



COPPE/UFRJ

**ANÁLISE DOS EFEITOS DE EXPLOSÕES DE CILINDROS DE HIDROGÊNIO NA
TRANSFERÊNCIA DE REJEITOS LÍQUIDOS RADIOATIVOS EM CENTRAIS
NUCLEARES**

Karina Baldo Lopes

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Nuclear, COPPE, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Engenharia Nuclear.

Orientador: Paulo Fernando Ferreira Frutuoso e
Melo

Rio de Janeiro
Março de 2010

ANÁLISE DOS EFEITOS DE EXPLOSÕES DE CILINDROS DE HIDROGÊNIO NA
TRANSFERÊNCIA DE REJEITOS LÍQUIDOS RADIOATIVOS EM CENTRAIS
NUCLEARES

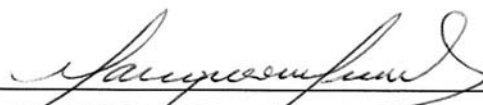
Karina Baldo Lopes

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO INSTITUTO ALBERTO
LUIZ COIMBRA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA DE ENGENHARIA
(COPPE) DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE
DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE
EM CIÊNCIAS EM ENGENHARIA NUCLEAR.

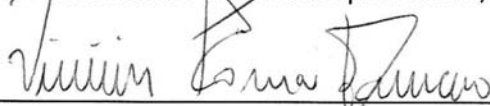
Examinada por:



Prof. Paulo Fernando Ferreira Frutuoso e Melo, D. Sc.



Prof. Antonio Carlos Marques Alvim, Ph. D.



Dr. Vinicius Correa Damaso, D.Sc.

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL

MARÇO DE 2010.

Lopes, Karina Baldo

Análise dos Efeitos de Explosões de Cilindros de Hidrogênio na Transferência de Rejeitos Líquidos Radioativos em Centrais Nucleares/ Karina Baldo Lopes.
– Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2010.

XIII, 69 p.: il.; 29,7 cm.

Orientador: Paulo Fernando Ferreira Frutuoso e Melo
Dissertação (mestrado) – UFRJ/ COPPE/ Programa de Engenharia Nuclear, 2010.

Referencias Bibliográficas: p. 61-62.

1. Explosão Cilindro de Hidrogênio. 2. Sobrepressão.
3. Fragmentos. I. Melo, Paulo Fernando Ferreira Frutuoso.
II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE,
Programa de Engenharia Nuclear. III. Título.

*Aos meus pais, Rosa e Ricardo, e
ao meu esposo, Rodrigo.*

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, Rosa e Ricardo, pela dedicação, incentivo e apoio em todos os momentos de minha vida.

Ao meu esposo, Rodrigo, pela compreensão e por sempre acreditar no meu sucesso.

Ao meu orientador, Prof. Paulo Fernando Ferreira Frutuoso e Melo, pela orientação no desenvolvimento deste trabalho e ensinamentos durante o curso.

Ao Prof. Antonio Carlos Marques Alvim e ao Dr. Vinicius Correa Damaso, pela participação na banca examinadora.

Às Indústrias Nucleares do Brasil S.A, pela oportunidade de desenvolvimento profissional, em particular ao Eng. Alair Veras e ao Dr. Cesar Costa, por terem permitido cumprir esta etapa.

À Eletronuclear Termonuclear S.A., que motivou o interesse pelo tema desta dissertação.

E a todas as pessoas que, de uma forma ou de outra, contribuíram à sua maneira para a realização e conclusão deste trabalho.

Resumo da Dissertação apresentada à COPPE/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Ciências (M.Sc.)

ANÁLISE DOS EFEITOS DE EXPLOSÕES DE CILINDROS DE HIDROGÊNIO NA
TRANSFERÊNCIA DE REJEITOS LÍQUIDOS RADIOATIVOS EM CENTRAIS
NUCLEARES

Karina Baldo Lopes

Março / 2010

Orientador: Paulo Fernando Ferreira Frutuoso e Melo

Programa: Engenharia Nuclear

Este trabalho apresenta um estudo dos efeitos da explosão de um cilindro de hidrogênio estocado sobre o transporte de rejeitos líquidos em centrais nucleares. É realizada a determinação do valor de sobrepressão, assim como a força do fragmento resultante, verificando assim, o principal efeito danoso de uma explosão de nuvem de vapor inflamável, com base no Método TNT Equivalente. Os cenários identificados são calculados e comparados com os alcances de sobrepressão de 1%, 50% e 99% de danos estruturais, estes determinados pelo Modelo de Vulnerabilidade de Eisenberg.

Os resultados mostraram que a sobrepressão e os fragmentos resultantes da explosão de um cilindro de gás hidrogênio não são capazes de ocasionar a capotagem do caminhão-tanque em estudo e que uma distância mínima de 30 metros pode ser considerada uma distância segura entre o cilindro de hidrogênio e este caminhão durante a transferência dos rejeitos radioativos líquidos, na qual a probabilidade de ocorrência de danos estruturais é menor do que 1%.

Abstract of Dissertation presented to COPPE/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science (M.Sc.)

ANALYSIS OF THE EFFECTS OF EXPLOSION OF A HYDROGEN
CYLINDER ON THE TRANSFER OF RADIOACTIVE LIQUID WASTES AT NUCLEAR
POWER STATIONS

Karina Baldo Lopes

March / 2010

Advisor: Paulo Fernando Ferreira Frutuoso e Melo

Department: Nuclear Engineering

This dissertation presents a study of the effects of explosion of a stored hydrogen cylinder on the transfer of radioactive liquid wastes at nuclear power plants. The peak overpressure is calculated, as well as the strength of resulting fragments, thus confirming the main harmful effect of an explosion of flammable vapor cloud, based on the TNT Equivalent Method. The scenarios identified are calculated and compared with the overpressure ranges of 1%, 50% and 99% of structural damages, which were determined by the Eisenberg's Vulnerability Model.

The results show that the overpressure and the resulting fragments from the explosion of a hydrogen gas cylinder are not able to cause the overturning of the tanker under study, and also show that a minimum distance of 30 meters between the hydrogen cylinder and the tanker can be considered a safe distance to the passage of this tanker during the transfer of radioactive liquid waste, in which the likelihood of occurring structural damages is less than 1%.

ÍNDICE

Índice de Figuras	x
Índice de Tabelas	xii
Nomenclatura	xiii
Capítulo 1 – Introdução	1
1.1. Motivação	1
1.2. Análise Histórica	5
1.3. Organização da Dissertação	9
Capítulo 2- Fundamentos Teóricos	10
2.1. Formação da Nuvem de Vapor	10
2.2. Explosão de Gás	11
2.2.1. Combustão da Nuvem	13
2.2.2. Onda de Choque	14
2.2.3. Fragmentos	16
2.3. Método TNT Equivalente	22
2.4. Método Onda de Choque – TNO	26
2.5. Método Multienergia – TNO	28
2.6. Modelo Baker-Strehlow-Tang (BST)	33
Capítulo 3 – Descrição dos Cenários	36
3.1. Características da Substância Seleccionada	36
3.2. Descrição do Empreendimento	38
3.3. Descrição dos Cenários de Acidentes	39

Capítulo 4 – Resultados e Discussão	42
4.1. Efeitos ocasionados pela Sobrepressão	42
4.2. Efeitos ocasionados pelos Fragmentos	45
4.3. Estudo dos Efeitos de Explosões	50
4.3.1. Modelo de Vulnerabilidade de Eisenberg	50
4.3.2. Probabilidade de Dano às Estruturas	52
4.4. Comparação dos Métodos	54
4.4.1. Método TNT Equivalente	54
4.4.2. Método Onda de Choque – TNO	54
4.4.3. Método Multienergia – TNO	55
4.4.3. Modelo Baker-Strehlow-Tang (BST)	56
Capítulo 5 – Conclusões e Sugestões	59
Referências Bibliográficas	61
Apêndice	63

Índice de Figuras

Figura 1	Panorama da Energia Nuclear no Mundo	2
Figura 2	Análise das cem maiores perdas na indústria de processamento de hidrocarbonetos, de 1957 a 1986	4
Figura 3	Variação da pressão e fases de uma onda de choque [8]	15
Figura 4	Velocidade do fragmento <i>versus</i> pressão escalar para vasos cilíndricos contendo gás ideal, onde L_v e d_v são a altura e o diâmetro do vaso, respectivamente [8]	19
Figura 5	Correlação entre a distância normalizada e o pico em sobrepressão normalizada para uma explosão de TNT [10]	23
Figura 6	Nuvem de Vapor Congestionada	29
Figura 7	Gráficos de efeitos normalizados em função da distância normalizada para sobrepressão, pressão dinâmica e duração da fase positiva do método multienergia	32
Figura 8	Curvas de sobrepressão normalizada (adimensional), <i>versus</i> distância normalizada \bar{R} , para serem aplicadas no método BST [11]	35
Figura 9	Vista geral do empreendimento	38
Figura 10	Esquema de forças para análise da possibilidade de capotagem do caminhão devido à sobrepressão decorrente da explosão de um cilindro de H_2	44
Figura 11	Dimensões do caminhão-tanque	45
Figura 12	Velocidade do fragmento vs Pressão escalar para vasos esféricos contendo gás ideal	63
Figura 13	Velocidade do fragmento vs Pressão escalar para vasos cilíndricos com $L_v/d_v=5$ contendo gás ideal	64
Figura 14	Velocidade do fragmento vs Pressão escalar para vasos cilíndricos com $L_v/d_v=10$ contendo gás ideal	65

Figura 15	Velocidade do fragmento vs Pressão escalar para vasos esféricos com ruptura devida a reações químicas fora de controle	66
Figura 16	Velocidade do fragmento vs Pressão escalar para vasos cilíndricos com ruptura devida a reações químicas fora de controle e com $L_v/d_v=5$	67
Figura 17	Velocidade do fragmento vs Pressão escalar para vasos cilíndricos com ruptura devida a reações químicas fora de controle e com $L_v/d_v=10$	68
Figura 18	Previsão de alcance de fragmentos	69

Índice de Tabelas

Tabela 1	Métodos para a estimativa da velocidade do fragmento [8].	17
Tabela 2	Estimativa dos alcances máximos dos fragmentos projetados [1].	21
Tabela 3	Arraste e ascensão de fragmentos [1].	21
Tabela 4	Prejuízos e danos possíveis de ocorrer às instalações e pessoas devido a efeitos de sobrepressão	25
Tabela 5	Definição de valores mencionados nas equações anteriores [8]	28
Tabela 6	Velocidade da chama adequada (número de Mach, M_f) para situação específica [11]	35
Tabela 7	Propriedades físico-químicas do hidrogênio	37
Tabela 8	Distância da explosão versus danos estruturais	43
Tabela 9	Relação entre a variável de Probit e a probabilidade	51
Tabela 10	Relação entre a distância do centro da explosão e a probabilidade de ocorrência de danos estruturais	52
Tabela 11	Picos de sobrepressão necessários para que se tenha a probabilidade de 1%, 50% e 99% de ocorrência de danos estruturais	53
Tabela 12	Distância alcançada versus probabilidade de ocorrência de danos estruturais	53
Tabela 13	Valores de sobrepressão obtidos por diferentes métodos	57

Nomenclatura

AICHE	<i>American Institute of Chemical Engineers</i>
BST	<i>Baker-Strehlow-Tang</i>
BLEVE	<i>Boiling Liquid Expanding Vapour Explosion</i>
CCPS	<i>Center for Chemical Process Safety</i>
ECCS	<i>Emergency Core Cooling System</i>
ETRL1	Estação de Transferência de Rejeitos Líquidos da Unidade 1
ETRL2	Estação de Transferência de Rejeitos Líquidos da Unidade 2
LII	Limite Inferior de Inflamabilidade
LIS	Limite Superior de Inflamabilidade
LOCA	<i>Loss Coolant Accident</i> (Acidente de Perda de Refrigerante)
NEA	Agência de Energia Nuclear
OECD	Organização de Cooperação e de Desenvolvimento Econômico
OSHA	<i>Occupational Safety and Health Administration</i>
PVC	Cloreto de polivinila
SREN	Sistema de Resfriamento de Emergência do Núcleo
TNO	<i>Nederlandse Organisatie voor toegepast-natuurwetenschappelijk onderzoek</i> (Organização Holandesa para a Pesquisa Científica Aplicada)
TNT	Trinitrotolueno (Explosivo químico)
UN1	Unidade Nuclear 1
UN2	Unidade Nuclear 2

Capítulo 1

— Introdução —

1.1. Motivação

A energia elétrica pode ser considerada a maior de todas as inovações tecnológicas produzidas pelo homem, e sem ela não seria possível presenciar o enorme desenvolvimento em diversas áreas do conhecimento humano.

A disponibilidade de energia elétrica representa um incremento na qualidade de vida das populações. No momento em que se implanta um sistema de distribuição de energia elétrica, a população local imediatamente passa a contar com inúmeros benefícios, tanto do ponto de vista de maior conforto doméstico como de mais possibilidades de emprego e produção.

A geração de energia elétrica no Brasil tem crescido a uma taxa anual de 4,2% ao longo dos últimos 25 anos. No Brasil existem atualmente 1.675 empreendimentos em operação, gerando aproximadamente 100 GW de potência elétrica. Está prevista para os próximos anos uma adição de 28 GW na capacidade de geração do País, proveniente dos 107 empreendimentos atualmente em construção e mais 495 outorgados.

A energia elétrica, durante os últimos 25 anos, foi dominada pela hidroeletricidade, atualmente responsável por mais de 80% do total gerado no país. As outras tecnologias de geração elétrica relevantes no país são a térmica nuclear (responsável por cerca de 4% do total gerado hoje), térmica a gás natural (4%), térmica a diesel e a óleo combustível (3%) e a térmica a biomassa (3%). A introdução da biomassa, da energia nuclear e da energia térmica a gás natural reduziu a participação da hidroeletricidade de 92%, em 1980, para os 86% de hoje.

O Brasil, por possuir uma economia em desenvolvimento, apresenta taxas de crescimento acelerado no consumo de energia. Por isso, não poderia desconsiderar a alternativa do uso da tecnologia nuclear.

O desenvolvimento de novas usinas nucleares no mundo esteve estagnado por cerca de 30 anos. Contudo, em anos recentes, o interesse por esta fonte de geração de eletricidade tem crescido, principalmente quando se leva em conta o volume de energia que se pode gerar sem maiores emissões de poluentes, e em um espaço físico reduzido. Utilizando a tecnologia atual, uma tonelada de urânio produz a mesma energia que 10 a 16 mil toneladas de óleo. Com o avanço tecnológico da energia

nuclear, espera-se que esse desempenho seja aprimorado. De acordo com os cenários mais otimistas da Agência de Energia Nuclear (NEA), órgão da OECD, a participação nuclear na geração energética do planeta pode chegar a 22% até 2050, devido ao aumento da demanda de energia em países como China e Índia. Desta forma, nesse período, 1400 reatores estariam em operação, produzindo quatro vezes o montante de energia nuclear gerado hoje.

No mundo, apesar de ser utilizada comercialmente há aproximadamente apenas quatro décadas, a energia nuclear já corresponde a 17% de toda eletricidade produzida, ficando atrás apenas da que têm origem hídrica e a carvão, Figura 1.

Na atualidade, em consequência do efeito estufa (aquecimento da Terra) sobre o clima do planeta e aos avanços alcançados nas medidas de segurança dos 442 reatores nucleares em operação no mundo, a opção nuclear é considerada a preferida por um número cada vez maior de países.

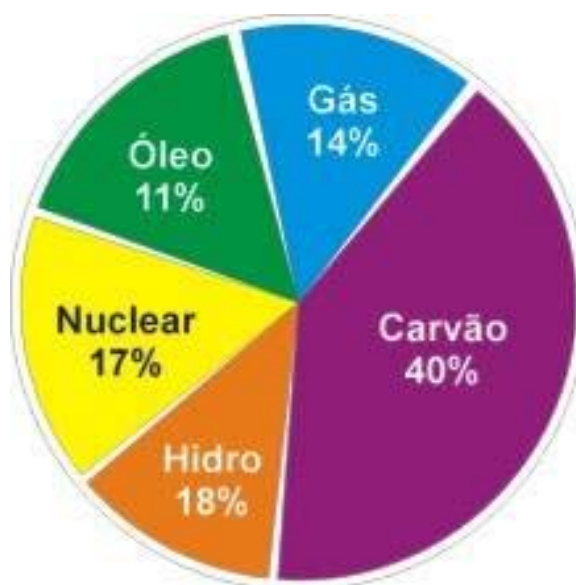


Figura 1 - Panorama da Energia Nuclear no Mundo

Os combustíveis fósseis (petróleo, carvão, etc.) são os principais emissores de gases que causam o efeito estufa, preocupação dos cientistas com relação ao nosso futuro. Outras fontes de energia, como solar ou eólica, são de exploração cara e capacidade limitada, ainda sem utilização em escala industrial. Os recursos hidráulicos também apresentam limitações, além de provocar grandes impactos ambientais. A energia nuclear usada para a produção de energia elétrica (geração nucleoeletrica) é uma das mais limpas, não emite gases causadores (dióxido de carbono (CO₂), metano

(CH₄), óxido nitroso (N₂O), CFC (clorofluorcarbonetos)) de efeito estufa ou chuva ácida, nem metais carcinogênicos, como as alternativas que utilizam combustível fóssil. Torna-se, então, mais uma opção, capaz de atender à demanda energética do mundo moderno com eficácia e especialmente segurança.

