando um esforço que tende a elevar a laje, especialmente se o confinamento for significativo.

A consideração do sentido das forças é essencial para garantir que a estrutura suporte as combinações mais desfavoráveis. O efeito favorável de uma carga, que "alivia" a estrutura, é considerado como redução. Enquanto, o efeito desfavorável, que aumenta os esforços na estrutura, é levado em conta em sua magnitude total.

### 3. METODOLOGIA

O presente trabalho será desenvolvido com base na revisão bibliográfica e nos fundamentos teóricos relacionados às explosões em ambientes confinados e parcialmente confinados, explorando conceitos como sobrepressão, tempo de duração, comportamento da energia de combustão dos gases em sistemas com presença de componentes de alívio de pressão, além de verificar as condições de pressão variando a distância. Esses fundamentos serão aplicados em um estudo de caso que considera a explosão de gás liquefeito de petróleo (GLP) de composição butano ( $C_4H_{10}$ ) comercial, com massa molar de 58 g/mol, disposto em um botijão de embalagem do tipo P-13, isto é, peso de produto liquefeito de 13 kg e limites de inflamabilidade entre 1,3 e 8,5% conforme a Tabela 6, em uma cozinha situada no segundo pavimento de um apartamento residencial de dois andares, com dimensões internas de 4 m x 4 m x 3 m, verificando se atende os critérios de análise estabelecidos pela EN 1991-1-7:2006.

A cozinha em questão possui as seguintes aberturas para alívio de pressão e pode ser visualizada sua representação na Figura 7 a seguir:

Janela J01: 1,0 m de altura x 1,50 m de largura.

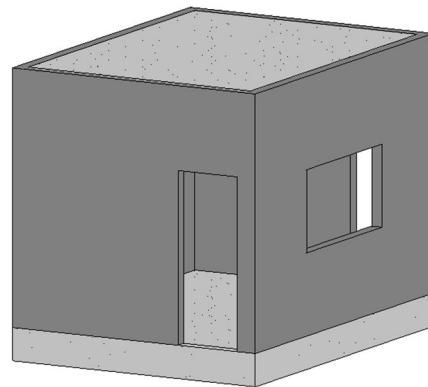
Porta P01: 2,10 m de altura x 0,80 m de largura.

Porta P02: 2,10 m de altura x 0,80 m de largura.

As paredes são tratadas como elementos de suporte de carga, não consideradas frangíveis, enquanto as janelas e a porta serão avaliadas como dispositivos de alívio de pressão. A análise da pressão estática será conduzida utilizando uma média ponderada, calculada com base no produto da soma das áreas das

aberturas e na média entre os valores mínimo e máximo de pressão de alívio atribuídos a cada componente de abertura, conforme especificado na Tabela 2 (HARRIS RJ, 1983). Será analisada a pressão gerada pela explosão na cozinha e seu impacto na laje do piso superior e inferior, que possui altura de 10 cm, revestimento de 5 cm e piso porcelanato com espessura de 12 mm sendo outra cozinha, situada diretamente acima da cozinha em estudo, considerando um pavimento tipo. Os valores de peso específico aparente dos materiais de construção serão obtidos da NBR 6120:2019. Os elementos estruturais são compostos de concreto com resistência característica à compressão de  $f_{ck} = 30$  MPa, conforme recomendado pela norma UFC 3-340-02 para construções projetadas para resistir a impactos de explosões.

Figura 7 – Representação geométrica da cozinha.



Fonte: Autor.

Os resultados entre os dois métodos aplicados serão comparados em termos de pico de pressão, tempo de duração e critérios adotados por cada método, além disso, serão avaliadas as combinações últimas das ações excepcionais seguindo a NBR 8681:2003. Essas abordagens serão previamente discutidas e fundamentadas, com validação por meio da análise crítica de suas premissas teóricas e dados empíricos.

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1 INTRODUÇÃO AO CÁLCULO E CRITÉRIOS DE AVALIAÇÃO

Neste tópico, são apresentados os resultados obtidos com base nas metodologias aplicadas para a análise de explosões em ambientes confinados ou parcialmente confinados, considerando a cozinha estudada. Os cálculos buscam verificar a conformidade dos parâmetros da estrutura com as normas aplicáveis e avaliar o impacto das

sobrepensões geradas na segurança estrutural do piso do pavimento superior e inferior da cozinha do apartamento residencial em estudo. O foco recai sobre os critérios de ventilação, resistência dos materiais e combinação das ações excepcionais.

## 4.2 AVALIAÇÃO DOS PARÂMETROS DO AMBIENTE

Com base nas dimensões do ambiente, calculou-se a área de ventilação ( $A_v$ ), o volume interno da cozinha ( $V$ ) e a relação área de ventilação/volume ( $A_v/V$ ).

a) Área de ventilação ( $A_v$ ): somatória das aberturas disponíveis (1 janela e 2 portas).

$$A_v = 1,0 \cdot 1,50 + 2,10 \cdot 0,80 + 2,10 \cdot 0,80$$

$$A_v = 4,86 m^2$$

b) Volume do ambiente ( $V$ ): produto das dimensões da cozinha.

$$V = 4 \cdot 4 \cdot 3$$

$$V = 48 m^3$$

c)  $A_v/V$ : relação para análise de ventilação em ambientes confinados.

$$A_v/V = \frac{4,86}{48}$$

$$A_v/V = 0,101 m^{-1}$$

Assim, verifica-se que os critérios de avaliação foram atendidos indicando adequação do ambiente para o cálculo de sobrepensões.

$$0,05 \leq A_v/V = 0,101 \leq 0,15 (m^{-1})$$

O volume do ambiente analisado é de  $48 m^3$ , valor que se enquadra na faixa  $V \leq 100 m^3$ . Essa categoria implica que o tempo total do pulso (tp) da onda de pressão estará entre 0,2 e 0,3 segundos, conforme recomendado por Bela (1990).