Uma das questões importantes na operação de uma usina nuclear é o gerenciamento dos resíduos e rejeitos produzidos por este tipo de atividade.

Os rejeitos são classificados pelo seu teor de radioatividade. Os rejeitos classificados como de baixa radioatividade são materiais utilizados na operação das usinas, como luvas, sapatilhas, roupas especiais, equipamentos e até fitas crepes. Depois de coletados e separados, estes materiais sofrem um processo de descontaminação para reduzir seus níveis de radioatividade. Alguns materiais são triturados e prensados, para ocupar menos espaço, e acondicionados em recipientes que bloqueiam a passagem desta radiação. Os resíduos de média radioatividade, compostos de filtros, efluentes líquidos solidificados e resinas, são acondicionados em uma matriz sólida de cimento ou betume e mantidos dentro de recipientes apropriados de aço. Com o passar do tempo, esses materiais decaem, mas até lá, têm de ser encapsulados e armazenados em depósitos isolados e monitorados.

As plantas nucleares, assim como os centros de pesquisas nucleares, abrigam vários tipos de instalações que produzem ou processam materiais radioativos, bem como substâncias químicas perigosas, normalmente encontradas na indústria química convencional. Um exemplo é o armazenamento de cilindros de gás hidrogênio nas centrais nucleares, o qual é injetado dentro do circuito primário com o objetivo de reagir com o oxigênio, o qual está presente em excesso na atmosfera do circuito, formando água e assim prevenindo a corrosão dos equipamentos e materiais presentes.

Os processos empregados e os materiais manipulados e armazenados representam fontes potenciais de perigo de naturezas diversas como incêndio, explosão, geração de fragmentos e liberação de materiais tóxicos [1].

Garrison [2] analisou as cem maiores perdas na indústria de processamento de hidrocarbonetos, de 1957 a 1986 (Figura 2). Ele descobriu que 42% desses acidentes foram causados por explosões de nuvem de vapor. Na sua classificação explosões de nuvem de vapor incluem explosões de gás dentro de edifícios, bem como no exterior (explosões não confinada). Eventos classificados como explosões constituem 22%. Essas explosões são, provavelmente, reações descontroladas, explosões em sólidos, BLEVE, a perda de contenção, e explosões de gás internamente no processo.

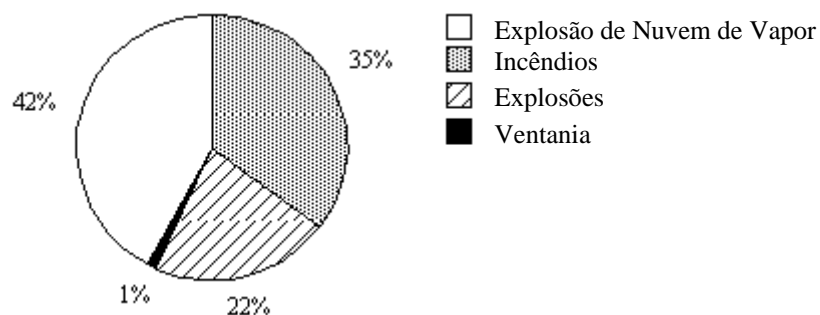


Figura 2. - Análise das cem maiores perdas na indústria de processamento de hidrocarbonetos, de 1957 a 1986 [2].

Observando os detalhes das explosões acidentais individuais que têm acontecido, encontra-se uma grande variedade de magnitudes da explosão.

As causas determinantes para um evento catastrófico podem ser classificadas em uma das seguintes categorias:

- Falha mecânica ou de materiais;
- Corrosão;
- Sobrepressurização;
- Maior fragilização dos tanques de armazenamento em baixas temperaturas;
- Ruptura devido ao impacto de ondas de choque e explosões de mísseis adjacentes;
- Erros humanos.

A partir de registros de acidentes, pode-se depreender que as explosões de gás têm uma tendência a repetir-se em condições semelhantes. Por isso, é importante investigar os acidentes, disponibilizar um relatório dos resultados na literatura aberta e agir de forma corretiva.

Dentro desta ótica, o objetivo deste trabalho é a análise dos efeitos de explosões de cilindros de hidrogênio na transferência de rejeitos líquidos radioativos de baixa atividade em centrais nucleares.

Será realizada a determinação do valor de sobrepressão, assim como a força do fragmento resultante, verificando-se assim, o principal efeito danoso de uma explosão de nuvem de vapor inflamável, com base no Método TNT Equivalente. O

produto selecionado para análise é o hidrogênio. O cenário identificado será calculado e comparado com os alcances de sobrepressão de 1%, 50% e 99% de danos estruturais.

Este estudo está baseado em técnicas para estimar os alcances de uma explosão de um cilindro de hidrogênio, para avaliar se a transferência de rejeitos líquidos radioativos de baixa densidade oferece riscos de vazamento radioativo ao entorno da instalação.

1.2. Análise Histórica

A análise histórica de acidentes tem por objetivo estudar e analisar acidentes ocorridos através da liberação de gases em processos, equipamentos e em áreas confinadas e não confinadas [7].

1.2.1. Lakehurst, New Jersey, 1937

O desastre que ocorreu em *Lakehurst, New Jersey* (EUA) em 6 de maio de 1937 ficou por muitos anos sob investigação, para identificar os motivos que causaram a ignição do gás hidrogênio usado para a flutuação do dirigível *Hindenburg*.

Neste acidente, o incêndio resultante da ignição do hidrogênio avançou rapidamente para a cauda do dirigível e foi sucedido por uma explosão que rapidamente tomou conta do dirigível, fazendo-o cair e matando 36 pessoas.

Os resultados indicam que a camada externa da pintura do dirigível era inflamável e poderia eventualmente gerar faíscas elétricas. Considerando as condições atmosféricas no momento em que ocorreu o acidente, tais faíscas poderiam gerar atividade de descarga eletrostática considerável sobre o dirigível.

A posterior utilização do gás hélio em vez do hidrogênio para a flutuação de dirigíveis resultou em sistemas intrinsecamente seguros.

1.2.2. Port Hudson, Missouri, 1970

Neste acidente, propano líquido foi libertado de um gasoduto. A nuvem de gás fluiu em um vale por cerca de 20 minutos e explodiu violentamente. Começou como

uma explosão interna de uma casa de bombas, a qual conduziu a nuvem não confinada à detonação.

1.2.3. *Flixborough*, 1974

A explosão na fábrica de *Nypro Flixborough* em 1º de junho de 1974 é um dos acidentes mais graves na história da indústria química. A planta foi totalmente destruída, 28 pessoas foram mortas e 36 ficaram feridas no local. Fora da planta, 53 pessoas ficaram feridas e 1821 casas e 167 lojas sofreram danos. O custo dos danos foi superior a 100 mil dólares.

A causa da explosão foi uma liberação de cerca de 50 toneladas de ciclohexano, provavelmente devido à falha de uma tubulação temporária. A combustão da nuvem de gás inflamável ocorreu cerca de 1 minuto após o lançamento. A explosão foi equivalente a uma explosão de cerca de 16 toneladas de TNT. O combustível denso (ciclohexano) foi capaz de formar uma enorme nuvem de gás inflamável e o confinamento e obstruções dentro da fábrica causaram a explosão, com pressões elevadas.

1.2.4. *Berge Istra*, 1975

Em 30 de dezembro de 1975, o navio de óleo e minério *M/S Berge Istra* afundou no Mar das Molucas. Dois tripulantes foram resgatados, os quais relataram a ocorrência de uma série rápida de três explosões seguidas do naufrágio imediato do navio.

Em outubro de 1979, o seu navio irmão, *M/S Berge Vanga*, desapareceu no Oceano Atlântico. Praticamente nada se sabe sobre este incidente e ninguém foi resgatado.

O rápido naufrágio de *Berge Istra* indica que, uma explosão de gás no casco duplo do navio rasgou a sua estrutura e, como consequência, a água inundou a plataforma e a casa de máquinas.

1.2.5. *Brahegatan*, 1983

Em 3 de março de 1983, houve uma explosão de hidrogênio em uma rua em Estocolmo. A onda de choque resultante da explosão quebrou janelas em um intervalo de cerca de 90 m e 16 pessoas ficaram feridas.

O evento ocorreu durante o descarregamento de 18 cilindros que continham cerca de 10 kg de hidrogênio. O hidrogênio começou a vazar dando início à formação de uma nuvem de vapor com subsequente explosão.

1.2.6. *West Vanguard*, 1985

Na noite de 7 de outubro de 1985, um golpe de saída de ar ocorreu em *West Vanguard* quando um equipamento foi perfurado em *Haltenbanken*, Noruega. O gás de escape foi sugado para dentro da sala de máquinas e ocorreu uma explosão muito violenta de gás. A parede lateral da sala de máquinas foi derrubada com o sopro de ar e uma pessoa morreu.

A integridade do equipamento principal não foi seriamente danificada e o restante da tripulação foi resgatado.

1.2.7. *Devnya*, 1986

Ocorreu uma grave explosão, consequência de um incêndio, em uma fábrica de PVC em *Devnya*, Bulgária em 1986. O acidente foi causado por uma falha no tubo. Morreram 17 pessoas, entre elas 8 mulheres que trabalhavam no local.

1.2.8. *Piper Alpha*, 1988

Piper Alpha é o "acidente de *Flixborough*" da indústria *off-shore*. Houve uma pequena explosão de gás em um módulo do compressor, a qual causou incêndios que posteriormente resultaram na ruptura do *riser*. A parte principal da plataforma foi completamente incendiada e 167 pessoas morreram. A sobrepressão resultante da explosão do gás foi estimada em cerca de 0,3 bar .

1.2.9. *Rafnes*, 1988

O incidente em *Rafnes*, na Noruega, em 1988, é conhecido como um grande incêndio. No entanto, o primeiro incidente foi realmente uma explosão de gás. As pessoas sentadas na sala de controle achavam que todo o prédio estava tremendo. Não houve grandes danos devido à explosão, e ninguém ficou ferido. A pressão de explosão foi provavelmente da ordem de 100 mbar.

A fábrica foi projetada com edifícios resistentes. Se a liberação que ocorreu em *Rafnes* tivesse acontecido em uma planta antiga, é muito provável que as conseqüências da explosão do gás seriam completamente diferentes.

1.2.10. *Pasadena, Houston, 1989*

Em 23 de outubro de 1989, em *Pasadena, Houston* (EUA), uma maciça e destrutiva explosão de nuvem de vapor de hidrogênio ocorreu em uma fábrica de polietileno, causando a morte de 22 pessoas, ferimentos em 100 pessoas e danos à planta inteira.

O poder da explosão foi calculado como o equivalente a 2,4 toneladas de TNT. O acidente foi resultante da liberação do gás durante a manutenção de uma linha de processo. A OSHA cita inúmeros defeitos na gestão de instalação desta fábrica, dentre eles a falta de uma análise de riscos, a falta de um sistema de licenciamento eficaz para controle das atividades de manutenção, bem como a concepção errada de construir entradas de ventilação, de modo que em caso de liberação de gases da unidade de processo, o gás de escape poderia ficar preso em edifícios adjacentes e distância de segurança inadequada entre a sala de controle e o reator, a qual não permitiu encerrar as ações de emergência e evacuação do pessoal durante a liberação de vapor inicial.

1.2.11. *Hanau, Frankfurt, 1991*

Em 1991, em *Hanau, Frankfurt* (Alemanha), um tanque de hidrogênio sob pressão de 45 bar explodiu sem razão aparente, enquanto estava armazenado na parte externa de uma planta industrial.

A onda de choque e os mísseis da estrutura do reservatório causaram grandes danos na unidade. As investigações mostraram que a soldagem no tanque metálico sofreu rachaduras extensas do lado interno para o externo. Sob a influência do hidrogênio, as rachaduras cresceram muito mais rápido do que o normal levando à falha do material com subsequente explosão.

Como resultado, todos os tanques iguais ao do acidente foram verificados e foram estabelecidos novos métodos de teste para a detecção de fissuras nas fases iniciais durante a operação. Sem dúvida, este acidente contribuiu para a melhoria da segurança dos tanques de hidrogênio.

1.2.12. Outros acidentes

Os acontecimentos acidentais para os quais a disponibilidade de dados é limitada são:

- Falha no encanamento pressurizado de hidrogênio seguido de ignição por faísca e posterior incêndio com 8 feridos e 7 mortes (EUA, 1989);
- Explosão de hidrogênio e posterior incêndio em uma unidade de hidrogenação de uma refinaria com 8 feridos e 9 mortes (Japão, 1992);
- Explosão de hidrogênio em uma usina com 19 feridos e 2 mortes (*Hong Kong*, 1992);
- Explosão de nuvem de hidrogênio durante a manutenção resultando em 4 ferimentos (Rússia, 1993);
- Incêndio de hidrogênio em uma unidade de dessulfuração resultando em 2 ferimentos (Japão, 1994);
- Explosão de hidrogênio e posterior incêndio após a ruptura do tubo de transmissão, apenas com perdas econômicas (EUA, 1996).

1.3. Organização da Dissertação

É apresentada, no Capítulo 2, a revisão bibliográfica juntamente com os fundamentos teóricos. No Capítulo 3 é feita a caracterização da substância selecionada e também a descrição dos cenários de acidentes. Um estudo dos efeitos resultantes da explosão de um cilindro de hidrogênio é realizado no Capítulo 4, seguido das conclusões e sugestões descritas no Capítulo 5. As referências bibliográficas consultadas e mencionadas ao longo da dissertação são listadas em seguida.

Capítulo 2

— Fundamentos Teóricos —

Serão apresentadas as etapas do processo que dão origem a uma explosão de nuvem de gás, decorrente de uma liberação acidental desde a formação da nuvem até a sua queima. E uma revisão dos principais métodos disponíveis atualmente para determinar a distribuição espacial e temporal da pressão produzida por uma explosão.

2.1. Formação da Nuvem de Vapor

A formação de uma nuvem inflamável pode ser uma consequência de um vazamento de gás ou líquido volátil, proveniente de um tanque de processo, armazenagem ou de transporte e até mesmo de linhas de transferência, como, por exemplo, o rompimento de um duto, conexão ou válvula. Os vazamentos acidentais podem ser classificados como contínuos ou instantâneos, e o processo pelo qual ocorre o espalhamento da nuvem, enquanto esta se dilui na atmosfera, é denominado de dispersão atmosférica [3].

Com relação ao tempo de duração de um vazamento, o vazamento instantâneo caracteriza-se por ser uma liberação que ocorre num curto espaço de tempo, como por exemplo, o rompimento de um reservatório isolado onde a massa total nele contida formaria a nuvem; normalmente, rupturas catastróficas são consideradas como vazamentos instantâneos. Já os vazamentos contínuos têm uma liberação mais duradoura quando comparados aos instantâneos e podem ter sido gerados por uma ruptura de uma tubulação de alimentação e de distribuição, seja de gás ou de líquido, sendo a sua massa liberada dependente do tempo de duração entre o início do vazamento, sua detecção e término, seja por esgotamento ou estancamento por uma válvula de controle. É importante salientar que os vazamentos contínuos podem ser constantes e transientes [4].

Os vazamentos instantâneos normalmente apresentam maiores concentrações de produto ao longo de uma nuvem quando comparados com vazamentos do tipo contínuo. As nuvens geradas por vazamentos instantâneos apresentam também dimensões maiores que aquelas geradas pelos vazamentos contínuos (nas mesmas condições), uma vez que envolvem taxas de liberações de massas maiores. Isso significa que a população circunvizinha à planta em estudo poderá ser exposta a altas

concentrações de um produto em um curto período de tempo. No entanto, no caso contínuo esta mesma população ficará exposta a concentrações menores, porém durante um tempo maior de exposição.

O processo pelo qual ocorre a dispersão atmosférica depende do tempo que a substância liberada na forma de gás leva para se diluir na atmosfera antes de entrar em ignição. Este fenômeno também pode ser um fator determinante da forma de ocorrência da explosão, uma vez que a mistura com o ar só se torna inflamável se a concentração do combustível se encontrar entre os limites inferior (L.I.I.) e superior (L.S.I.) de inflamabilidade. Nos processos de dispersão com vazamentos contínuos e constantes, tem-se a formação de nuvens uniformes após certo período de tempo e, para os vazamentos contínuos e transientes, têm-se nuvens disformes até que a massa adicionada à nuvem seja compensada pela massa dispersada na atmosfera, ou seja, atinja o seu tamanho de equilíbrio; após este período de compensação, a nuvem disforme se torna constante.

A dispersão de uma nuvem depende também de suas características físico-químicas e do ambiente, tais como a densidade do gás, temperatura ambiente, velocidade e direção do vento na região onde se tem o vazamento, classe de estabilidade atmosférica, confinamento e obstruções ao escoamento da nuvem [4].

2.2. Explosão de um gás

Diversos conceitos, para explosão de um gás, são encontrados na literatura. Uma explosão pode ser definida como uma violenta e repentina liberação de energia [5], ou então, como uma rápida expansão de um gás pressurizado em que a energia resultante da liberação é dissipada na forma de onda de choque [4].

Os gases liberados, por exemplo, nitrogênio, oxigênio, hidrogênio, dióxido de carbono e vapor d'água, expandem-se em altíssimas velocidades provocando o deslocamento do ar circunvizinho, acarretando o aumento da pressão acima da pressão atmosférica (sobrepessão) [6].

Podem ocorrer dentro de equipamentos de processo ou de tubulações, em edifícios ou módulos *offshore*, em áreas de processo aberto ou em áreas não confinadas.

O fenômeno ocorre com uma liberação de energia em um volume reduzido e em um intervalo de tempo muito curto, resultando numa expansão súbita contra o ar atmosférico com um aumento de pressão na região de ocorrência, que tem como

conseqüência a geração de uma onda de pressão. Entretanto, quando a queima da nuvem é feita de forma lenta e progressiva, tem-se um incêndio em nuvem ou *flash fire*, que se dá usualmente em regiões não confinadas e desobstruídas, gerando sobrepressão desprezível.

Em uma explosão, o aumento de pressão pode ocorrer de diversas formas:

- a) Pela depressurização de gás armazenado a uma pressão suficientemente acima da atmosférica;
- b) Pela expansão dos gases resultantes da combustão rápida de uma mistura explosiva;
- c) Pela liberação de energia proveniente de uma reação química ou nuclear;
- d) Por mudança de fase de gás liquefeito ou de líquido pressurizado em temperatura acima do seu ponto de ebulição.

O que diferencia uma explosão de um incêndio com geração de onda sonora é a forma como se dá essa liberação de energia. Se a energia acumulada por um gás sob pressão em um reservatório for lenta e progressivamente liberada por um vazamento, o máximo que se obterá será o som produzido pela onda de pressão resultante. Já se o reservatório perder repentinamente a sua integridade e liberar o gás quase instantaneamente, a onda de pressão produzida não será mais uma onda sonora e sim uma onda de choque de pressão. Esta onda de choque de pressão viajará a uma velocidade igual ou superior à do som no gás não perturbado, atingindo pessoas presentes na região e causando danos a toda e qualquer estrutura próxima ao local onde a explosão ocorreu.

Existem três tipos básicos de fontes de liberação de energia que podem ocorrer no processo explosivo: energia mecânica, química e nuclear. A energia mecânica é caracterizada como energia de pressão no caso de gases, energia de tensões em metais, elétrica e térmica [5]. Podem-se citar como exemplos de explosões formadas por liberação de energia mecânica, uma explosão de um vaso devido à elevada pressão em que o gás se encontra e uma súbita ruptura de um vaso originada por uma fratura frágil. Fontes de energia química derivam das reações químicas. Explosões com liberação violenta de energia química são, por exemplo, aquelas que ocorrem em nuvens devido à combustão de um gás inflamável. Explosões com liberação de energia nuclear são resultantes de reações de fissão ou fusão não controladas.

2.2.1. Combustão da Nuvem

Para um gás ou vapor inflamável queimar é necessário que exista, além da fonte de ignição, uma mistura chamada "ideal" entre o ar atmosférico (oxigênio) e o gás combustível. A quantidade de oxigênio no ar é praticamente constante, em torno de 21 % em volume. Já a quantidade de gás combustível necessário para a queima, varia para cada produto e está dimensionada através de duas constantes : o Limite Inferior de Inflamabilidade (ou explosividade) (LII) e o Limite Superior de Inflamabilidade (LSI).

O LII é a mínima concentração de gás que, misturada ao ar atmosférico, é capaz de provocar a combustão do produto, a partir do contato com uma fonte de ignição. Concentrações de gás abaixo do LII não são combustíveis, pois nesta condição, tem-se excesso de oxigênio e pequena quantidade do produto para a queima. Esta condição é chamada de mistura pobre. Já o LSI é a máxima concentração de gás que misturada ao ar atmosférico é capaz de provocar a combustão do produto, a partir de uma fonte de ignição. Concentrações de gás acima do LSI, não são combustíveis pois, nesta condição, tem-se excesso de produto e pequena quantidade de oxigênio para que a combustão ocorra, é a chamada mistura rica.

Para que aconteça a reação de combustão, necessita-se de uma energia de ativação mínima para iniciar a reação e também para que esta se propague pela nuvem. A energia de ativação permite que os reagentes da mistura alcancem a temperatura de ignição, ou até mesmo uma temperatura maior, variando de acordo com o tipo de combustível e a concentração em que este se encontra na mistura. Assim, quanto menor for a energia de ativação mínima para ocorrer a combustão, mais reativo é o combustível [4].

Na propagação da reação na fração não queimada, seja induzida termica ou mecanicamente, podem ser constatados dois processos de queima de vapor: a deflagração e a detonação.

Chama-se deflagração o processo de queima em que a frente da chama se propaga com velocidade subsônica na direção da mistura não queimada, limitada pela difusão molecular de calor e massa [7]. Ocorre em reações realizadas a baixas pressões, não sendo superiores a 2 atm, em caso de ausência de confinamento [4].

Por se propagar a uma velocidade baixa, a frente da chama é classificada como frente laminar. A deflagração também pode se tornar turbulenta em condições especiais, ocorrendo a transição para a detonação.

A detonação é o processo de queima em que a frente da chama viaja acima da velocidade do som, onde a reação explosiva ocorre pela passagem de onda de choque na direção da mistura não queimada. Devido ao fato da queima ser realizada a uma velocidade alta, tem-se a geração de picos de sobrepressão elevados.

A transição da deflagração para uma detonação surge quando há fatores que induzem a turbulência e aumentam a velocidade de propagação da chama, como a presença de obstáculos no volume ocupado pela mistura e o grau de confinamento [5].

A velocidade na detonação é uma função da velocidade da onda de choque que a precede e viaja acima da velocidade do som e é influenciada pelos seguintes fatores: características químicas do combustível, onde a velocidade é proporcional à reatividade da substância; a proporção da mistura, em que a velocidade é máxima para misturas estequiométricas; o tipo de frente da chama, sendo que frentes turbulentas têm velocidades maiores, pois há a formação de vórtices que causam aumento da área de troca térmica, aumentando por consequência a quantidade de mistura queimada; o confinamento, no qual há restrições no sentido da propagação da chama, aumentando a pressão; e obstruções, que geram frentes turbulentas que são mais comuns em regiões congestionadas, por exemplo, a presença de tubulações e equipamentos na região ocupada pelo volume da mistura.

A maioria dos hidrocarbonetos sofre apenas deflagração, ou seja, gera picos de baixa pressão, e a maior parte da energia disponível se transforma em energia térmica (96-97%), enquanto que uma pequena fração é convertida em ondas de choque (sobrepressão). Já com o TNT ocorre o processo inverso.

A Ref. [6] sugere que substâncias com tripla ligação em sua estrutura química ou com uma ampla faixa de inflamabilidade apresentam maior tendência em gerar detonações; entre elas podem-se citar: acetona, acetileno, benzeno, clorofórmio, ciclohexano, dietiléter, etileno, hidrogênio, metanol, tricloroetileno e outros.

2.2.2. Onda de choque

Sempre que se produz um aumento súbito de pressão na atmosfera, tem-se a formação de uma onda de pressão que se propaga no meio. De acordo com a intensidade da geração da onda, ela pode ser classificada em dois tipos: as ondas de compressão, em que ocorre apenas um aumento progressivo da pressão e ondas de choque, onde há um aumento abrupto da pressão com deslocamento a velocidades superiores à do som. Como a velocidade do som é dependente da razão entre as capacidades caloríficas do gás à pressão e volume constante, C_p/C_v , e da

temperatura, a velocidade de propagação da onda também é dependente destes parâmetros.

As ondas de choque são caracterizadas como um aumento súbito de pressão em áreas adjacentes à explosão com um tempo de duração de 1 a 5 milissegundos e de espessura da ordem do livre caminho médio das moléculas no ar de 10^{-8} m [7]. A Figura 3 apresenta o comportamento da pressão de uma onda de choque que seria observada em um ponto a uma dada distância do centro da explosão de uma nuvem de vapor inflamável.

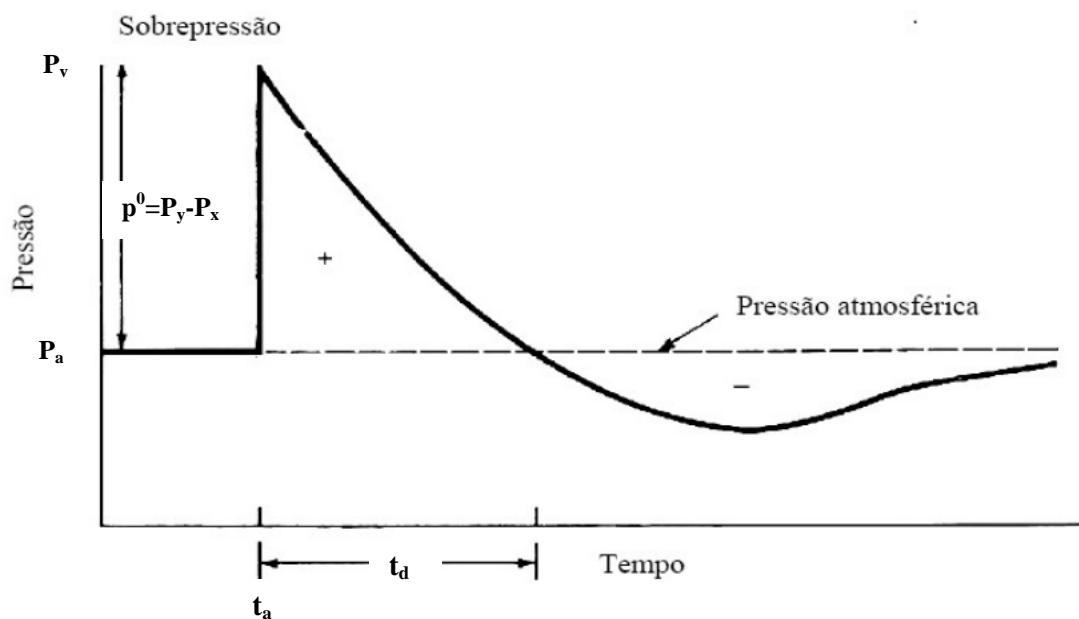


Figura 3 - Variação da pressão e fases de uma onda de choque [8].

Os parâmetros da onda de choque apresentada na Figura 3 são:

- Pico de sobrepessão (p_0) – é o valor máximo que a pressão resultante da explosão atinge acima da pressão atmosférica.
- Período de pressão subatmosférica – período em que o valor da pressão da onda de choque é menor que o da pressão atmosférica. Ocorre devido à inércia dos gases em expansão. Também chamado de fase negativa da onda.
- Tempo de duração da fase positiva (t_d) – é o tempo da passagem da onda de choque do ponto em estudo até o instante em que o valor da pressão atinge a pressão atmosférica.
- Tempo de chegada (t_a) – é o tempo transcorrido desde o início da ignição até que

a onda chegue ao ponto em estudo.

2.2.3. Fragmentos

Na maioria das instalações industriais existem tubulações e vasos, sistemas fechados, que contêm gases sob alta pressão ou líquidos superaquecidos. Uma explosão em tal sistema pode produzir uma fragmentação do confinamento e assim gerar fragmentos. Estes podem causar, diretamente, ferimentos a pessoas ou danos às estruturas. Ademais, eles podem aumentar os efeitos dos acidentes por destruir ou desativar equipamentos circundantes do processo e assim iniciar os acidentes.

A energia de explosão na ruptura de um vaso é uma função da pressão inicial, que, por sua vez, depende da falha do cenário. Quanto maior for a pressão, maior a explosão. As causas da explosão de um vaso podem ser:

- sobrepessão (por exemplo: enchimento ou aquecimento em combinação com a falha da válvula de alívio de pressão);
- falha mecânica (por exemplo, devido a defeitos ou enfraquecimento causado pela fragilização, corrosão);
- imersão em um incêndio.

A Ref. [9] apresenta uma análise da ruptura de vasos cilíndricos pressurizados, em que se analisa tanto o número médio de fragmentos como também a massa média.

A distribuição de massa de fragmentos oriundos da ruptura de um vaso cilíndrico segue uma distribuição beta de probabilidade, dada por [9]:

$$f(x) = \frac{\Gamma(a+b)}{\Gamma(a) \cdot \Gamma(b)} \cdot x^{a-1} \cdot (1-x)^{b-1} \quad (1)$$

em que x é a fração da massa de cada fragmento. Os parâmetros da distribuição são dados por:

$$a = 0,41213$$

$$b = 1,3926$$

A média (ou valor esperado) da distribuição, $E(x)$, é dada por:

$$E(x) = \frac{a}{a+b} \quad (2)$$

A metodologia do TNO [8] apresentada em seguida permite calcular a velocidade do fragmento, assim como seu alcance máximo. Podem ser tratadas tanto as falhas dos vasos contendo gases pressurizados como líquidos pressurizados superaquecidos. Métodos diferentes são usados conforme a forma em que a energia interna é liberada e transformada em energia mecânica.

2.2.3.1. Velocidade inicial do fragmento

O cálculo da velocidade do fragmento é feito conforme um dos métodos apresentados na Tabela 1.

Tabela 1 – Métodos para a estimativa da velocidade do fragmento [8].

Tipo de Explosão	Método
Estimativa grosseira para todo tipo de explosão de vasos, com exceção de decomposição de materiais energéticos.	Método da Energia Cinética
Explosão física de vaso pressurizado	Métodos de Baker e/ou de Gel'fand
Reação descontrolada, explosão interna.	Método de Gel'fand
BLEVE	Fórmula empírica de Baum
Para pressões escalares altas e decomposição de materiais energéticos.	Relação empírica de Moore

De acordo com a Tabela 1, para uma explosão física de vaso pressurizado podem ser usados o Método da Energia Cinética, Método de Baker e o Método de Gel'fand, sendo que o primeiro é uma estimativa grosseira para todo o tipo de explosão em vasos.

A seguir, são descritos os passos da metodologia TNO para o cálculo da velocidade inicial do fragmento, v_i .

Passo 1: Cálculo de uma estimativa aproximada da velocidade inicial do fragmento, v_i , através do Método da Energia Cinética para gases ideais.

$$E_{disp} = \frac{(p_1 - p_a) \cdot V_g}{\gamma_1 - 1} \quad (3)$$

onde:

E_{disp} = energia liberada/expansão do gás comprimido [J];

p_1 = pressão absoluta do gás no momento da explosão [Pa];

p_a = pressão atmosférica [Pa];

V_g = volume preenchido pelo gás no vaso [m³];

γ_1 = razão dos calores específicos do gás [-].

$$v_i = \sqrt{\frac{2 \cdot A_{cin} \cdot E_{disp}}{M_v}} \quad (4)$$

onde:

M_v = massa total do vaso vazio [kg];

A_{cin} = fração da energia liberada transformada em energia cinética [J];

Limite superior $A_{cin} = 0,6$

Estimativa grosseira $A_{cin} = 0,2$

BLEVE $A_{cin} = 0,04$

Passo 2: Cálculo da velocidade inicial do fragmento, v_i , usando o Método de Baker e/ou Gel'fand.

a) Cálculo da velocidade do som no gás, a_1 [m/s],

$$a_1^2 = \frac{T_g \cdot \gamma_1 \cdot R}{\mu_1} \quad (5)$$

onde:

T_g = temp. absoluta interna no vaso no momento da explosão [K];

γ_1 = razão dos calores específicos do gás;

R = constante universal dos gases [J/mol . K];

μ_1 = massa molecular [kg/mol].

b) Cálculo da sobrepressão escalar adimensional, \bar{P}_1 ,

$$\bar{P}_1 = \frac{(p_1 - p_a) \cdot V_g}{(M_v \cdot a_1^2)} \quad (6)$$

c) Obter v_i através da Figura 4.