## 4.3 CÁLCULO DAS CARGAS PERMANENTES E ACIDENTAL DA LAJE TIPO

Os pesos específicos aparentes foram retirados da norma NBR 6120:2019 de ações para cálculo de estruturas de edificações.

a) Carga acidental para a cozinha:

$$q = 1,5 kN/m^2$$

b) Peso próprio da laje: considerar peso específico do concreto igual a  $25 kN/m^3$ .

$$g_{laje} = 25 \cdot 0,1$$

$$g_{laje} = 2,5 kN/m^2$$

c) Peso próprio de revestimento de pisos de edifícios residenciais: considerar peso específico do contrapiso igual a  $20 kN/m^3$  e espessura de 5 cm.

$$g_{cp} = 20 \cdot 0,05$$

$$g_{cp} = 1,0 kN/m^2$$

d) Peso próprio do piso porcelanato: considerar o peso específico igual a  $23 kN/m^3$  e espessura de 12 mm.

$$g_{piso} = 23 \cdot 0,012$$

$$g_{piso} = 0,276 kN/m^2 \cong 0,30 kN/m^2$$

e) Carga permanente agrupada ( $g_k$ ):

$$g_k = 2,5 + 1 + 0,30$$

$$g_k = 3,80 kN/m^2$$

## 4.4 CÁLCULO PELO MÉTODO DO SHOCK WAVE (TNO)

Esta abordagem analisa as propriedades de gases combustíveis, como o butano, considerando suas características intrínsecas no processo de combustão, reação química e formação de atmosferas explosivas. Os primeiros passos do cálculo estão nos limites de inflamabilidade, definidos pelas concentrações mínima e máxima em que o gás, misturado ao ar, é capaz de sustentar a combustão, além do ponto de sua combustão completa. Adicionalmente, considera-se a estequiometria das reações de combustão completa para avaliar o potencial explosivo, destacando o papel das condições de temperatura, pressão e composição da mistura no comportamento térmico e energético do sistema. Os cálculos desenvolvidos a seguir, bem como a discussão são realizados com bases nas informações dadas abaixo:

Gás combustível: Butano ( $C_4H_{10}$ );

Limites de Inflamabilidade: 1,3% a 8,5% em volume;

Ponto de Inflamabilidade de Combustão Completa: 3,1%;

Peso do botijão (P13): 13 kg.

Volume do ambiente:  $4 \times 4 \times 3 m = 48 m^3$

Temperatura ambiente ( $T$ ):  $25^\circ C$  ( $298,15 K$ )

Pressão atmosférica ( $P_{atm}$ ):  $101325 Pa$  ( $N/m^2$ )

Constante dos gases ideais ( $R$ ):  $8314,4 J/kmol \cdot K$

Massa Molar butano ( $C_4H_{10}$ ):  $58 kg/kmol$

Energia específica da combustão (valor médio para hidrocarbonetos):  $3,5 \times 10^6 \text{ J/m}^3$

Para determinar o número de moles necessários para a combustão completa do butano ( $\text{C}_4\text{H}_{10}$ ) com o oxigênio ( $\text{O}_2$ ), utiliza-se a reação estequiométrica balanceada:  $\text{C}_4\text{H}_{10} + 6,5\text{O}_2 \rightarrow 4\text{CO}_2 + 5\text{H}_2\text{O}$ . O número de moles de oxigênio necessários para a reação estequiométrica com 1 mol de butano é 6,5 mols.

#### 4.4.1 DETERMINAÇÃO DOS LIMITES DE INFLAMABILIDADE E PONTO DE COMBUSTÃO COMPLETA

A equação (1) é utilizada para determinar os limites de inflamabilidade é:

$$LI = \frac{1 \cdot c(\%)}{0,5 + x}$$

Com esta equação apresentada é possível calcular o número de mols de ar ( $x$ ) presente na mistura:

a.1) Limite de inflamabilidade inferior;

$$1,3\% = \frac{1 \cdot 100\%}{0,5 + x_{LII}}$$

$$x_{LII} = 76,42$$

a.2) Limite de inflamabilidade superior;

$$8,5\% = \frac{1 \cdot 100\%}{0,5 + x_{LIS}}$$

$$x_{LIS} = 11,26$$

a.3) Ponto de inflamabilidade de combustão completa ( $LI = 3,1\%$  - Tabela 6):

$$3,1\% = \frac{1 \cdot 100\%}{0,5 + x}$$

$$x_{PICC} = 31,76$$

O número total de mols da mistura gás-ar é determinado somando 1 mol de combustível (butano) com a quantidade de mols de ar necessária, que varia conforme os limites de inflamabilidade dado pela equação (2):

$$n'_{LII} = c(\%) + x$$

b.1) Limite de inflamabilidade inferior;

$$n'_{LII} = 1 + 76,42$$

$$n'_{LII} = 77,42$$

b.2) Limite de inflamabilidade superior;

$$n'_{LIS} = 1 + 11,26$$

$$n'_{LIS} = 12,26$$

b.3) Ponto de inflamabilidade de combustão completa:

$$n'_{PICC} = 1 + 31,76$$

$$n'_{PICC} = 32,76$$

Em condições normais de temperatura e pressão (CNTP), onde a pressão é de 1 atm e a temperatura é de 273,15 K ( $0^\circ\text{C}$ ), 1 mol de qualquer gás ideal ocupa um volume fixo de 22,4 litros, determinado pela equação (3):

$$n'' = 100\% \cdot \frac{1000 \cdot 273,15}{22,4 \cdot 298,15}$$

$$n'' = 40,90$$

Assim, o número de mols de  $\text{C}_4\text{H}_{10}$  em  $1 \text{ m}^3$  de gás serão pode ser calculado utilizando-se da equação (4).