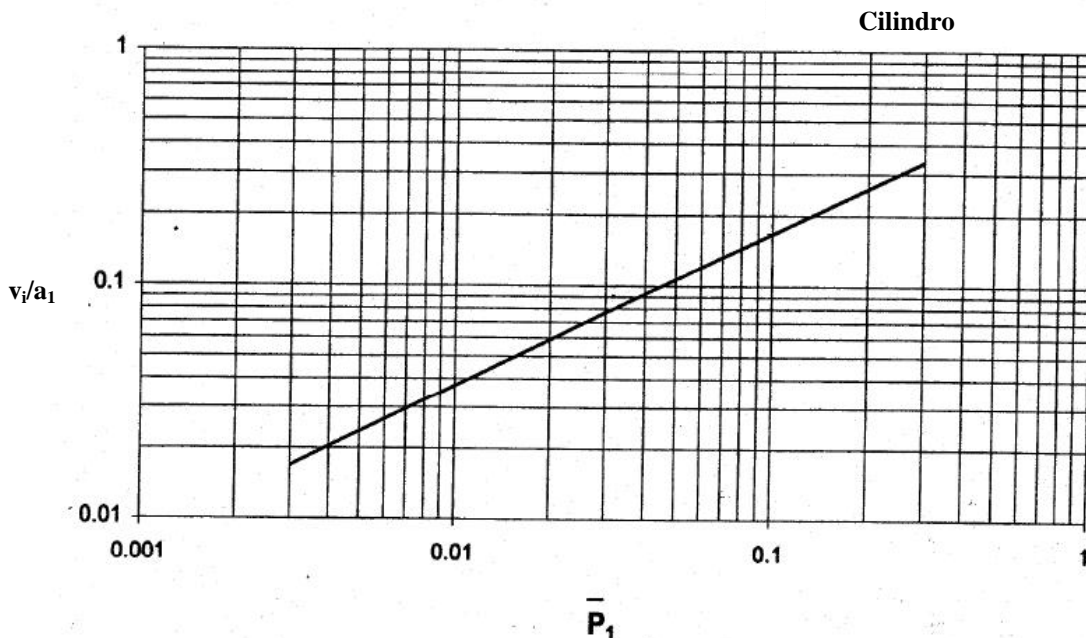


Figura 4 – Velocidade do fragmento *versus* pressão escalar para vasos cilíndricos contendo gás ideal, onde L_v e d_v são a altura e o diâmetro do vaso, respectivamente [8]

Os gráficos adequados de acordo com a forma do vaso (esférico ou cilíndrico) e a relação L_v/d_v onde L_v e d_v são o comprimento e o diâmetro do vaso respectivamente, encontram-se no Apêndice [1].

Passo 3: Verificar através do Método de Moore.

$$v_i = 1,092 \cdot \left(\frac{E_{disp} \cdot A_M}{M_v} \right)^{0,5} \quad (7)$$

Para vasos cilíndricos:

$$A_M = \frac{1}{1 + \frac{M_c}{2 \cdot M_v}} \quad (8)$$

onde:

E_{disp} = energia liberada/expansão do gás comprimido [J];

M_v = massa do vaso vazio [kg];

M_c = massa do gás no vaso [kg].

Verificar v_i , com os valores calculados com outros métodos. Se a velocidade inicial, v_i , calculada anteriormente, for maior que a obtida pela fórmula empírica de Moore, o valor desta velocidade será superestimado. Usar o valor obtido com a equação de Moore. Caso contrário, usar o valor calculado anteriormente.

2.2.3.2. Avaliação do alcance máximo, $R_{fmáx}$, dos fragmentos projetados

Após o fragmento ter sido acelerado até certa velocidade, as forças atuando nele são as de gravidade e da dinâmica do fluido (ascensão e arraste). Estas forças determinam a distância que o fragmento pode alcançar. Os passos a serem seguidos para os cálculos através deste método encontram-se nas tabelas 2 e 3.

Tabela 2 – Estimativa dos alcances máximos dos fragmentos projetados [1].

Passos	Equações	Dados necessários
① Velocidade inicial escalar \bar{v}_i	$\bar{v}_i = \frac{\rho_a C_D A_D v_i^2}{M_f g} [-]$	ρ_a = densidade do ar ambiente [kg/m ³] v_i = velocidade inicial [m/s] M_f = massa do fragmento [kg] g = aceleração da gravidade [m/s ²] C_D = Coeficiente de arraste [-] A_D = área exposta num plano perpendicular à trajetória [m ²] $C_D A_D$ - Tabela 3
② Obter o alcance máximo escalar \bar{R}_f através da Figura 18	-	C_L = Coeficiente de ascensão [-] A_L = área exposta num plano paralelo à trajetória [m ²] d_v = diâmetro do fragmento [m] L_v = comprimento do fragmento [m]
③ Alcance máximo $R_{f \max}$	$R_{f \max} = \frac{\bar{R}_f M_f}{\rho_a C_D A_D} [-]$	ρ_a = densidade do ar ambiente [kg/m ³] $R_{f \max}$ = alcance máximo [m] M_f = massa do fragmento [kg] C_D = Coeficiente de arraste [-] A_D = área exposta num plano perpendicular à trajetória [m ²] $C_D A_D$ - Tabela 3

Tabela 3 – Arraste e ascensão de fragmentos [1]

Forma	$C_D A_D$	$C_L A_L / C_D A_D$
Placa (com rotação)	0,585 x A_{placa}	0
Placa (sem rotação, face para cima)	1,17 x A_{placa}	0
Placa (sem rotação, borda para cima)	0,1 x A_{placa}	0 a 10 ⁽¹⁾
Semiesfera (com rotação)	0,615 x $\pi/4$ x d_v^2	0
Semiesfera (sem rotação)	0,47 x $\pi/4$ x d_v^2	0
Meio tanque (projeção vertical)	0,47 x $\pi/4$ x d_v^2	0
Cilindro (borda para cima)	1,20 x d_v x L_v	0
Tira (com rotação)	0,99 x A_{tira}	0

2.3. Método do TNT Equivalente

Este método foi o pioneiro na previsão de efeitos de explosões de nuvem de vapor. Ele se baseia na comparação do potencial da mistura explosiva estudada com uma massa de TNT que seria necessária para causar efeitos semelhantes, visto que o TNT já possui diversas representações gráficas e analíticas para o levantamento dos parâmetros. Foi desenvolvido a partir do grande volume de dados obtidos experimentalmente em testes de equipamentos militares e dados de resultados destrutivos de bombardeios ocorridos durante períodos de guerra.

A massa de TNT (M_{TNT}) equivalente é definida por:

$$M_{TNT} = \frac{M_{gás} \cdot \eta \cdot \Delta H_{c(gás)}}{\Delta H_{c(TNT)}} \quad (9)$$

onde:

η = eficiência de explosão;

$M_{gás}$ = massa total de gás inflamável [kg];

$\Delta H_{c(gás)}$ = calor de combustão do gás inflamável [kJ/kg];

$\Delta H_{c(TNT)}$ = calor de combustão do TNT [kJ/kg].

Assim, sabendo-se a massa de gás inflamável que entrou em combustão, os calores de combustão e estimando-se um valor de η , calcula-se a massa equivalente de TNT. Tal eficiência está entre 1 e 10% [5].

A eficiência de explosão é um dos principais problemas deste método. É usada para ajustar a estimativa de uma série de fatores, incluindo a mistura incompleta do ar com o material combustível e a conversão incompleta de energia térmica em energia mecânica.

Este modelo é baseado em uma lei empírica, com uma série de ensaios usando explosivos. Esta lei estabelece efeitos equivalentes para explosões que ocorrem em uma mesma distância em escala, expressa em:

$$z_e = \frac{d}{(M_{TNT})^{\frac{1}{3}}} \quad (10)$$

onde:

z_e = é a função normalizada ou a distância normalizada [$m/kg^{1/3}$];

d = distância real [m];

M_{TNT} = massa equivalente de TNT [kg]

A Figura 5 apresenta uma correlação entre a sobrepressão normalizada, p_s , adimensional em função da distância normalizada em $m/kg^{1/3}$.

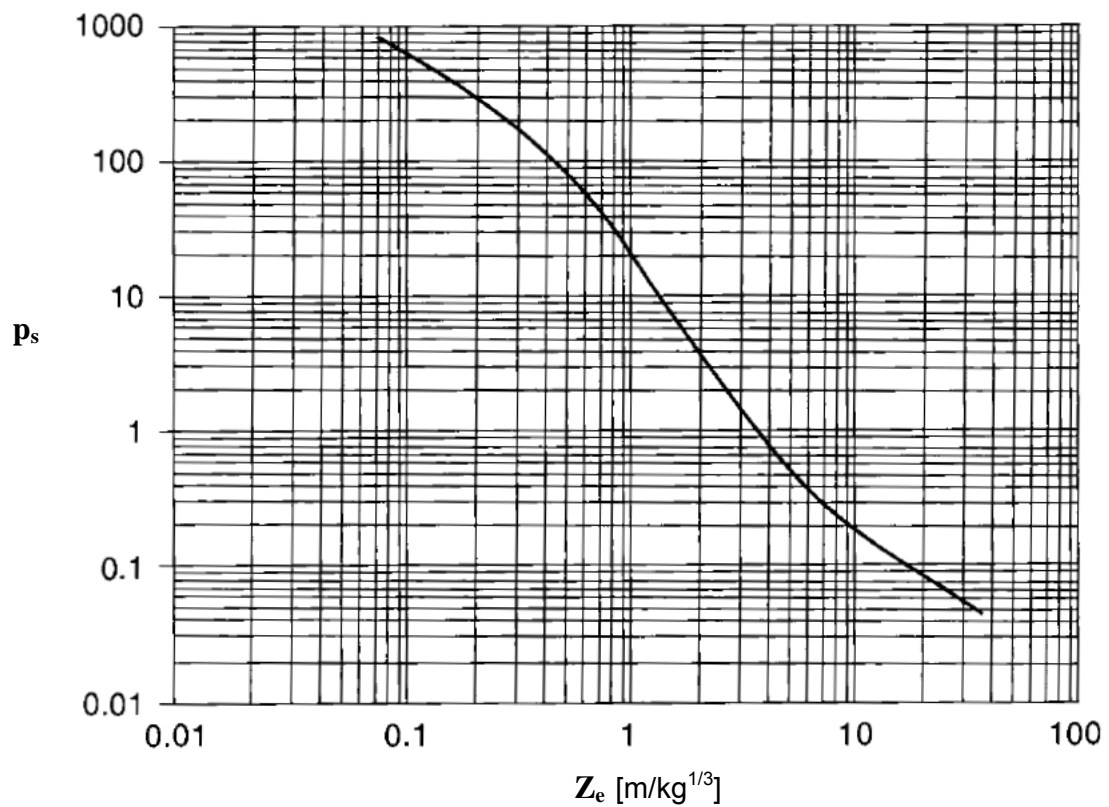


Figura 5 – Correlação entre a distância normalizada e o pico de sobrepressão normalizada para uma explosão de TNT [10]

A sobrepressão normalizada é dada por:

$$p_s = \frac{p_0}{p_a} \quad (11)$$

onde:

p_s = sobrepressão normalizada [adimensional];

p_0 = sobrepressão estimada [Pa];

p_a = pressão atmosférica [Pa];

Os dados obtidos através da Figura 5 são válidos somente para explosões de TNT que ocorrem em uma superfície plana. Para explosões ao ar livre, bem acima do solo, os resultados da sobrepressão resultantes da Figura 5 devem ser multiplicados pelo fator 0,5. Os dados da Figura 5 também são representados pela seguinte correlação (12):

$$\frac{p_0}{p_a} = \frac{1616 \left[1 + \left(\frac{z_e}{4,5} \right)^2 \right]}{\sqrt{1 + \left(\frac{z_e}{0,048} \right)^2} \cdot \sqrt{1 + \left(\frac{z_e}{0,32} \right)^2} \cdot \sqrt{1 + \left(\frac{z_e}{1,35} \right)^2}} \quad (12)$$

onde:

p_0 = sobrepressão estimada [Pa];

p_a = pressão atmosférica [Pa].

Com base na Ref. [10], a Tabela 4 apresenta uma relação entre os valores de sobrepressão e os prejuízos e danos possíveis de ocorrer às instalações.

Tabela 4 - Prejuízos e danos possíveis de ocorrer às instalações e pessoas devido a efeitos de sobrepressão [10].

Sobrepressão (KPa)	Dano Esperado
0,14	Estrondo alto (137 dB de frequência baixa, 10-15 Hz).
0,21	Quebra ocasional de janelas grandes, que já estão sob tensão.
0,28	Estrondo alto (143 dB); Quebra de vidros.
0,69	Quebra de janelas pequenas sob tensão.
1,03	Pressão típica nas trincas dos vidros.
2,07	“Distância segura” (probabilidade de 95% de não ocorrer dano sério além desta área); Alguns danos nos tetos das casas; Quebra de 10% dos vidros das janelas; Limite de estilhaços.
2,76	Limite inferior de dano estrutural.
3,4 – 6,9	Pequenas e grandes janelas são normalmente destruídas, e algumas destas têm a armação danificada.
4,8	Pequenos danos nas estruturas das casas.
6,9	Demolição parcial das casas, as quais ficarão inabitáveis.
6,9 – 13,8	Destruição de asbestos corrugados; Falha nas amarras das chapas de aço ou painéis de alumínio, seguida de deformação; Destruição da amarração dos painéis (tábuas) de madeira das casas comuns.
9,0	Leve distorção da armação de aço dos edifícios fechados.
13,8	Colapso parcial das paredes e telhados das casas.
13,8 – 20,7	Destruição das paredes de concreto ou de blocos não reforçados.
15,8	Limite inferior de sérios danos nas estruturas.
17,2	Destruição de 50% das casas de alvenaria.
20,7	Distorções das construções com armação de aço, que são movidas das fundações; Pequenos danos em máquinas pesadas (1360 kg), nos edifícios industriais.
27,6	Leve ruptura dos revestimentos de construções industriais
34,5	Destruição das áreas arborizadas; Leves danos com grandes prensas hidráulico (18200 kg) no interior das construções.
34,5 – 48,2	Destruição quase total das casas.
48,2	Tombamento dos vagões de trens carregados.
48,2 – 55,1	Trinca de tijolos não reforçados de 20 – 30 cm de espessura por tensão de cisalhamento.
62,0	Demolição de vagões fechados de trens.
68,9	Provável destruição total de construções; Partes pesadas de máquinas (3200 kg) se movem e ficam muito danificadas; Partes muito pesada de máquinas resistem.
2068	Limite da borda de cratera.

Apesar das limitações, devido à sua natureza simplificada, o modelo TNT Equivalente ainda é largamente utilizado para a predição de sobrepressões a uma dada distância do centro de uma explosão [11].

2.4. Método da Onda de Choque – TNO

Seguindo a evolução dos métodos preditivos, surgiu o Método da Onda de Choque – TNO sendo um método apropriado para explosões de gases [12]. Este método considera que a nuvem de vapor pode ser simulada como sendo hemisférica e homogênea, com mistura estequiométrica e com sua ignição ocorrendo em seu centro. Uma grande vantagem em relação ao método anteriormente citado é a reprodução mais fiel do comportamento da explosão a pequenas distâncias do centro da nuvem.

Para o cálculo das variáveis significativas da explosão deve-se adotar inicialmente uma categoria de reatividade do gás, arbitrando uma velocidade média em função da categoria adotada e outros fatores que afetem a velocidade de propagação da frente da chama.

Nota-se que o parâmetro arbitrado para avaliar a intensidade da explosão passou a ser a reatividade do gás em lugar do rendimento usado no Método TNT Equivalente, o que apenas transfere a responsabilidade do analista de um fator para o outro, mantendo ainda o aspecto subjetivo.

A maior vantagem deste método está na sua capacidade de reproduzir desde uma deflagração lenta até uma rápida, ao contrário do Método TNT Equivalente, que basicamente reproduz detonações por ser esta a característica de uma explosão de TNT.

O procedimento de cálculo é apresentado em quatro etapas, segundo a Ref. [8]. A primeira delas é o cálculo de um comprimento característico, L_0 , conforme a Eq. (13):

$$L_0 = \left(V_0 \cdot \frac{E_{VC}}{P_{atm}} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (13)$$

onde:

L_0 = comprimento característico [m];

V_0 = volume ocupado pela mistura estequiométrica gás-ar [m³];

E_{VC} = energia específica da combustão [J/m³]; (3,5 x 10⁶ valor médio para hidrocarbonetos);

p_{atm} = 101,3 · 10³ [Pa] – Pressão atmosférica ao nível do mar.

O volume de mistura estequiométrica é calculado considerando que o ar contém 20% de oxigênio, apresentando-se assim o segundo passo do cálculo:

$$V_0 = \frac{(1 + 5n) \cdot m \cdot R \cdot T}{M \cdot p_{atm}} \quad (14)$$

sendo:

m = massa de gás entre LII e LSI [kg];

R = constante universal dos gases [J/kmol.K];

T = temperatura da mistura [K];

M = massa molar do gás [kg/kmol];

n = n° de moles do gás necessários para a reação estequiométrica com O₂.

Na terceira etapa, estimam-se os níveis de sobrepressão considerando diferentes tipos de gases, no que diz respeito às suas reatividades: baixa, média e alta, respectivamente.

$$\frac{p_0}{p_{atm}} = \phi \left(\frac{L_0}{x} \right) \quad (15)$$

onde:

p_0 = pico de sobrepressão na onda de choque [Pa];

ϕ = nível de reatividade, apresentado na Tabela 5;

x = distância do ponto tomado até o centro da explosão [m];

Uma vez encontrado o pico de sobrepressão, é calculado o tempo de duração da fase positiva, formando a quarta e última etapa deste método.

$$t_d = \frac{L_0}{a} \left[0,456 \left(\frac{a}{u_f} - 1 \right) + \frac{3\phi}{7} \ln \left(\frac{1 + \frac{7}{3\phi} \cdot \frac{x}{L_0}}{1 + \frac{1,064}{\phi}} \right) \right] \quad (16)$$

Tabela 5 - Definição de valores mencionados nas Eqs. (15) e (16) [8].

Reatividade	u_f [m/s]	ϕ	Exemplos de gases
Baixa (A)	40	0,02	Metano e monóxido de carbono
Média (B)	80	0,06	Etano, propano e butano
Alta (C)	160	0,15	Hidrogênio, acetileno e óxido de eteno

Sendo:

a = velocidade do som no ar [m/s];

u_f = velocidade de propagação da chama [m/s], apresentada na Tabela 5.

As variáveis citadas nas equações (15) e (16), com exemplos de gases, são exemplificadas na Tabela 5, conforme o grau de reatividade.

2.5. Método Multienergia – TNO

Este método de cálculo é bastante empregado para a avaliação da variação da onda de choque [13] e foi desenvolvido pelo TNO. A sua idéia básica consiste em que apenas as parcelas com um grau mínimo de confinamento ou localizadas em partes da nuvem particularmente obstruídas são as que realmente contribuem para a geração de sobrepressão significativa, ao invés de toda a porção inflamável da nuvem, ou seja, esta abordagem considera que a ignição em uma nuvem de vapor na atmosfera resultará em diversas e pequenas sub-explosões, as quais ocorrerão somente em áreas onde houver grau de confinamento.

A Figura 6 ilustra uma típica região congestionada que deve ser considerada para os cálculos de explosões.

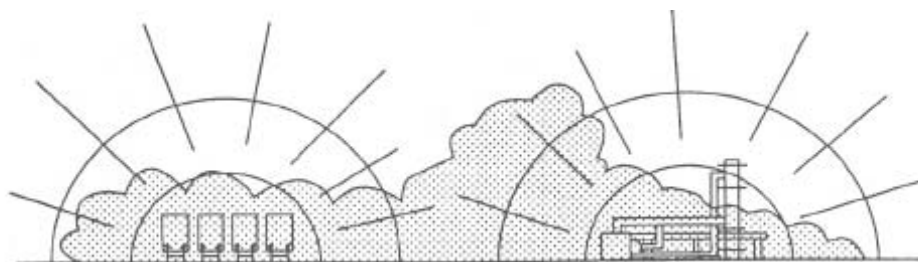


Figura 6 – Nuvem de Vapor congestionada

A base para este modelo é que a energia de uma explosão é altamente dependente do grau de congestionamento de uma área (região) e menos dependente da quantidade de produto inflamável na nuvem. A massa de produto envolvida na explosão é aquela existente na região de confinamento da nuvem.

Para tanto, é necessário classificar a área onde se encontra a nuvem de vapor na atmosfera em termos de confinamento, já que uma mesma nuvem poderá gerar diversas subexplosões, cada uma com uma intensidade distinta, de acordo com o seu grau de confinamento.

Assim, realizou-se uma classificação em termos de grau de confinamento de diversas áreas, industriais e não industriais, para orientar o usuário do modelo [8]. Exemplos de tais áreas são: prédios, estacionamentos, túneis, pontes áreas de tancagem, áreas de processo industriais, etc.

Para cada área, deve-se avaliar o seu volume, de forma a identificar a fração da nuvem inflamável ali existente. Também é avaliada a explosão da nuvem que não esteja em área com algum grau de confinamento. Porém, esta apresentará uma menor energia, resultando em menores distâncias atingidas pelos níveis de sobrepressão de referência.

O procedimento usual para a utilização do método multienergia requer, de forma resumida, as seguintes etapas:

- Realização do estudo de dispersão;
- Inspeção de campo, visando identificar áreas confinadas;

- Classificação das áreas de confinamento de acordo com os critérios e recomendações do TNO;
- Simulações.

O método multienergia foi desenvolvido em base semi-empírica sendo voltado para estimativas de explosões de misturas de gás inflamável-ar em proporções estequiométricas a partir de normalizações da distância ou do fator de escala \bar{R} definido pela equação:

$$\bar{R} = \frac{R}{(E / p_a)^{\frac{1}{3}}} \quad (17)$$

onde:

\bar{R} = distância normalizada [adimensional];

R = distância real [m];

E = energia de combustão [J];

p_a = pressão atmosférica [Pa]

A sobrepressão e a duração da fase positiva são calculadas a partir da sobrepressão e da duração da fase positiva normalizadas. A sobrepressão é dada por:

$$p_0 = \Delta \bar{P}_s \cdot p_a \quad (18)$$

E a duração da fase positiva por:

$$t_d = \bar{t}_d \left[\frac{\left(\frac{E}{P_0} \right)^{\frac{1}{3}}}{c_0} \right] \quad (19)$$

onde:

p_0 = sobrepressão [Pa];

$\overline{\Delta P_s}$ = sobrepressão normalizada [adimensional];

p_a = pressão atmosférica [Pa];

t_d = duração da fase positiva [s];

$\overline{t_d}$ = duração da fase positiva normalizada [adimensional];

E = energia de combustão [J];

c_0 = velocidade do som ambiente [m/s].

O método multienergia, da mesma forma que o TNT equivalente, se utiliza de gráficos onde estão as correlações dos efeitos normalizados com as distâncias normalizadas em função de uma intensidade característica da explosão.

A intensidade da explosão, definida por um número inteiro de 1 a 10, tem por objetivo caracterizar combustões que vão desde um incêndio em nuvem (1) até uma detonação (10). Sua função é semelhante à da velocidade no Método da Onda de Choque e ao rendimento no método do TNT equivalente, devendo ser escolhida de forma cuidadosa em função de fatores como o grau de obstrução e confinamento da região à qual ela se aplica, assim como características da mistura inflamável, como, por exemplo, a sua reatividade.

Os gráficos utilizados para obter os efeitos normalizados em função da distância normalizada, a partir da escolha da intensidade da explosão (curvas de 1 a 10) [5], podem ser visualizados na Figura 7.

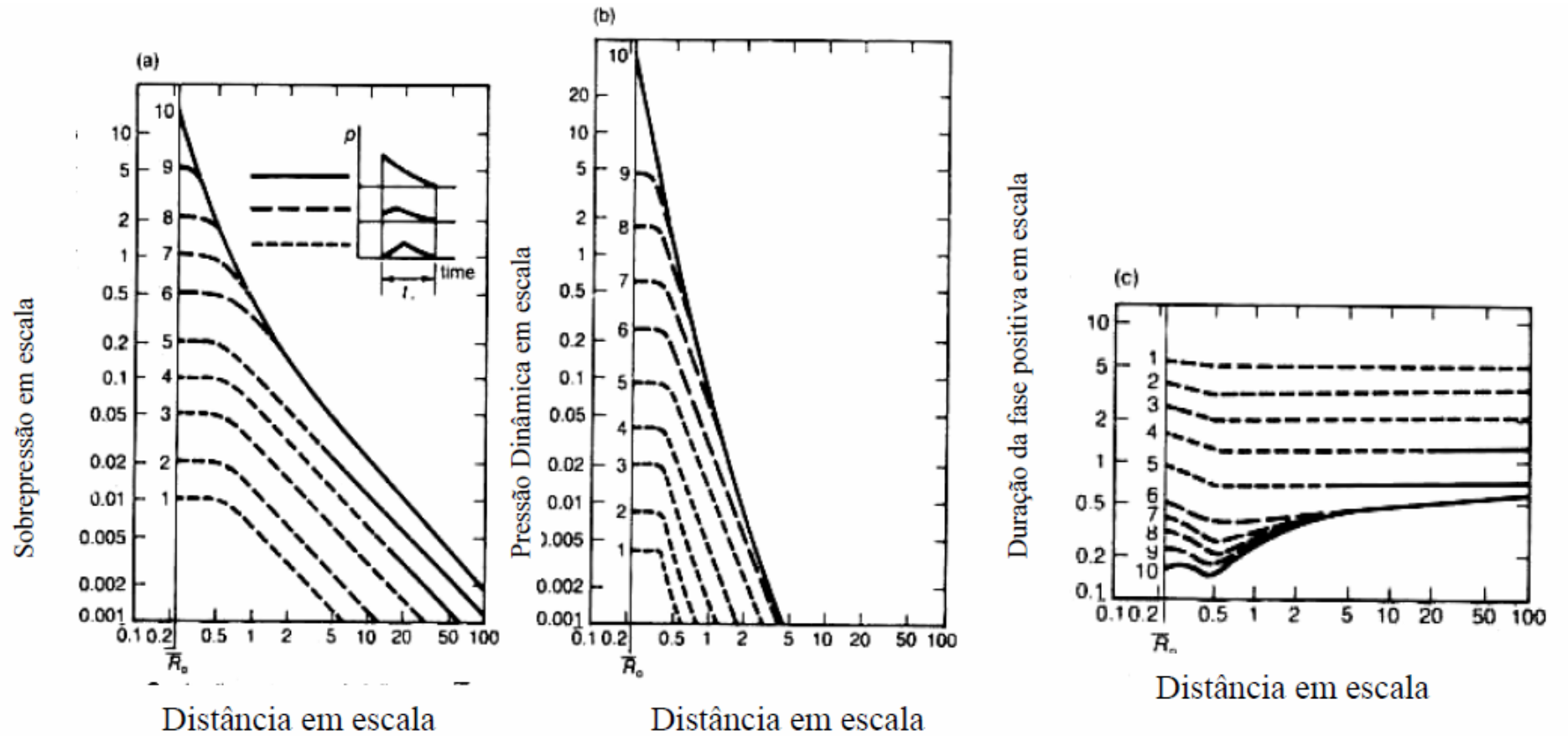


Figura 7 - Gráficos de efeitos normalizados em função da distância normalizada para sobrepressão (a), pressão dinâmica (b) e duração da fase positiva (c) do método multienergia [8].

Usando os gráficos da Figura 7 pode-se, por exemplo, a partir de uma determinada distância do centro da explosão até o ponto de interesse, determinar qual será o valor de sobrepressão e qual a duração da fase positiva da onda explosiva neste ponto. Para isto, inicialmente define-se a intensidade da explosão correspondente ao conjunto de curvas dos gráficos que serão usadas.

A seguir, é preciso apenas converter a distância real em distância normalizada com a Eq. (17) e entrar com este dado nos gráficos correspondentes (Figura 7), obtendo os valores normalizados de sobrepressão e duração na fase positiva correspondentes às curvas de intensidade escolhidas. Estes valores podem ser então convertidos em sobrepressão efetiva e duração efetiva da fase positiva usando as Eqs. (18) e (19), respectivamente. A Figura 7 (b) mostra a pressão dinâmica máxima normalizada, utilizada para calcular o carregamento de arraste resultante do vento associado à passagem da onda explosiva.

A existência de dez curvas permite uma melhor escolha entre as opções de comportamento disponíveis, o que se reflete nas estimativas mais realistas fornecidas por este método.

O grande problema com a aplicação deste método é que o usuário deve decidir sobre a escolha de grau de confinamento. Pouca orientação é fornecida para as geometrias que apresentam confinamento parcial. Além disto, não está claro como os resultados de cada explosão devem ser combinados [10].

A melhoria das estimativas vem acompanhada da necessidade de avaliar mais detalhadamente os ambientes estudados, mostrando que o conhecimento dos fatores envolvidos e a correta interpretação de sua influência podem fazer a diferença entre uma boa análise e uma estimativa superficial e imprecisa. Além deste fato, contribuem significativamente para o aperfeiçoamento dos métodos preditivos a constante experimentação [14, 15] e a incorporação da análise fenomenológica [16] e de dados disponíveis sobre acidentes ocorridos.

2.6. Modelo Baker-Strehlow-Tang (BST)

Este modelo trata-se de uma modificação do método multienergia do TNO. Baker-Strehlow sugerem, a partir de dados experimentais, que a energia liberada em uma explosão e, portanto, seus efeitos, serão maiores quanto maior for a aceleração da chama, a qual é determinada pelos fatores: reatividade do produto inflamável, densidade dos obstáculos e expansão da chama [17].

Utiliza a Eq. (17) e a Eq. (18) do método multienergia - TNO para o cálculo de \bar{R} e p_0 , respectivamente, mas cada modelo usa uma família de curvas para relacioná-los. Portanto, o método utilizado para a construção gráfica da relação entre a sobrepressão normalizada e distância normalizada, \bar{R} , é diferente do usado no método multienergia de TNO.

Com este método, a força da onda de choque é proporcional à velocidade da chama máxima atingida dentro da nuvem. Assim, cada curva na Figura 8 é marcada com uma velocidade de chama, que é apresentada sob a forma de um número de Mach, M_f .

Na Tabela 6 pode ser selecionada a velocidade da chama adequada (número de Mach, M_f) para a situação específica que está sendo modelada.

O primeiro aspecto que deve ser levado em consideração é a reatividade do combustível, a qual é classificada como baixa, média ou alta. Exemplos desta classificação são: baixa reatividade – metano e monóxido de carbono; alta reatividade – acetileno, etileno, hidrogênio, óxido de etileno e propileno; média reatividade – todos os demais.

Em seguida, analisa-se o congestionamento ou a densidade de obstáculos. O modelo classifica as áreas com baixa presença de obstáculos (menor do que 10% da área ocupada pela nuvem), média presença de obstáculos (de 10 a 40% da área ocupada pela nuvem) e alta presença de obstáculos (maior que 40% da área ocupada pela nuvem).

E por último, o confinamento ou a expansão da chama deve ser levado em conta. O modelo assume que quanto menor for a dimensão da região onde ocorrerá a explosão, maiores serão seus efeitos. Assim, as regiões são classificadas em uma dimensão, 1D (túneis, corredores, redes de esgoto), duas dimensões, 2D (prédios, estacionamentos) e três dimensões, 3D (não confinada, expansão esférica). A atualização, em 1996, também definiu confinamento 2.5D (teto e / ou paredes parciais em que se poderia esperar a falha de forma rápida e ao mesmo tempo proporcionar ventilação da área afetada) [11]

No caso do gás hidrogênio a reatividade é alta, a densidade de obstáculos é baixa se a relação bloqueio/área for inferior a 10%, média se estiver na faixa de 10%-40% e alta se a relação for superior a 40%.

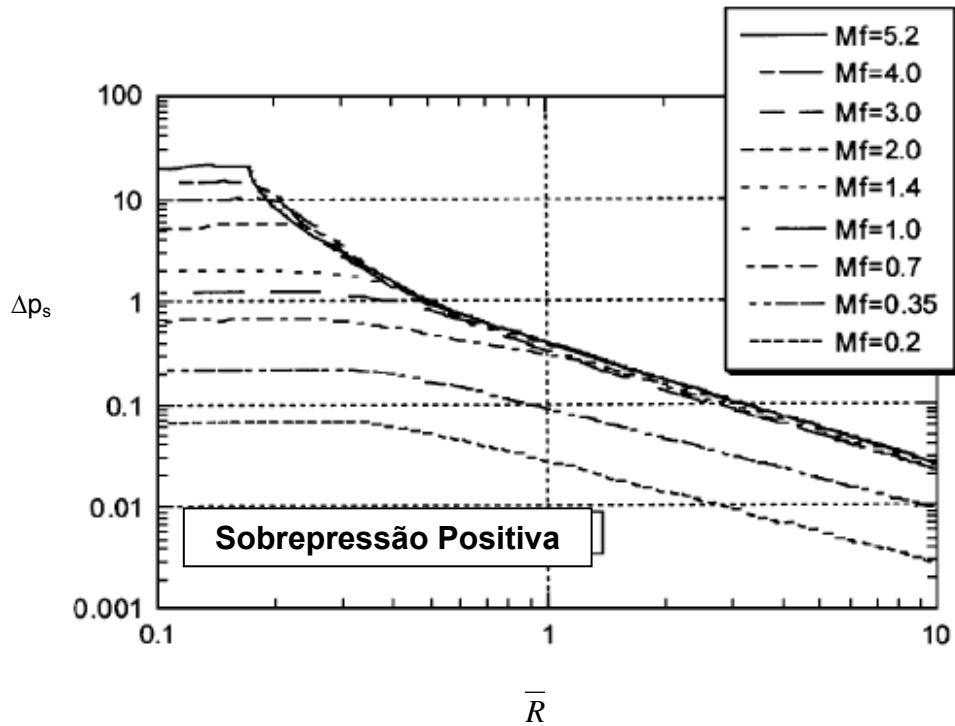


Figura 8 – Curvas de sobrepessão normalizada (adimensional), versus distância normalizada \bar{R} , para serem aplicadas no Método BST [11].