c.1) Limite de inflamabilidade inferior;

$$n_{LII} = c(\%) \cdot \frac{n''}{n'_{LII}}$$

$$n_{LII} = 100\% \cdot \frac{40,90}{77,42}$$

$$n_{LII} = 0,53$$

c.2) Limite de inflamabilidade superior;

$$n_{LIS} = c(\%) \cdot \frac{n''}{n'_{LIS}}$$

$$n_{LIS} = 100\% \cdot \frac{40,90}{12,26}$$

$$n_{LIS} = 3,33$$

c.3) Ponto de inflamabilidade de combustão completa:

$$n_{PICC} = c(\%) \cdot \frac{n''}{n'_{PICC}}$$

$$n_{PICC} = 100\% \cdot \frac{40,90}{32,76}$$

$$n_{PICC} = 1,25$$

Com base na massa molar do butano ( $\text{C}_4\text{H}_{10}$ ) igual a 58 g/mol, é possível calcular a massa de gás necessária para formar uma mistura explosiva com o ar nos limites de inflamabilidade (LII e LIS) ou no ponto de combustão completa (PICC), dados pela equação (5). Esses cálculos utilizam o número de mols estimado para cada limite de inflamabilidade e a proporção de oxigênio requerida para combustão.

d.1) Limite de inflamabilidade inferior;

$$m' = 0,53 \cdot 58$$

$$m' = 30,74 \text{ g/m}^3$$

d.2) Limite de inflamabilidade superior;

$$m' = n \cdot M$$

$$m' = 3,33 \cdot 58$$

$$m' = 193,14 \text{ g/m}^3$$

d.3) Ponto de inflamabilidade de combustão completa:

$$m' = 1,25 \cdot 58$$

$$m' = 72,5 \text{ g/m}^3$$

Assim, como a cozinha apresenta dimensões de 4 m x 4 m x 3 m, ou seja, um volume de vazio ou ambiente de 48 m<sup>3</sup>. Então, pela equação (6), basta que haja um vazamento conforme:

e.1) Limite de inflamabilidade inferior;

$$m = 48 \cdot 0,03074$$

$$m = 1,47 \text{ kg}$$

e.2) Limite de inflamabilidade superior;

$$m = 48 \cdot 0,19314$$

$$m = 9,27 \text{ kg}$$

e.3) Ponto de inflamabilidade de combustão completa:

$$m = 48 \cdot 0,0725$$

$$m = 3,48 \text{ kg}$$

Com base nos resultados obtidos de massa de gás butano, é possível observar os riscos significativos de vazamentos de GLP, uma vez que quantidades relativamente pequenas de gás são suficientes para formar atmosferas explosivas. No volume de 48 m<sup>3</sup>, a mistura de gás com ar pode gerar combustão completa com 3,48 kg de GLP, enquanto as condições inflamáveis podem ocorrer com 1,47 kg no limite inferior e até 9,27 kg no limite superior. Isso demonstra a alta periculosidade de vazamentos, considerando que um botijão P13 contém 13 kg de produto liquefeito. Esses valores são utilizados para determinar o volume de mistura estequiométrica entre o butano e o ar, considerando as condições específicas de combustão.

É possível realizar um comparativo entre os resultados obtidos neste estudo e os valores apresentados na Base de Dados de Substâncias GESTIS do IFA. Para o gás butano, os valores fornecidos pela base de dados indicam limites inferior e superior de inflamabilidade de 33 g/m<sup>3</sup> e 231 g/m<sup>3</sup>,

respectivamente. Nos cálculos realizados neste estudo, os valores obtidos foram de 30,74 g/m<sup>3</sup> e 193,14 g/m<sup>3</sup>.

Um dos motivos dessa variação entre as literaturas pode ser explicado por pequenas diferenças nos percentuais atribuídos aos limites de inflamabilidade. Enquanto a Base de Dados de Substâncias GESTIS utiliza limites de 1,4% a 9,4% para o LII e LIS, este estudo considerou limites de 1,3% a 8,5%, conforme apresentado na Tabela 6. Além disso, é necessário avaliar as condições experimentais que foram empregados.

É importante destacar que, embora haja diferença relativa nos valores absolutos, os resultados obtidos neste estudo estão dentro de uma faixa aceitável, demonstrando que as formulações empregadas são adequadas e capazes de representar, com variável precisão, os limites de inflamabilidade e as massas correspondentes para o gás butano.

#### 4.4.2 CÁLCULO DO VOLUME DE MISTURA ESTEQUIOMÉTRICA

Com base nos resultados obtidos anteriormente de massa do gás no ponto de combustão completa, calcula-se o volume da mistura pela equação (13):

$$V_0 = \frac{(1 + 5 \cdot 6,5) \cdot 3,48 \cdot 8314,4 \cdot 298,15}{58 \cdot 101325}$$

$$V_0 = 49,17 \text{ m}^3$$

O cálculo revelou que a mistura estequiométrica butano-ar ocuparia um volume aproximado de 49,17 m<sup>3</sup> em condições ambientes. Esse resultado é extremamente relevante, pois evidencia o potencial de expansão e o impacto que uma combustão completa pode ter, especialmente em ambientes confinados. Comparado ao volume da cozinha (48 m<sup>3</sup>), observa-se que, mesmo em situações de combustão completa, o gás possui capacidade de gerar pressões significativas, aumentando o risco de explosões destrutivas.

#### 4.4.3 DETERMINAÇÃO DO COMPRIMENTO CARACTERÍSTICO

O cálculo do comprimento característico, levando em conta todos os parâmetros previamente definidos, é realizado por meio da equação (12):



$$L_0 = \left( 49,17 \cdot \frac{3,5 \cdot 10^6}{101325} \right)^{\frac{1}{3}}$$

$$L_0 = 11,93 \text{ m}$$

O resultado de 11,93 m obtido, indica que a propagação da onda de choque gerada pela explosão pode se estender consideravelmente, alcançando essa distância antes de dissipar significativamente. Esse comprimento característico é importante para avaliar o impacto da explosão em áreas próximas e sua capacidade de causar danos em estruturas distantes. No entanto, ao aplicar esse valor, é importante considerar que ele representa uma estimativa idealizada e que fatores como geometria do ambiente, obstáculos e condições específicas podem influenciar os efeitos reais da explosão.

#### 4.4.4 DETERMINAÇÃO DO PICO DE SOBREPRESSÃO

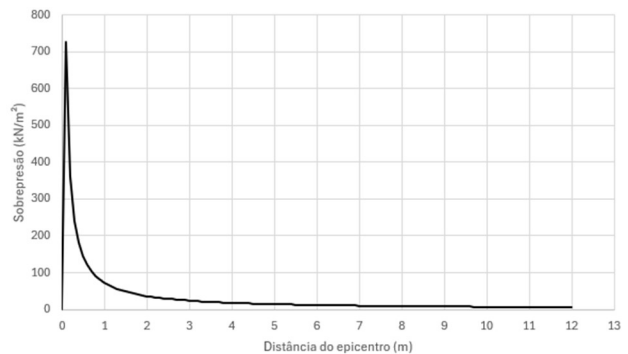
Determinar o centro de explosão em um ambiente onde o gás ocupa todo o espaço é um desafio que exige um modelo teórico simplificado. Em situações como essa, o centro de explosão pode ser definido como um ponto idealizado que representa o local onde ocorre a ignição inicial e de onde a energia da explosão se propaga radialmente. Esse ponto não precisa corresponder fisicamente a um ponto único de ignição, mas sim a um modelo matemático que facilita a análise. Para ambientes completamente preenchidos por gases inflamáveis, a escolha do centro da explosão pode ser feita desta maneira, então como a mistura está preenchida no espaço, assume-se que a ignição pode ocorrer em qualquer ponto geométrico e a partir deste avaliar a sobrepressão atuante a certa distância. Para simplificação da distribuição do carregamento na superfície do elemento estrutural, considera que a pressão gerada age uniformemente e ao mesmo tempo em todas as superfícies que limitam o recinto onde ocorre a explosão.

A equação (14) pode ser utilizada para descrever a relação entre o pico de sobrepressão ( $p_0$ ) em uma explosão e a distância ( $x$ ) do ponto de análise até o centro da explosão. Para a realização deste cálculo, variou-se a distância considerando a princípio um epicentro qualquer, para entender as condições geradas e o fator de reatividade do gás utilizada foi de 0,06, conforme mencionado na Tabela 10.

$$p_{(x)} = 0,06 \cdot \left( \frac{11,93}{x} \right) \cdot 101,325$$

Os resultados obtidos estão apresentados no Gráfico 1 a seguir.

Gráfico 1 – Propagação da sobrepressão em relação a distância.



Fonte: Autor.

À medida que a distância aumenta ( $x \rightarrow \infty$ ), a pressão originada pela explosão se dispersa e interage com o ambiente, resultando em uma redução da sobrepressão. Enquanto se for avaliado uma distância  $x$  relativamente próxima ao epicentro, nestas condições, como por exemplo, 10 centímetros, o resultado de pico inicial da sobrepressão deverá ser na ordem de 720 kN/m<sup>2</sup>. Este fenômeno de dissipação de energia explosiva acontece à medida que a onda de choque se move para fora do centro da explosão, como é possível observar no gráfico apresentado, pois ela cobre uma área maior, ou seja, isso reduz a intensidade da pressão porque a energia total permanece constante, mas é distribuída por uma área maior. Além disso, é importante ressaltar que a energia da explosão pode ser parcialmente absorvida por obstáculos no ambiente sendo estes móveis, elementos estruturais e vedação.

#### 4.4.5 DETERMINAÇÃO DO TEMPO DE DURAÇÃO DA FASE POSITIVA

O tempo de duração da fase positiva pode ser estimado pela equação (15), considerando:

$a$  é a velocidade do som no ar (m/s) (337 m/s);

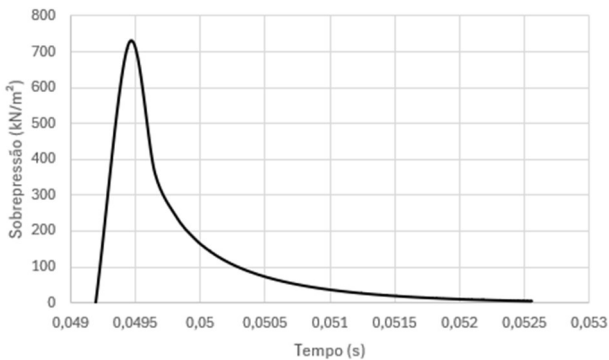
$u_f$  é a velocidade de propagação da chama (m/s) Tabela 10 (80 m/s);

Sendo:

$$t_d = \frac{11,93}{337} \cdot \left( 0,456 \cdot \left( \frac{337}{80} - 1 \right) + \frac{3 \cdot 0,06}{7} \cdot \ln \left( \frac{1 + \frac{7}{3 \cdot 0,06} \cdot \frac{x}{11,93}}{1 + \frac{1,064}{0,06}} \right) \right)$$

$$t_d = 0,0494 \text{ s}$$

Gráfico 2 – Propagação da sobrepressão em relação ao tempo.