Tabela 6 - Velocidade da chama adequada (número de Mach, Mf) para uma situação específica [11].

Expansão da Chama	Reatividade do Combustível	Densidade do Obstáculo		
		Baixa	Média	Alta
1D	Alta	5.2	5.2	5.2
	Média	1,03	1,77	2,27
	Baixa	0,294	1,03	2,27
2D	Alta	0,59	1,03	1,77
	Média	0,47	0,66	1,6
	Baixa	0,079	0,47	0,66
2,5D	Alta	0,47	0,58	1,18
	Média	0,29	0,55	1,0
	Baixa	0,053	0,35	0,50
3D	Alta	0,36	0,153	0,588
	Média	0,11	0,44	0,50
	Baixa	0,026	0,23	0,34

Capítulo 3

— Descrição do Cenário —

3.1. Características da Substância Selecionada

A substância selecionada para estudo é o hidrogênio, o qual, na temperatura ambiente, é um gás altamente inflamável, incolor, inodoro e insípido. É o gás de densidade mais baixa conhecida, normalmente é transportado em cilindros de aço a pressões entre 150 e 200 bar.

O hidrogênio é o elemento mais abundante, constituindo 75% da massa e 90% dos átomos do universo. Encontra-se em abundância nas estrelas e nos planetas gigantes gasosos, entretanto, na atmosfera terrestre é encontrado numa quantidade pequena, aproximadamente de 1 ppm em volume. Uma fonte comum de hidrogênio é a água, composta por dois átomos de hidrogênio e um de oxigênio (H_2O), porém a fonte mais importante são as substâncias formadas principalmente de carbono e hidrogênio que são os compostos orgânicos, incluindo todas as formas de vida conhecidas, os combustíveis fósseis e o gás natural. O metano, produto da decomposição orgânica, está adquirindo uma crescente importância como fonte de hidrogênio.

O hidrogênio pode ser obtido de várias formas:

- Eletrólise da água; atualmente se investiga a fotólise da água (4% da produção mundial);
- Reação de hidrocarbonetos com vapor de água (96% da produção mundial);
- Ataque de metais com hidróxido de sódio, potássio;
- Ataque de metais (Zn e Al) com ácido sulfúrico ou clorídrico;

O hidrogênio é um gás extremamente inflamável no ar (essa probabilidade de se inflamar situa-se entre 4% e 75% em volume de ar). A energia necessária para inflamá-lo é muito pequena e em alguns casos, pode ocorrer autoinflamação. Reage violentamente com o flúor e o cloro, especialmente com o primeiro, com o qual a reação é tão rápida e imprevisível que não se pode controlar. Também é perigosa a sua despressurização rápida, já que diferentemente dos outros gases, a sua expansão acima de $-40^{\circ}C$ ocorre com aquecimento, podendo inflamar-se.

O hidrogênio se queima no ar com uma chama muito quente e quase invisível. A chama emite um calor muito pouco radiante e por isso mesmo não indica sua existência. O hidrogênio pode se difundir rapidamente através de materiais e sistemas que estejam presentes no ar ou em outros gases comuns. Com alguns materiais, a difusão é mais pronunciada com temperaturas muito altas. A energia necessária para a ignição de uma mistura hidrogênio-ar é de apenas 0,04 mJ, contra 0,25 mJ dos hidrocarbonetos. A Tabela 7 apresenta algumas propriedades do hidrogênio.

Tabela 7 – Propriedades físico-químicas do hidrogênio

Propriedades Físico-Químicas		
Estado Físico	Gás	
Cor	Incolor	
Odor	Sem cheiro	
Peso Molecular	2,016 g/mol	
Fórmula	H ₂	
Ponto de Fusão, a 10 psig (68,9 kPa)	-259,2°C	
Ponto de Ebulição, a 10 psig (68,9 kPa)	-252,8°C	
Ponto de Fulgor (método ou norma)	Gás inflamável	
Temperatura de Auto-ignição	500 °C a 1 atm	
Limite de Inflamabilidade no ar, % em volume	Inferior	4,0%
	Superior	75,0%
Densidade do Gás (ar=1)	0,06960 a 21,1 °C a 1 atm	
Massa Específica	0,08342 kg/m ³ a 0 °C	
Solubilidade em Água, Vol/Vol	0,019 a 15,6 °C (60 °F) e 1 atm	

As propriedades químicas e físicas do hidrogênio justificam uma concentração de esforços em estudos de segurança para a explosão de hidrogênio misturado com o ar.

3.2. Descrição do Empreendimento

Serão consideradas, neste estudo, duas usinas nucleares distintas, situadas em um mesmo sítio. A primeira usina, será chamada de Unidade Nuclear 1 (UN1) e a segunda, de Unidade Nuclear 2 (UN2).

O objetivo do empreendimento é implantar um programa de gerenciamento de rejeitos, com foco na redução dos volumes produzidos. Para tal, todos os rejeitos radioativos produzidos nas Unidades Nucleares 1 e 2 são objetos de medidas técnicas e administrativas, visando à maior redução de volume dentro dos limites radiológicos e de segurança.

No âmbito do empreendimento são previstas operações de transferências de rejeitos radioativos líquidos de baixa atividade, via caminhão-tanque, da Unidade Nuclear 1 (UN1) para a Unidade Nuclear 2 (UN2). Estas operações visam permitir que os rejeitos líquidos radioativos da UN1 possam ser processados e acondicionados em UN2.

A principal finalidade, e que justifica esta solução de engenharia, é a redução do número de embalados radioativos gerados durante a vida útil da UN1, uma vez que o Sistema de Processamento e Acondicionamento de Rejeitos Radioativos Líquidos da UN2 é mais eficiente do que o daquela usina.

Outro ponto favorável, relativo à implantação deste empreendimento, é a possibilidade de dar continuidade às modificações de projeto necessárias para melhorar as condições operacionais do tratamento de rejeitos líquido da UN1.

Uma visão geral do empreendimento é apresentada na Figura 9.

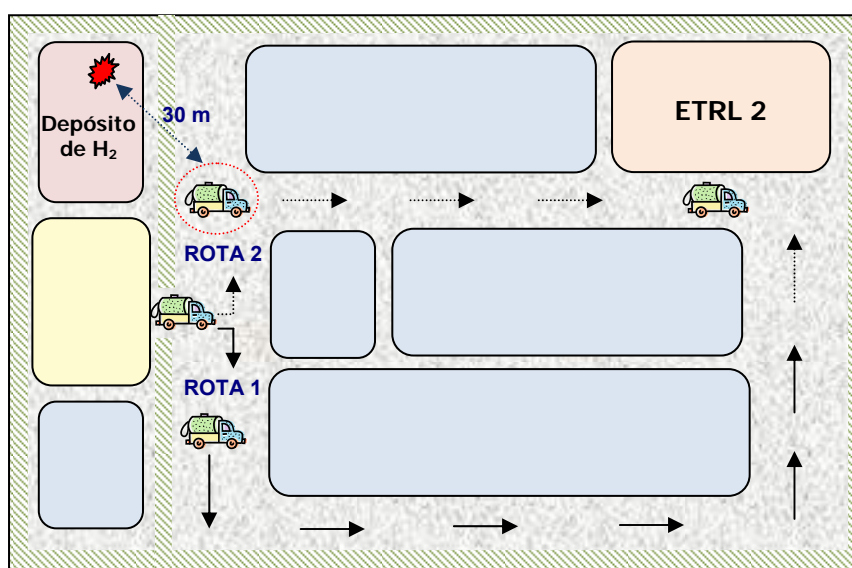


Figura 9 – Visão Geral do Empreendimento

A transferência de rejeito líquido radioativo armazenado na UN1 será realizada através de uma Estação de Transferência de Rejeitos Líquidos (ETRL1) existente na UN1, da utilização de rotas de transferências, bem como da utilização da Estação de Transferência de Rejeitos Líquidos (ETRL2) existente na UN2. A movimentação do veículo será restrita à área protegida das duas unidades.

De acordo com a explanação apresentada anteriormente, observa-se que o empreendimento Transferência de Rejeitos Líquidos Radioativos, da Unidade 1 para a Unidade 2, é composto dos seguintes itens:

- Estação de Transferência de Rejeito Líquido da Unidade Nuclear 1 (ETRL 1);
- Caminhão-tanque;
- Rotas de Transferências;
- Estação de Transferência de Rejeito Líquido da Unidade Nuclear 2 (ETRL 2).

A Figura 9 apresenta os itens citados acima, dando ênfase ao ponto crítico para a ocorrência de cenários de acidentes. Este ponto crítico é o Depósito de Cilindros H₂ (localizado junto à Estação de Transferência da Unidade 1 – ETRL1).

3.3. Descrição dos Cenários de Acidente

Do ponto de vista da avaliação dos riscos, a avaliação das conseqüências dos incêndios e explosões exige uma definição do cenário em que o incêndio ou explosão ocorreria.

A descrição de cada cenário acidental compreende a identificação do cenário pelo seu número e também a descrição da sua causa, dos mecanismos de detecção e das suas conseqüências, além das eventuais recomendações pertinentes para reduzir as suas chances de ocorrência, ou alternativamente, os seus efeitos e desta maneira reduzir o risco radiológico.

No cenário de acidente em estudo, considera-se que o caminhão-tanque após ser carregado com o rejeito líquido radioativo, na ETRL1, inicia sua trajetória no sentido de percorrer a Rota 2 (Figura 9) de transferência de rejeito líquido. Admite-se que no instante em que o caminhão-tanque, completamente cheio, estiver saindo desta estação de transferência, ocorrerá uma explosão em um dos cilindros de hidrogênio do Depósito de H₂ da UN1 a uma distância de aproximadamente 30 metros

do referido tanque. A Figura 9 mostra exatamente o local em que o caminhão-tanque se encontra no momento da explosão.

Com a explosão do cilindro de gás admite-se que tanto a sobrepressão produzida na explosão, bem como alguns fragmentos do cilindro, irão atingir o tanque.

3.3.1. Cenário 1

É definido como um grande vazamento de rejeito líquido decorrente de um fragmento originado na explosão de um cilindro pressurizado existente ao lado da ETRL 1, ocasionando a capotagem do caminhão e o rompimento da mangueira (com a bomba ligada) formando uma poça, com a subsequente evaporação de uma fração da poça e formando uma nuvem com material radioativo.

Os mecanismos de detecção para este cenário são geralmente visuais, detector de radiação e ruído, dos quais este último é o mais provável de ocorrer, por haver a ocorrência de uma explosão próxima com a possibilidade de fragmentos atingirem o caminhão e causarem a sua capotagem. O segundo exige detectores de radiação para baixos níveis de radiação, mesmo se considerado que o caminhão capotou. Eventualmente, pode ocorrer a detecção por meios visuais, por se perceber a ocorrência de vazamento.

Quanto às chances de ocorrência deste cenário acidental, o vazamento ocorre devido à capotagem do caminhão em consequência de fragmentos da explosão ocorrida no parque de cilindros próximo à ETRL 1 que o atingem. Portanto, é necessário que existam cilindros pressurizados nesse local, que ocorra a explosão de pelo menos um deles e que um fragmento atinja o caminhão, além de estar ocorrendo a operação de transferência.

Quanto à categoria de severidade de cenário, como se está considerando um vazamento do tipo guilhotina na mangueira, o vazamento de líquido é significativo (>10%), embora não se espere que vaze todo o conteúdo do caminhão-tanque. Os efeitos danosos podem também ser significativos para a integridade do caminhão-tanque e para o motorista, embora sejam irrelevantes para o meio ambiente, por ser um líquido de baixa atividade.

3.3.2. Cenário 2

É definido como um grande vazamento de rejeito líquido decorrente de onda de choque originada na explosão de um cilindro pressurizado existente ao lado da ETRL 1, ocasionando a capotagem do caminhão e o rompimento ou a desconexão da mangueira, com a subsequente liberação de líquido radioativo da mangueira e do caminhão tombado

Os mecanismos de detecção para este cenário são geralmente visuais, detector de radiação e ruído, dos quais este último é o mais provável de ocorrer, por haver a ocorrência de uma explosão próxima com a possibilidade da onda de choque resultante atingir e ocasionar a capotagem do caminhão. O segundo exige detectores de radiação para baixos níveis de radiação, mesmo se considerado uma ruptura do tipo guilhotina na mangueira. Eventualmente, pode ocorrer a detecção por meios visuais, por se perceber a ocorrência de vazamento.

Quanto às chances de ocorrência deste cenário acidental, o vazamento ocorre devido a uma explosão no pátio de cilindros próximo à ETRL 1 e a onda de choque dessa explosão atinge e causa a capotagem do caminhão, decorrendo daí o vazamento de rejeito líquido radioativo. Portanto, é necessário que existam cilindros pressurizados nesse local, que ocorra a explosão de pelo menos um deles e que a onda de choque atinja o caminhão e cause a sua capotagem, além de estar ocorrendo a operação de transferência.

Quanto à categoria de severidade de cenário, como se está considerando um vazamento do tipo guilhotina na mangueira, o vazamento de líquido é significativo (>10%), embora não se espere que vaze todo o conteúdo do caminhão-tanque. Os efeitos danosos podem também ser significativos para a integridade do caminhão-tanque e para o motorista, embora sejam irrelevantes para o meio ambiente, por ser um líquido de baixa atividade.

Capítulo 4

– Resultados e Discussão –

Conforme discutido no Capítulo 3, foi considerada como evento principal dos cenários de acidentes, a explosão de um cilindro de H₂ que possa gerar danos pela onda de choque resultante e fragmentos. Neste capítulo, será analisada a possibilidade de ocorrência destes danos.

4.1. Efeitos ocasionados pela sobrepressão

Os danos causados por sobrepressão são avaliados calculando-se, inicialmente, a sobrepressão gerada pela explosão do cilindro e verificando em uma tabela de referência (Tabela 4) que efeitos podem resultar.

O método escolhido para o cálculo da sobrepressão gerada foi o método TNT equivalente por ser um método simples e de rápida finalização. As etapas de cálculo são as seguintes:

1. estimar a massa de H₂ no cilindro [kg];
2. estimar a massa equivalente de TNT do H₂ no cilindro [kg];
3. estimar a distância em escala, z_e [m/kg^{1/3}];
4. estimar a sobrepressão, p_0 [kPa];
5. avaliar (Tabela 4) que efeito a sobrepressão estimada ocasiona.

Segundo a Ref. [5], um cilindro de H₂ industrial típico possui as características descritas abaixo.

Volume do cilindro, $V_{cil} = 49 \times 10^{-3} \text{ m}^3$;

Massa de hidrogênio, $m_{H_2} = 0,65 \text{ kg}$;

Pressão de armazenamento, $p = 164 \times 10^5 \text{ Pa}$.

Estas serão utilizadas nos cálculos dos efeitos causados por uma explosão.

A segunda etapa, ou seja, o cálculo da massa equivalente de TNT do H₂, é necessária para que se possa calcular o efeito em termos do TNT. O cálculo é feito através da Eq.(9), onde utilizaremos uma eficiência de explosão, η , igual a 4% [5], o calor de combustão do H₂, $\Delta H_{c(H_2)}$, igual a $141,6 \times 10^3 \text{ kJ/kg}$ [10] e o calor de combustão do TNT, $\Delta H_{c(TNT)}$, igual a 4686 kJ/kg [10].

Assim temos,

$$M_{TNT} = \frac{(0,04) \cdot (141,6 \cdot 10^3) \cdot (0,650)}{(4686)} = 0,782 \text{ kg} \quad (20)$$

A distância em escala, z_e , e a sobrepressão resultante da explosão, p_0 , são obtidas através das Eqs. (10) e (12), respectivamente. Assumindo a pressão atmosférica, p_a , igual a 101,3 kPa e a distância real, d , igual a 30 m, temos:

$$z_e = \frac{30}{\sqrt[3]{0,782}} = 32,563 \text{ m} / \text{kg}^{\frac{1}{3}} \quad (21)$$

$$p_0 = \left(\frac{1616 \left[1 + \left(\frac{32,563}{4,5} \right)^2 \right]}{\sqrt{1 + \left(\frac{32,563}{0,048} \right)^2} \cdot \sqrt{1 + \left(\frac{32,563}{0,32} \right)^2} \cdot \sqrt{1 + \left(\frac{32,563}{1,35} \right)^2}} \right) \cdot 101,3 = 5,174 \text{ kPa} \quad (22)$$

O dano esperado para a sobrepressão calculada acima, 5,174 kPa, é a destruição de janelas, sendo que algumas podem apresentar a armação danificada (Tabela 4).