Fonte: Autor.

A fase positiva observada no Gráfico 2, refere-se ao intervalo em que os gases da explosão exercem pressão acima da pressão ambiente devido à liberação rápida de energia e expansão do material em combustão. A curva apresenta um pico abrupto em  $t \approx 0,049$  s com um valor de sobrepressão próximo de  $720 \text{ kN/m}^2$ . Esse comportamento é típico de explosões rápidas, onde ocorre uma liberação súbita de energia, gerando altas pressões em um curto intervalo de tempo variando ao longo da distância do epicentro. Após o pico, a sobrepressão diminui rapidamente em função do tempo, apresentando um comportamento exponencial de decaimento. Esse padrão reflete a dissipação de energia da explosão para o ambiente e a redução das forças de compressão nos gases gerados. Vale ressaltar que a curva pressão vs. tempo é utilizada para avaliar os esforços gerados no ambiente e deve ser conduzido por meio de análise dinâmica e, desta forma, para construções usuais é de difícil aplicação.

No caso da análise pelo método Shock Wave (TNO), os valores calculados para pressões em ambientes confinados também corroboraram com os de Bjerketvedt et al. (1997), que indicam que a formação de nuvens de ar-combustível de hidrocarbonetos em espaços confinados pode gerar pressões de até  $800 \text{ kN/m}^2$ . O valor obtido neste trabalho, de  $720 \text{ kN/m}^2$ , está dentro de uma faixa aceitável de variação, considerando as diferenças nas condições e propriedades dos ambientes modelados. Essas variações podem ser atribuídas às diferenças nas propriedades termodinâmicas do gás, na configuração do ambiente e na metodologia de cálculo utilizada.

## 4.5 MÉTODO EN 1991-1-7:2006

### 4.5.1 DETERMINAÇÃO DA PRESSÃO ESTÁTICA DE ALÍVIO

A pressão estática de alívio é definida como o valor mínimo necessário para que os dispositivos de alívio (como janelas, portas ou paredes frangíveis) sejam acionados, liberando a sobrepressão acumulada durante a explosão. No presente estudo, foi utilizada a Tabela 2 como referência, que apresenta faixas típicas de pressão de falha para diferentes elementos de construção.

Para a cozinha em análise, considerou-se que as janelas e as portas são os principais dispositivos de alívio de pressão. Para a estimativa da pressão estática, é proposto uma abordagem que utiliza uma média ponderada. Assim, a pressão estática total de alívio foi calculada com a seguinte formulação:

$$p_{est} = \frac{\sum_{i=1}^n A_i \cdot \left( \frac{p_{min,i} + p_{max,i}}{2} \right)}{\sum_{i=1}^n A_i} \quad (18)$$

Portanto, calculando a pressão estática, utilizando-se da equação (18):

$$p_{est} = \frac{1,5 \cdot \left( \frac{2+7}{2} \right) + 2 \cdot 1,68 \cdot \left( \frac{2+3}{2} \right)}{1,5 + 2 \cdot 1,68}$$

$$p_{est} = 3,12 \text{ kN/m}^2$$

A escolha de realizar uma média ponderada proporciona uma estimativa equilibrada, evitando a superestimação ou subestimação do comportamento dos dispositivos de alívio. Isso pressupõe que a sobrepressão é distribuída uniformemente e que todas as aberturas falham de forma sincronizada. No entanto, vale ressaltar que, dependendo das características reais dos materiais (espessura, rigidez, tipo de vidro), fatores como localização das aberturas e a propagação da onda de choque, essa pressão pode variar. Uma validação experimental ou análise específica para os materiais reais pode refinar esses valores.

### 4.5.2 CÁLCULO DA PRESSÃO EQUIVALENTE PARA EXPLOSÃO INTERNA.

O cálculo da pressão estática equivalente ( $p_{eq}$ ) considera duas fórmulas distintas, sendo que o resultado é baseado no maior valor entre eles, dado pela equação (7):

$$p_{eq} = 3 + 3,12$$

$$p_{eq} = 6,12 \text{ kN/m}^2$$

Ou, calculado pela equação (8):

$$p_{eq} = 3 + \frac{3,12}{2} + \frac{0,04}{(0,101)^2}$$

$$p_{eq} = 8,48 \text{ kN/m}^2$$

Portanto, a pressão de projeto que deverá ser utilizada é de 8,48 kN/m<sup>2</sup>, que será utilizada para verificar a capacidade de resistência dos elementos estruturais.

### 4.5.3 ANÁLISE DE COMBINAÇÕES ÚLTIMAS DAS AÇÕES EXCEPCIONAIS.

A análise das combinações de ações sobre uma estrutura, como a laje do piso superior, é importante classificar as forças conforme o sentido em que elas atuam em relação à gravidade.

Para determinar a combinação última das ações excepcionais, a carga de explosão deve entrar como variável principal, assim é aplicado as seguintes hipóteses em relação a fórmula Geral da equação (17):

a) Piso inferior: carga de explosão equivalente como variável principal; e todas as ações classificadas como desfavorável.

$$p_{d,excep} = 1,2 \cdot 3,80 + 8,48 + 1,0 \cdot 0,5 \cdot 1,5$$

$$p_{d,excep} = 13,79 \text{ kN/m}^2$$

b) Piso superior: carga de explosão equivalente como variável principal; e a carga permanente como favorável.

$$p_{d,excep} = 1,0 \cdot 3,80 - 8,48$$

$$p_{d,excep} = -4,68 \text{ kN/m}^2$$

Os coeficientes de ponderação e fatores de combinação para as ações, foram retirados da NBR 8681:2003, para o desenvolvimento destes cálculos.

### 4.5.4 FATOR PARCIAL DE SEGURANÇA

Em situações normais de projeto, utiliza-se fatores parciais de segurança para dimensionar elementos estruturais. Esses fatores são aplicados às ações (cargas) e/ou resistências para garantir que a estrutura suporte variações não previstas ou incertezas nos cálculos. Para ações, como explosões, não é necessário aplicar o fator parcial ao lado da resistência. Isso significa que a resistência calculada pode ser usada diretamente sem a necessidade de ajustes adicionais, devido a excepcionalidade. Vrouwenvelder (2000), sugere aplicar um fator de ampliação à carga normal de projeto de 1,2 que permite comparar como a estrutura se comportaria se fosse projetada exclusivamente para cargas normais, dada por:

$$p_{rd} = 1,2 \cdot p_d \quad (19)$$

Para o piso inferior em combinações últimas normais (NBR 8681:2003):

$$p_d = \gamma_g \cdot F_g + \gamma_q \cdot F_q$$

$$p_d = 1,4 \cdot 3,80 + 1,4 \cdot 1,5$$

$$p_d = 10,08 \text{ kN/m}^2$$

Assim, a resistência da estrutura contra cargas acidentais é obtida pela equação (19):

$$p_{rd} = 1,2 \cdot 10,08 \text{ kN/m}^2$$

$$p_{rd} = 12,10 \text{ kN/m}^2$$

### 4.5.5 AUMENTO DINÂMICO NA CAPACIDADE DE SUPORTE DE CARGA

Embora Vrouwenvelder (2000) não detalha o cálculo do parâmetro de deflexão máxima no meio do vão no momento do colapso ( $u_{max}$ ), o autor sugere uma estimativa de 0,20 m como referência. Neste trabalho, adota-se essa abordagem como base, ajustando o valor proporcionalmente ao menor vão da laje ( $L$ ), que no exemplo de Vrouwenvelder (2000) é de 8 m. Assim, considera-se uma deflexão de  $L/40$ , coerente com o método proposto, para calcular o aumento dinâmico na capacidade de suporte de carga. Conforme fundamentado anteriormente, considera-se a duração do tempo de explosão ( $\Delta t$ ) como 0,2 s. O fator dinâmico pode ser estimado pela equação (9), onde  $u_{max}$  é substituído por  $L/40$ .

$$\phi_d = 1 + \sqrt{\frac{g_k}{p_{rd}}} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot L}{40}} \cdot \sqrt{g \cdot \Delta t^2}$$

a) Cálculo do piso inferior:

Substituindo os valores:

$$\phi_d = 1 + \sqrt{\frac{3,8}{12,10}} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot 4}{9,81 \cdot 0,2^2}}$$

$$\phi_d = 1,40$$

A carga aumentada é então calculada como:

$$p_{RED} = \phi_d \cdot p_{rd}$$

$$p_{RED} = 1,40 \cdot 12,10$$

$$p_{RED} = 16,94 \text{ kN/m}^2$$

Comparando com o valor limite permitido:

$$p_{RED} = 16,94 \text{ kN/m}^2 > p_{d,excep} = 13,79 \text{ kN/m}^2$$

b) Cálculo do piso superior:

Considerar a seguinte proposição:

$$p_{REd} = \phi_d \cdot p_{rd}$$

$$p_{REd} = \left( 1 + \sqrt{\frac{g_k}{p_{rd}}} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot u_{max}}{g \cdot \Delta t^2}} \right) \cdot p_{rd}$$

Onde,  $p_{REd} = p_{d,excep} = -4,68 \text{ kN/m}^2$

Para resolver a resistência da estrutura contra cargas acidentais ( $p_{rd}$ ), assumi-se os seguintes valores:

$$4,68 = \left( 1 + \sqrt{\frac{3,8}{p_{rd}}} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot \frac{4}{40}}{9,81 \cdot 0,2^2}} \right) \cdot p_{rd}$$

$$p_{rd} = 2,485 \text{ kN/m}^2$$

Percentual necessário para reforço da laje no piso superior:

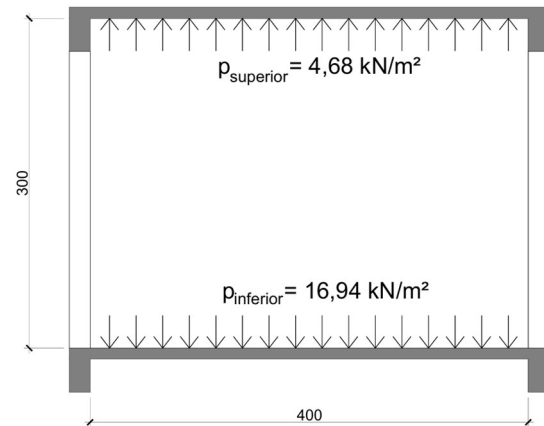
$$\frac{p_{rd}}{p_d} = \frac{2,485}{10,08} = 24,65\%$$

No caso específico do piso superior, o efeito da explosão provoca tração na laje no sentido oposto à gravidade. Isso resulta na necessidade de reforço da parte superior da laje maciça, que normalmente não recebe armadura em situações convencionais. A relação entre a resistência a cargas acidentais ( $p_{rd}$ ) e a carga de projeto em condições normais ( $p_d$ ) é de apenas 24,65%. Isso implica que será necessário reforçar a parte superior da laje com 24,65% da armadura principal normalmente localizada na parte inferior.