O mesmo cálculo, considerando a massa de TNT encontrada na Eq. (20), foi realizado para as distâncias reais de 5 m e 100 m. Os resultados encontrados estão apresentados na Tabela 8.

Tabela 8 – Distância da explosão *versus* Danos estruturais

Distância (m)	Sobrepressão estimada (kPa)	Dano Estrutural Esperado
5	49,846	Trinca de tijolos não reforçados de 20 – 30 cm de espessura por tensão de cisalhamento
30	5,174	As janelas são normalmente destruídas, e algumas destas têm a armação danificada
100	1,527	Pressão típica para trinca nos vidros

De acordo com o Cenário 2, a sobrepressão pode, eventualmente, ocasionar a capotagem do caminhão. Para analisar esta possibilidade, é necessário estimar que valor de sobrepressão é capaz de ocasionar esta capotagem. Para tal, vamos considerar a Figura 10. Nesta figura,

f = força aplicada sobre a parede lateral do caminhão [N];

d_1 = semilargura do caminhão [m];

d_2 = semialtura do caminhão [m];

P = peso do caminhão [kg];

μ_e = coeficiente estático de atrito.

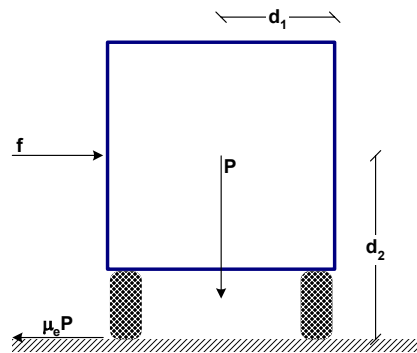


Figura 10 – Esquema de forças para a análise da possibilidade de capotagem do caminhão devido à sobrepressão decorrente da explosão de um cilindro de H_2 .

Conservadoramente, não vamos considerar o coeficiente estático de atrito. Portanto, para que o caminhão capote é necessário que

$$f \times d_2 \geq P \times d_1 \quad (23)$$

Como $p = f/A$, onde

p = sobrepressão aplicada [Pa];

A = área lateral do caminhão [m^2],

Então,

$$p \geq \frac{P \times d_1}{A \times d_2} \quad (24)$$

Assumindo que o caminhão possui as dimensões apresentadas na Figura 11 e massa igual a 50 t, a sobrepressão encontrada é:

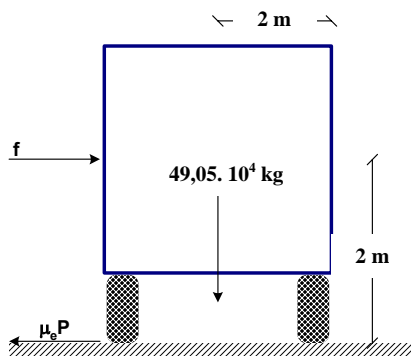


Figura 11 – Dimensões do caminhão-tanque.

$$p_0 = \frac{(49,05 \cdot 10^4) \cdot (2)}{(80) \cdot (2)} = 6,250 \text{ kPa} \quad (25)$$

Comparando esta sobrepressão, 6,250 kPa, com a sobrepressão resultante da Eq. (22), 5,174 kPa, conclui-se que não ocorrerá a capotagem do caminhão-tanque, situado a 30 m do centro da explosão, devido à sobrepressão resultante.

4.2. Efeitos ocasionados pelos fragmentos

De acordo com o Cenário 1, os fragmentos resultantes da explosão do cilindro de H₂ podem, eventualmente, ocasionar a capotagem do caminhão. Sendo assim, será investigado se de fato um fragmento resultante da explosão de um cilindro de H₂ tem energia suficiente para romper todas as barreiras de energia que tem a sua frente e ocasionar a capotagem do caminhão.

Os vasos cilíndricos não rompem em partes iguais, eles geralmente se rompem nos tampos. Muitas vezes eles projetam seu tampo ao longo do eixo do vaso e o casco distorcido ao longo do eixo perpendicular a este eixo [1].

De modo, a realizar uma análise conservativa, será considerada a massa total do cilindro no cálculo dos efeitos ocasionados pelos fragmentos.

Precisa-se agora estimar a massa de um cilindro de H₂ vazio. Admitindo que um cilindro tenha uma altura $H = 1,5$ m, um raio externo $r_e = 15,0$ cm e uma espessura $e = 8$ mm (dados típicos de um cilindro de gás industrial), o seu volume será dado por:

$$V = \pi \cdot H \cdot (r_e^2 - r_i^2) = \pi \cdot H \cdot e \cdot (2r_e - e) \quad (26)$$

onde:

V = volume de um cilindro [m^3];

r_e = raio externo [m];

r_i = raio interno [m];

H = altura do cilindro [m];

e = espessura do cilindro [m].

Dessa forma, $V = 11 \times 10^{-3} m^3$. Admitindo que o cilindro seja de aço industrial, cuja massa específica (ρ) é igual a $7,8 \times 10^3 kg/m^3$, então a massa do cilindro será dada por

$$M_{cil} = (7,8 \cdot 10^3) \cdot (11 \cdot 10^{-3}) = 85,82 kg \quad (27)$$

A área de um fragmento pode ser calculada considerando que se sabe a sua massa e também a sua espessura e massa específica. Portanto,

$$A_{frag} = \frac{M_{cil}}{\rho \cdot e} \quad (28)$$

onde:

A_{frag} = área do fragmento [m^2];

M_{cil} = massa total do vaso vazio [kg];

ρ = densidade do material [kg/m^3];

e = espessura do cilindro [m].

Substituindo os valores na Eq. (28) temos,

$$A_{frag} = \frac{85,82}{(7,8 \cdot 10^3) \cdot (8 \cdot 10^{-3})} = 1,38m^2 \quad (29)$$

O próximo passo é estimar a velocidade inicial do fragmento. Para o cálculo da velocidade inicial, v_i , será utilizada a metodologia TNO descrita no item 2.2.3.1, para explosão física de um vaso pressurizado.

Passo 1: Método da Energia Cinética

O gás hidrogênio será considerado como gás ideal, uma vez que as pressões envolvidas, no cenário em estudo, são menores que 300 MPa.

Para este cálculo serão utilizadas as Eqs. (3) e (4) e os seguintes parâmetros:

$$p_1 = 164 \times 10^5 \text{ Pa};$$

$$p_a = 101,3 \times 10^3 \text{ Pa};$$

$$V_g = 49 \times 10^{-3} \text{ m}^3;$$

$$\gamma_1 = 1,405;$$

$$M_v = 85,82 \text{ kg};$$

$$A_{cin} = 0,6 \text{ (limite superior)}.$$

Deste modo:

$$E_{disp} = \frac{(164 \cdot 10^5 - 101,3 \cdot 10^3) \cdot 49 \cdot 10^{-3}}{1,405 - 1} = 1,97 \cdot 10^6 J \quad (30)$$

$$v_i = \sqrt{\frac{2 \cdot 0,6 \cdot 1,97 \cdot 10^6}{85,82}} = 165,97 m/s \quad (31)$$

Passo 2: Método de Gel'fand

Para este cálculo serão utilizadas as Eqs. (5) e (6) e os seguintes parâmetros:

$$T_g = 298 K$$

$$R = 8,314 J/mol \cdot K;$$

$$\mu_1 = 2,02 \times 10^{-3} kg/mol.$$

Deste modo:

$$a_1 = \sqrt{\frac{298 \cdot 1,405 \cdot 8,314}{2,02 \cdot 10^{-3}}} = 1312,73 m/s \quad (32)$$

$$\bar{P}_1 = \frac{(164 \cdot 10^5 - 101,3 \cdot 10^3) \cdot 49 \cdot 10^{-3}}{85,82 \cdot 1,72 \cdot 10^6} = 5,41 \cdot 10^{-3} \quad (33)$$

Através da Figura 4, relaciona-se \bar{P}_1 com v_i/a_1 obtendo-se uma velocidade inicial do fragmento resultante da explosão de um cilindro de H₂ igual a 32,82 m/s.

Passo 3: Método de Moore

Para este cálculo serão utilizadas as Eqs. (7) e (8) respectivamente e os seguintes parâmetros:

$$E_{disp} = 1,97 \times 10^6 J;$$

$$M_v = 85,82 kg;$$

$$M_c = 0,65 \text{ kg.}$$

Deste modo:

$$A_M = \frac{1}{1 + \frac{0,65}{2 \cdot 85,82}} = 0,99 \quad (34)$$

$$v_i = 1,092 \cdot \left(\frac{1,97 \cdot 10^6 \cdot 0,99}{85,82} \right)^{0,5} = 164,62 \text{ m/s} \quad (35)$$

O valor encontrado na Eq. (35) para a velocidade inicial, v_i , é bem maior que o valor encontrado pelo método de Gel'fand. Nenhuma correção é necessária, e portanto, a velocidade inicial do fragmento, v_i , de acordo com o Método de Gel'fand é igual a 32,82 m/s.

Conhecida a velocidade do fragmento, pode-se inferir o efeito que o mesmo causará. Para tanto, calcula-se a força que o mesmo exercerá sobre o caminhão-tanque ao atingi-lo, através da expressão

$$F = \frac{m \cdot \Delta v}{\Delta t} \quad (36)$$

onde:

F = força exercida pelo fragmento [N];

Δv = diferença entre a velocidade inicial e final do fragmento [m/s];

Δt = intervalo de tempo de impacto [s].

Admite-se que a expressão aproximada acima seja válida, que a diferença entre as velocidades seja igual à velocidade inicial do fragmento e também que o intervalo de tempo de impacto seja de 1 segundo. Deste modo temos,

$$F = \frac{85,82 \cdot 32,82}{1} = 2816,6N \quad (37)$$

Finalmente, calcula-se a pressão exercida pelo fragmento dividindo-se a força exercida pela área atingida, que é a área do fragmento, já estimada pela Eq. (29).

$$P = \frac{2816,6}{1,38} = 2041Pa = 2,041kPa \quad (38)$$

Relacionando a pressão encontrada acima com as sobrepressões da Tabela 4, conclui-se que os danos esperados para a sobrepressão de 2,041 kPa são a quebra de 10% dos vidros das janelas, alguns danos nos tetos das casas e limite de estilhaços.

Comparando a sobrepressão calculada na Eq. (38), 2,041 kPa, com a sobrepressão capaz de ocasionar a capotagem do caminhão-tanque encontrada na Eq. (25), 6,250 kPa, conclui-se que o fragmento resultante da explosão de um cilindro de H₂ em estudo não consegue ocasionar a capotagem do caminhão-tanque em questão.

Como não há impacto do fragmento no caminhão-tanque, o cálculo do alcance máximo do fragmento não é relevante.

4.3. Estudo dos Efeitos de Explosões

4.3.1. Modelo de Vulnerabilidade de Eiseberg

Diversos efeitos resultantes de uma explosão de nuvem de gás têm sido estudados há muitos anos e podem ser classificados de duas formas: danos às pessoas e às estruturas. Os efeitos causados pela passagem de uma onda de choque podem ser estimados pelo modelo de vulnerabilidade de Eisenberg, método que faz uso das equações de probit [10].

A estimativa de danos devido à sobrepressão deve considerar o valor absoluto de sobrepressão atingido, bem como sua duração [6]. Isto é particularmente importante, pois os efeitos dependerão do tipo de dano em estudo.

Baseado no Modelo de Vulnerabilidade de Eisenberg [6], a equação de probit relacionada aos danos estruturais é a seguinte,

$$Pr = -23,8 + 2,92 \ln(p_0) \quad (39)$$

onde:

Pr = variável de probit;

p_0 = pico de sobrepressão [Pa].

Assim, sabendo as características da explosão, determina-se o pico de sobrepressão da onda de choque na distância onde se encontra a estrutura. Com o nível de sobrepressão, encontra-se o valor da variável de probit e, com ela, a probabilidade de ocorrência de danos. A relação entre probit e probabilidade pode ser obtida através da Tabela 9.

Tabela 9 - Relação entre a variável probit e a probabilidade [10]

%	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0	--	2,67	2,95	3,12	3,25	3,36	3,45	3,52	3,59	3,66
10	3,72	3,77	3,82	3,87	3,92	3,96	4,01	4,05	4,08	4,12
20	4,16	4,19	4,23	4,26	4,29	4,33	4,36	4,39	4,42	4,45
30	4,48	4,50	4,53	4,56	4,59	4,61	4,64	4,67	4,69	4,72
40	4,75	4,77	4,80	4,82	4,85	4,87	4,90	4,92	4,95	4,97
50	5,00	5,03	5,05	5,08	5,10	5,13	5,15	5,18	5,20	5,23
60	5,25	5,28	5,31	5,33	5,36	5,39	5,41	5,44	5,47	5,50
70	5,52	5,55	5,58	5,61	5,64	5,67	5,71	5,74	5,77	5,81
80	5,84	5,88	5,92	5,95	5,99	6,04	6,08	6,13	6,18	6,23
90	6,28	6,34	6,41	6,48	6,55	6,64	6,75	6,88	7,05	7,33
%	0,0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9
99	7,33	7,37	7,41	7,46	7,51	7,58	7,65	7,75	7,88	8,09

4.3.2. Probabilidade de Dano às Estruturas

Nesta seção, serão calculadas as probabilidades de ocorrência de danos estruturais, utilizando a equação de probit correspondente e os picos de sobrepressão relativos às distâncias de 5 m, 30 m e 100 m do centro da explosão.

Substituindo os valores de sobrepressão da Tabela 8 na Eq. (39) são encontrados os valores das variáveis de probit, Pr. Através da Tabela 9, relacionam-se esses valores com as respectivas probabilidades. A Tabela 10 apresenta a probabilidade de ocorrência de danos estruturais a uma determinada distância do centro da explosão.

Tabela 10 – Relação entre a distância do centro da explosão e a probabilidade de ocorrência de danos estruturais.

Distância (m)	Sobrepressão estimada (kPa)	Variável de Probit	Probabilidade de Ocorrência de Danos Estruturais (%)
5	49,864	7,78	99,7
30	5,174	1,17	< 1
100	1,527	-2,39	< 1

Outro modo de avaliarmos os efeitos das explosões é, a partir do modelo de Eisenberg, determinar os picos de sobrepressão que correspondem à probabilidade de ocorrência de cada efeito. O pico de sobrepressão, p_0 , é determinado a partir da Eq. (39) usando como valor de probit o valor retirado da Tabela 9 correspondente à probabilidade de interesse. Serão avaliados os efeitos da explosão relativos às probabilidades de 1%, 50% e 99% de ocorrência do dano.

A equação de probit, rearranjada, está apresentada a seguir:

$$p_0(\text{Pr}) = e^{\frac{\text{Pr}+23,8}{2,92}} \quad (40)$$

Na Tabela 11, seguem os picos de sobrepressão necessários para que se tenham as probabilidades de 1%, 50% e 99% de ocorrência de danos estruturais. As variáveis de probit foram retiradas da Tabela 9.

Tabela 11 - Picos de sobrepressão necessários para que se tenham as probabilidades de 1%, 50% e 99% de ocorrência de danos estruturais.

Probabilidade de Ocorrência de Danos Estruturais (%)	Variável de Probit	Sobrepressão estimada (kPa)
1	2,67	8,648
50	5,00	19,207
99	7,33	42,658

Da tabela 11 conclui-se que é necessária uma sobrepressão de 8,648 kPa para se ter 1% de probabilidade de danos estruturais, 19,207 kPa para 50% de probabilidade e 42,658 kPa para 99% de probabilidade de danos.

Pode-se também determinar a distância alcançada por uma onda de choque nos níveis de sobrepressão mostrados na Tabela 11. Para determinação das distâncias serão utilizadas as Eqs. (10) e (12) do método TNT equivalente.

O resultado das distâncias alcançadas pode ser visualizado na Tabela 12.

Tabela 12 – Distância alcançada *versus* Probabilidade de ocorrência de danos estruturais.

Probabilidade de Ocorrência de Danos Estruturais (%)	Sobrepressão estimada (kPa)	Distância Alcançada (m)
1	8,648	18,473
50	19,207	9,396
99	42,658	5,473

Com base nas Tabelas 10, 11 e 12, pode-se concluir que, uma distância de 30 metros ou mais pode ser considerada uma distância segura para a passagem do caminhão-tanque, na qual a probabilidade de ocorrência de danos estruturais é menor do que 1%.

4.4. Comparação dos Métodos

Como visto no Capítulo 2, diversos são os métodos utilizados para estimar a sobrepressão a partir de uma explosão a uma determinada distância do epicentro da mesma. Alguns destes levam em conta o local da explosão, intensidade do gás, densidade dos obstáculos, etc. Outros fazem considerações simplificadoras que reduzem sensivelmente o tempo para a obtenção da resposta. A seguir, realiza-se uma comparação do valor de sobrepressão obtido entre os métodos citados no Capítulo 2.