#### 4.5.5 DISTRIBUIÇÃO DA PRESSÃO NA SUPERFÍCIE DAS LAJES INFERIOR E SUPERIOR

Como mencionado e ilustrado na Figura 8, as pressões geradas atuam de forma uniforme na superfície das lajes inferior e superior, variando de intensidade conforme cada critério adotado pelos métodos desenvolvidos neste trabalho. Entre os principais critérios que afetam a intensidade das pressões, destaca-se a análise de combinação das ações, que considera os diferentes esforços que podem ocorrer simultaneamente durante o evento explosivo. Além disso, a intensidade das pressões é diretamente afetada por fatores como a geometria do ambiente, a presença ou não de componentes de alívio de pressão, distância do ponto de ignição da explosão e propriedades dos gases.

Figura 8 – Distribuição de pressão devido a explosão pelo método da EN 1991-1-7:2006.



Fonte: Adaptado de Vrouwenvelder (2000).

Esse conjunto de critérios evidencia a complexidade do fenômeno e a necessidade de abordagens que integrem diferentes aspectos, garantindo a segurança e a resistência das estruturas submetidas a tais eventos excepcionais.

## 5. CONCLUSÃO

O presente trabalho analisou os impactos de explosões internas em edificações em condições de ambiente parcialmente confinados e confinados, com foco nos fatores que influenciam a dissipação da pressão e no comportamento das estruturas submetidas a sobrepensões geradas por esses eventos.

A EN 1991-1-7:2006 demonstrou ser uma abordagem aplicável, especialmente em contextos em que as condições de ventilação e os dispositivos de alívio de pressão são definidos. Essa norma considera explicitamente o efeito dos componentes de alívio, como janelas e portas, na dissipação da pressão gerada pela explosão, sendo particularmente útil para projetar estruturas que priorizam a segurança e a mitigação de riscos em ambientes parcialmente confinados. O pavimento inferior, projetado com base no aumento dinâmico de capacidade, resultou em  $p_{REd} > p_{d,excep}$ , atendendo aos critérios para resistir às cargas acidentais geradas por explosões internas. No entanto, este método não aborda diretamente as características específicas dos gases combustíveis envolvidos, como tipo de gás, propriedades físico-químicas, limites de inflamabilidade, densidade e calor de combustão.

Em termos estruturais, verificou-se a necessidade de reforço em pontos críticos, como as lajes superiores, devido às forças de tração causadas pela inversão das cargas. A relação entre  $p_{rd}/p_d$ , destacada em 24,65% no caso analisado, reforçando a importância de

armaduras adicionais em condições excepcionais, onde normalmente não é projetada para suportar esforços significativos de tração.

Por outro lado, o método Shock Wave (TNO) considera as propriedades intrínsecas do gás combustível e sua influência na geração de ondas de choque quando o fator ignição é acionado, provocando o princípio de explosão da nuvem de gás presente no ambiente. Esse método avalia diretamente a variação relativa da sobrepressão em função da distância ao centro da explosão, permitindo estimativas da propagação da energia e dos impactos em diferentes pontos do ambiente. No entanto, é importante ressaltar que, por não considerar componentes de alívio de pressão, o método pode subestimar ou superestimar os efeitos em ambientes parcialmente confinados ou ventilados. Os dados obtidos neste estudo mostraram-se consistentes com valores encontrados em outras literaturas. Em particular, os limites de inflamabilidade e a massa de gás necessária para formar uma mistura explosiva apresentaram valores relativamente próximos aos encontrados em estudos anteriores. Esse método permite calcular o tempo de duração da explosão, o que o método da norma europeia estima o tempo em relação a geometria do ambiente.

Essas abordagens, permitem uma análise das condições de segurança estrutural em cenários de explosão. O estudo ressalta a importância de escolher o método mais adequado às condições específicas do projeto, bem como a possibilidade de combiná-los para otimizar o dimensionamento estrutural e as estratégias de mitigação de danos. Parâmetros como pressão estática dos componentes de alívio de pressão, eficiência de explosão empírica e deflexão máxima no meio do vão da laje ficam abertos a serem estudados com mais profundidade por meio de pesquisas e análises complementares que possam contribuir na precisão dos cálculos.

## 6. AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço a Deus por me conceder força, sabedoria e perseverança para superar os desafios ao longo desta jornada. À minha família, pelo amor incondicional, apoio constante e por acreditarem em mim em todos os momentos, mesmo nos mais difíceis.

Expresso minha profunda gratidão ao meu professor orientador, cuja paciência, conhecimento e dedicação foram fundamentais para a realização deste trabalho. Agradeço também à Universidade Federal de Mato Grosso do Sul, que proporcionou o ambiente e os

recursos necessários para minha formação acadêmica e pessoal.

Aos meus amigos, que estiveram ao meu lado, ajudando-me a enfrentar os desafios, compartilhando conquistas e contribuindo para o meu crescimento pessoal e profissional. Por fim, agradeço a todos aqueles que, de alguma forma, colaboraram para minha formação, seja por meio de palavras de incentivo, conselhos ou gestos de apoio. A todos vocês, minha eterna gratidão.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABNT. NBR 15662:2009. **Segurança em sistemas de máquinas: partes do sistema de comando relacionadas à segurança**. Rio de Janeiro: ABNT, 2009.
- ABNT. NBR 6120:2019. **Cargas para o cálculo de estruturas de edificações**. Rio de Janeiro: ABNT, 2019.
- ABNT. NBR 8681:2003. **Ações e segurança nas estruturas: procedimento**. Rio de Janeiro: ABNT, 2003.
- ABNT. NBR ISO 6184:2007. **Explosões de gases: diretrizes para proteção contra explosões em instalações industriais**. Rio de Janeiro: ABNT, 2007.
- BANGASH, M. Y. H.; BANGASH, T. **Explosion-resistant buildings**. Springer-Verlag, Londres, Reino Unido, 2006.
- BELA, G. **Design of Buildings to Withstand Abnormal Loading**. Butterworths, 1990.
- BJERKETVEDT, D.; BAKKE, J.R.; VAN WINGERDEN, K. **Gas explosion handbook**. Journal of Hazardous Materials, v. 52, p. 1-150, 1997.
- BESHARA, F. B. A. **Modelling of blast loading on aboveground structures-II. Internal blast and ground shock**. Computers and Structures, v. 51, p. 597-606, 1994.
- CARVALHO JR., J. A. de; MCQUAY, M. Q. **Princípios de Combustão Aplicada**. Florianópolis: Editora da UFSC, 2007.
- CEN. EN 1991-1-7:2006. Eurocode 1: **Actions on structures - Part 1-7: General actions - Accidental actions**. Brussels: European Committee for Standardization, 2006.
- CEN. EN 1990:2002. Eurocode - **Basis of structural design**. Brussels: European Committee for Standardization, 2002.

- CETESB - Companhia Ambiental do Estado de São Paulo. **Sistemas Interativos**. Disponível em: <https://sistemasinter.cetesb.sp.gov.br>. Acesso em: 09 dez. 2024.
- CODATA. **Fundamental Physical Constants: molar gas constant R**. NIST, 2018. Disponível em: <https://www.nist.gov>. Acesso em: 08 dez. 2024.
- DRAGOSAVIC, M. **Structural measures against natural-gas explosions in highrise blocks of flats**. Heron, v. 19, 1973.
- FOGAÇA, J. R. V. **Combustão completa e incompleta**. Mundo Educação. Disponível em: <https://mundoeducacao.uol.com.br/quimica/combustao-completa-incompleta.htm>. Acesso em: 03 dez. 2024.
- G1 Alagoas. **Antes e depois: imagens mostram destruição de prédio que desabou após explosão em Maceió**. 07 nov. 2024. Disponível em: <https://g1.globo.com/al/alagoas/noticia/2024/11/07/antes-e-depois-imagens-mostrar-destruicao-de-predio-que-desabou-apos-explosao-em-maceio.ghtml>. Acesso em: 08 nov. 2024.
- G1 Alagoas. **Vazamento de gás causou explosão em prédio em Maceió que deixou 3 mortos, aponta perícia**. G1, Alagoas, 06 dez. 2024. Disponível em: <https://g1.globo.com/al/alagoas/noticia/2024/12/06/como-se-tivesse-lancado-uma-bomba-de-guerra-diz-perito-sobre-explosao-em-predio-que-matou-3-pessoas-em-maceio.ghtml>. Acesso em: 10 de dez. 2024.
- GARRISON, W. G. **Major fires and explosions analysed for 30-year period. Hydrocarbon Processing**, 1988 apud BJERKETVEDT et al., 1997.
- GESTIS Substance Database. **Base de Dados de Substâncias GESTIS do IFA**. Disponível em: <https://gestis.dguv.de/>. Acesso em: 11 dez. 2024.
- HARRIS, R. J. **The investigation and control of gas explosions in buildings and heating plant**. British Gas and & FN Spon, 1983.
- HINGORANI, R. **Acceptable life safety risks associated with the effects of gas explosions on reinforced concrete structures**. 2017. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) — Universidad Politécnica de Madrid, Madrid, 2017.
- KINNEY, G. F.; GRAHAM, K. J. **Explosive shocks in air**. Springer Science+Business Media, Second Edition, New York, 1985.
- LAMBERT, Karel. **CFBT-instructor course for the Attack Cell**, 2016.
- MORTAR, N. A. M. et al. **Properties and behavior of geopolymer concrete subjected to explosive air blast loading: a review**. MATEC Web of Conferences, v. 97, p. 9, 2017.
- PETROBRAS. **Manual Técnico de Gás Liquefeito de Petróleo**. Rio de Janeiro: Petrobras, 2022. 15 p. Disponível em: <https://petrobras.com.br/pt/assistencia-tecnica/>. Acesso em: 03 dez. 2024.
- SCHMIDT, H. **Versagenswahrscheinlichkeit unbewehrter Wand-Decken-Verbindungen bei Gasexplosionen im Fertigteiltbau**. Technische Universität Darmstadt, 2003.
- SILVA, W. C. L. **Blast – Efeitos da onda de choque no ser humano e nas estruturas**. 2007. 107 f. Tese de Mestrado – Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos.
- SMITH, P. D.; CORMIE, D. et al. **Blast effects on buildings**. 2. ed. London: ICE Publishing, 2009.
- THE GUARDIAN. **Ronan Point: Tower collapse**, May 1968. Disponível em: <https://www.theguardian.com/society/from-the-archive-blog/gallery/2018/may/16/ronan-point-tower-collapse-may-1968>. Acesso em: 01 nov. 2024.
- TNO. **Métodos para o Cálculo dos Efeitos Físicos do Escape de Materiais Perigosos (Líquidos e Gases) - Parte II**. Livro Amarelo, 3ª ed., 1997.
- US ARMY CORPS OF ENGINEERS; NAVAL FACILITIES ENGINEERING COMMAND; AIR FORCE CIVIL ENGINEER SUPPORT AGENCY. **Structures to resist the effects of accidental explosions**. UFC 3-340-02. Supersedes TM 5-1300, nov. de 1990. Washington, DC: US Department of Defense, dez. de 2008.
- VROUWENVELDER, T. **Stochastic modelling of extreme action events in structural engineering**. Probabilistic Engineering Mechanics, v. 15, p. 109-117, 2000. Apud VROUWENVELDER, T. **Chapter V - Accidental Actions on Buildings**. In: Action Effects on Buildings. Handbook 3.