Em todos os métodos será considerada a distância real igual a 30 m e serão utilizados os dados de um cilindro industrial típico [5], o qual possui as seguintes características:

Volume do cilindro, $V_{cil} = 49 \times 10^{-3} \text{ m}^3$;

Massa de hidrogênio, $m_{H_2} = 0,65 \text{ kg}$;

Pressão de armazenamento, $p = 164 \times 10^5 \text{ Pa}$.

4.4.1. Método TNT Equivalente

A sobrepressão resultante de uma explosão calculada através do método TNT equivalente foi de 5,174 kPa.

O desenvolvimento de todos os cálculos assim como as considerações feitas encontra-se no item 4.1

4.4.2. Método da Onda de Choque - TNO

O procedimento de cálculo é apresentado em quatro etapas segundo a Ref. [8]. A primeira delas é o cálculo do volume estequiométrico de mistura. Para este cálculo será utilizada a Eq. (14) e os seguintes parâmetros:

$p_a = 101,3 \text{ kPa}$;

$$m_{H_2} = 0,650 \text{ kg};$$

$$R = 8,314 \text{ m}^3 \cdot \text{Pa} / \text{mol} \cdot \text{K}$$

$$T = 298 \text{ K};$$

$$n = 1 \text{ mol}$$

$$M = 2,02 \times 10^{-3} \text{ kg/mol}$$

$$V_0 = \left[\frac{(1 + 5(1)) \cdot (0,650) \cdot (298) \cdot (8,314)}{(2,02 \cdot 10^{-3}) \cdot (101,3 \cdot 10^3)} \right] = 47,69 \text{ m}^3 \quad (41)$$

A segunda delas é o cálculo do comprimento característico, L_0 , conforme a Eq. (13).

$$L_0 = \left(\frac{47,69 \cdot 3,5 \cdot 10^6}{101,3 \cdot 10^3} \right)^{\frac{1}{3}} = 11,81 \text{ m} \quad (42)$$

Na terceira etapa, estima-se o nível de sobrepressão. Conforme a Tabela 5, o hidrogênio é um gás com alta reatividade, $u_f = 160 \text{ m/s}$ e $\Phi = 0,15$. Fazendo o uso da Eq. (15), tem-se:

$$p_0 = (101,3) \cdot (0,15) \cdot \left(\frac{11,81}{30} \right) = 5,981 \text{ kPa} \quad (43)$$

4.4.3. Método Multienergia - TNO

Para o cálculo da sobrepressão resultante de uma explosão através deste método, o gás hidrogênio foi considerado como um gás ideal, uma vez que as pressões envolvidas, nos cenários em estudo, são menores que 300 MPa. Será utilizada uma energia igual a $1,97 \times 10^6 \text{ J}$, calculada pela Eq. (30).

Para aplicar o método multienergia uma força de explosão 10 é escolhida, já que estamos tratando de uma detonação em área não confinada. A distância normalizada é calculada pela Eq. (17). O resultado é

$$\bar{R} = \frac{30}{\left(\frac{1,97 \cdot 10^6}{101,3 \cdot 10^3}\right)^{\frac{1}{3}}} = 11,16 \quad (44)$$

A curva 10 da Figura 7 (a) é utilizada para determinar o valor da sobrepressão normalizada, $\bar{\Delta P}_s$, o qual é de aproximadamente 0,025. A sobrepressão resultante é determinada pela Eq. (18).

$$p_0 = (0,025) \cdot (101,3kPa) = 2,534kPa \quad (45)$$

4.4.4. Modelo Baker-Strehlow-Tang (BST)

O primeiro fato que deve ser levado em consideração para a aplicação deste método é a reatividade do gás, a qual é alta para o gás hidrogênio.

Em seguida, considera-se o congestionamento ou densidade dos obstáculos. A área de depósito de cilindros de hidrogênio é uma área livre, portanto, classifica-se como uma área com baixa presença de obstáculos.

E por último, o congestionamento ou a expansão da chama deve ser levado em conta. A área da explosão é uma área não confinada, portanto, é classificada com uma dimensão 3D.

De acordo com a Tabela 6, a velocidade da chama adequada (número de Mach, M_f) para o caso em estudo é 0,36.

Para o cálculo de \bar{R} e de p_0 , este método utiliza as Eqs. (17) e (18) do Método Multienergia, respectivamente. Deste modo, $\bar{R} = 2,54$.

A Figura 8 é utilizada para se determinar o valor da sobrepressão normalizada, $\bar{\Delta P}_s$, a qual é de aproximadamente 0,04. A sobrepressão resultante é:

$$p_0 = (0,04) \cdot (101,3kPa) = 4,052kPa \quad (46)$$

O valor das sobrepressões, para um mesmo cenário, por diferentes métodos pode ser visualizado na Tabela 13.

Tabela 13 – Valor da sobrepressão obtido por diferentes métodos.

Método	Sobrepressão (kPa)	Dano Esperado
TNT Equivalente	5,174	Pequenas e grandes janelas são normalmente destruídas, e algumas destas têm a armação danificada
Onda de Choque	5,981	
Baker-Strehlow-Tang	4,052	
Multienergia	2,534	Alguns danos nos tetos das casas; Quebra de 10% dos vidros das janelas; Limite de estilhaços.

O baixo valor encontrado para a sobrepressão resultante através do método multienergia se deve ao fato de que a idéia básica deste método consiste em que apenas parcelas com certo grau de confinamento ou localizadas em partes da nuvem particularmente obstruídas são as que realmente contribuem para a geração de sobrepressão significativa, ao invés de toda a porção inflamável da nuvem. O cenário em estudo apresenta uma explosão (detonação) em uma área não confinada e sem obstáculos. Diante dos fatos apresentados, conclui-se que o método multienergia – TNO não é aplicável no cálculo dos efeitos de sobrepressão resultante de uma explosão para o cenário em estudo.

Segundo o Método Baker-Strehlow-Tang (BST), o efeito de uma sobrepressão será maior quanto maior for a aceleração da chama, a qual é determinada pelos fatores: reatividade do produto inflamável, densidade dos obstáculos e expansão da chama. O resultado de sobrepressão encontrado por este método está condizente, pois, o cenário em estudo não apresenta densidade dos obstáculos reduzindo assim o seu valor.

Os valores encontrados nos métodos TNT equivalente e onda de choque são bem próximos e as sobrepressões resultantes provocam o mesmo dano às estruturas. Os dois métodos não levam em consideração o grau de obstrução da área e as

propriedades físico-químicas da explosão devem ser idealizadas para que seu cálculo possa ser realizado rapidamente.

Capítulo 5

– Conclusões e Sugestões –

Neste capítulo são apresentadas as conclusões referentes aos resultados dos efeitos das explosões de uma nuvem de gás hidrogênio com base no método TNT equivalente tendo com base o modelo de vulnerabilidade de Eisenberg em estruturas externas no sítio de uma central nuclear, bem como sugestões para trabalhos futuros.

O objetivo principal deste trabalho foi avaliar os efeitos ocasionados pela sobrepressão e fragmentos resultantes de uma explosão de um cilindro de hidrogênio, para avaliar se a transferência de rejeitos líquidos radioativos no sítio de uma central nuclear oferece riscos de vazamento radioativo ao entorno da instalação.

Foram mencionados dois cenários de acidentes. O primeiro considera que o fragmento resultante da explosão de um cilindro pressurizado ocasiona a capotagem do caminhão-tanque e subsequente vazamento de rejeito líquido. O segundo considera que a sobrepressão resultante da explosão do cilindro pressurizado ocasiona a capotagem do caminhão-tanque e subsequente vazamento de rejeito líquido. Em todos, foram consideradas explosões em caso de ruptura catastrófica do cilindro.

Os resultados deste trabalho mostram, por meio de cálculos, que a sobrepressão e os fragmentos gerados pela explosão de um cilindro de gás hidrogênio não são capazes de ocasionar a capotagem do caminhão-tanque em estudo e que uma distância de 30 metros ou mais pode ser considerada uma distância segura para a passagem do caminhão-tanque durante a transferência dos rejeitos radioativos líquidos, na qual a probabilidade de ocorrência de danos estruturais é menor do que 1%.

A distância segura para a probabilidade de danos materiais de 1% é de 18,473 m, para a probabilidade de 50% de danos é de 9,396 m e para a probabilidade de 99% de danos estruturais é de 5,473 m.

A uma distância de 5 m do centro da explosão, a probabilidade de danos às estruturas é de 99,7%. Tanto para uma distância de 30 m como de 100 m, a probabilidade de dano é menor do que 1%.

Através da comparação dos principais métodos disponíveis atualmente para a determinação da distribuição espacial e temporal da pressão produzida por explosão, chegou-se à conclusão de que o método TNT equivalente e o método onda de choque

– TNO são os convenientes para o cálculo da sobrepressão resultante de uma explosão em uma área não confinada e sem obstáculos. Já o método multienergia – TNO e o Modelo Baker-Strehlow-Tang (BST) por serem convenientes para aplicação em áreas mais complexas, as quais apresentem algum grau de confinamento e a presença de obstáculos, subestimaram o resultado da sobrepressão resultante.

Sugere-se para desenvolvimento de trabalhos futuros:

- Estudos considerando a população real de cilindros presentes em um depósito de H₂;
- Avaliar a possibilidade de ocorrência do efeito dominó em outros pontos do cenário em estudo, levando em consideração uma futura análise de risco;
- Considerar as características geométricas reais e sua influência durante a combustão da nuvem de vapor, usando, por exemplo, a fluidodinâmica computacional
- Estudo com levantamento de dados reais.

Referências Bibliográficas

- [1] BOZZOLAN, J, 2006, *Um Estudo sobre o Efeito Dominó em Instalações do Ciclo do Combustível Nuclear*, dissertação de mestrado, Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares (IPEN), São Paulo, SP, Brasil.
- [2] GARRISON, W.G., 1988, "Major Fires and Explosions Analyzed for a 30 Year Period". *Hydrocarbon Processing*, September, pp. 115-120.
- [3] BRITO, A. J., ALMEIDA, A. T., 2008, "Multi-Attribute Risk Assessment for Risk Ranking of Natural Gas Pipelines", *Reliability Engineering & System Safety*, v. 94, pp. 187-198.
- [4] AICHE, 2000, *Guideline for Chemical Transportation Risk Analysis*. Center for Chemical Process Safety of the American Institute of Chemical Engineers. New York.
- [5] LEES, F.P., 1996, *Loss Prevention in Process Industries*. 2 ed. Butterworth-Heinemann.
- [6] MINNITI, V. M. M., TOMAZ, S. R., 2006, *Análise, Avaliação e Gerenciamento de Riscos*, Amostra do Setor de Transferência de Conhecimento Ambiental, CETESB. São Paulo.
- [7] BJERKETVEDT, D., BAKKE, J. R., WINGERDEN, K., V., 1997, "Gas Explosion Handbook Model", *Journal of Hazardous Materials*, v. 52, pp. 1-150.
- [8] TNO, 1997, *Methods for the Calculation of the Physical Effects of the Escape of Dangerous Materials: Liquids and Gases*. 3 ed. Yellow Book, Part. II. The Hague: Sdu Uitgevers.

- [9] HAUPTMANN, U., 2001, "A Procedure for Analyzing the Flight of Missiles from Explosions of Cylindrical Vessels", ***Journal of Loss Prevention in the Process Industries***, v. 14, pp. 395-402.
- [10] CROWL, D. A., LOUVAR, J. F., 2002, ***Chemical Process Safety: Fundamentals with Applications***. 2 ed. New Jersey, Prentice Hall PTR.
- [11] LOBATO, I., 2006, "A Comparison of Hydrogen Cloud Explosion Models and the Study of the vulnerability of the Damage Caused by an Explosion of H₂". ***International Journal of Hydrogen Energy***. v. 31, pp 1780-1790.
- [12] WIEKEMA, B. J., 1980, "Vapor Cloud Explosion Model", ***Journal of Hazardous Materials***, v.3, pp. 221-232.
- [13] VANDENBERG, A. G., 1985, "The Multi Energy Method a Framework for Vapor Cloud Explosion Blast Prediction", ***Journal of Hazardous Materials***, v.12, pp. 1-10, 1985.
- [14] MERCX, W. P. M., 1993, "Current Research at TNO on Vapor Cloud Explosion Model". In: *Loss Prevention Symposium*, v. 27, Houston, Texas, AIChE.
- [15] TANG, M. J. e BACKER, Q. A., 2000, "Comparison of Blast Curves from Vapor Cloud Explosions", ***Loss Prevention in the Process Industries***, v.13, pp. 433-438.
- [16] PUTTOCK, J. S., YARDLEY, M., R., CRESSWELL, T. M., 2000, "Prediction of Vapor Cloud Explosions Using Scope Models",. ***Loss Prevention in the Process Ind.***, v.13, pp. 419-431, Elsevier.
- [17] CROWL, D. A, 2003, ***Understanding Explosions***. New York, CCPS.

Apêndice

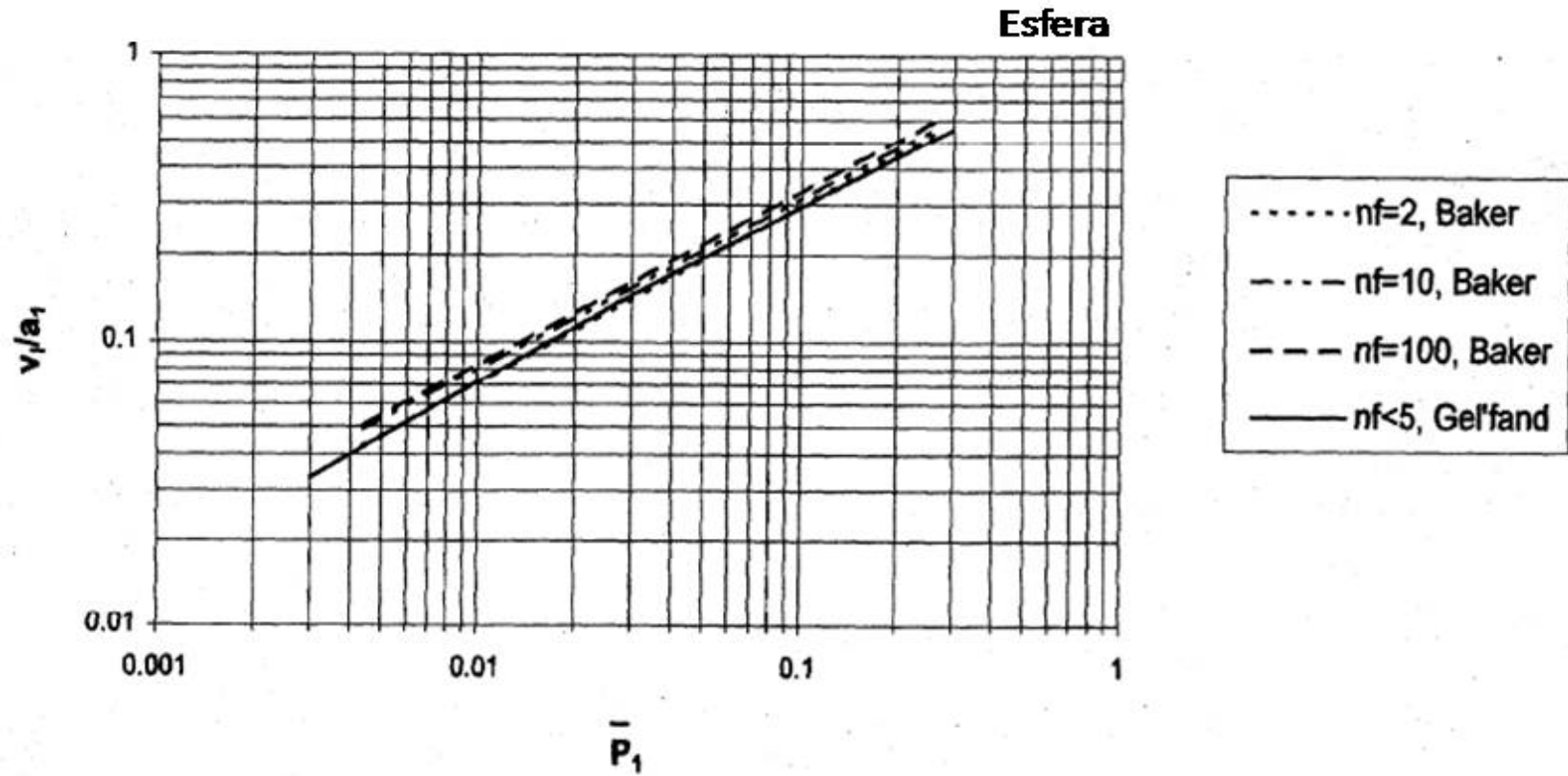


Figura 12 – Velocidade do Fragmento vs Pressão escalar para vasos esféricos contendo gás ideal.

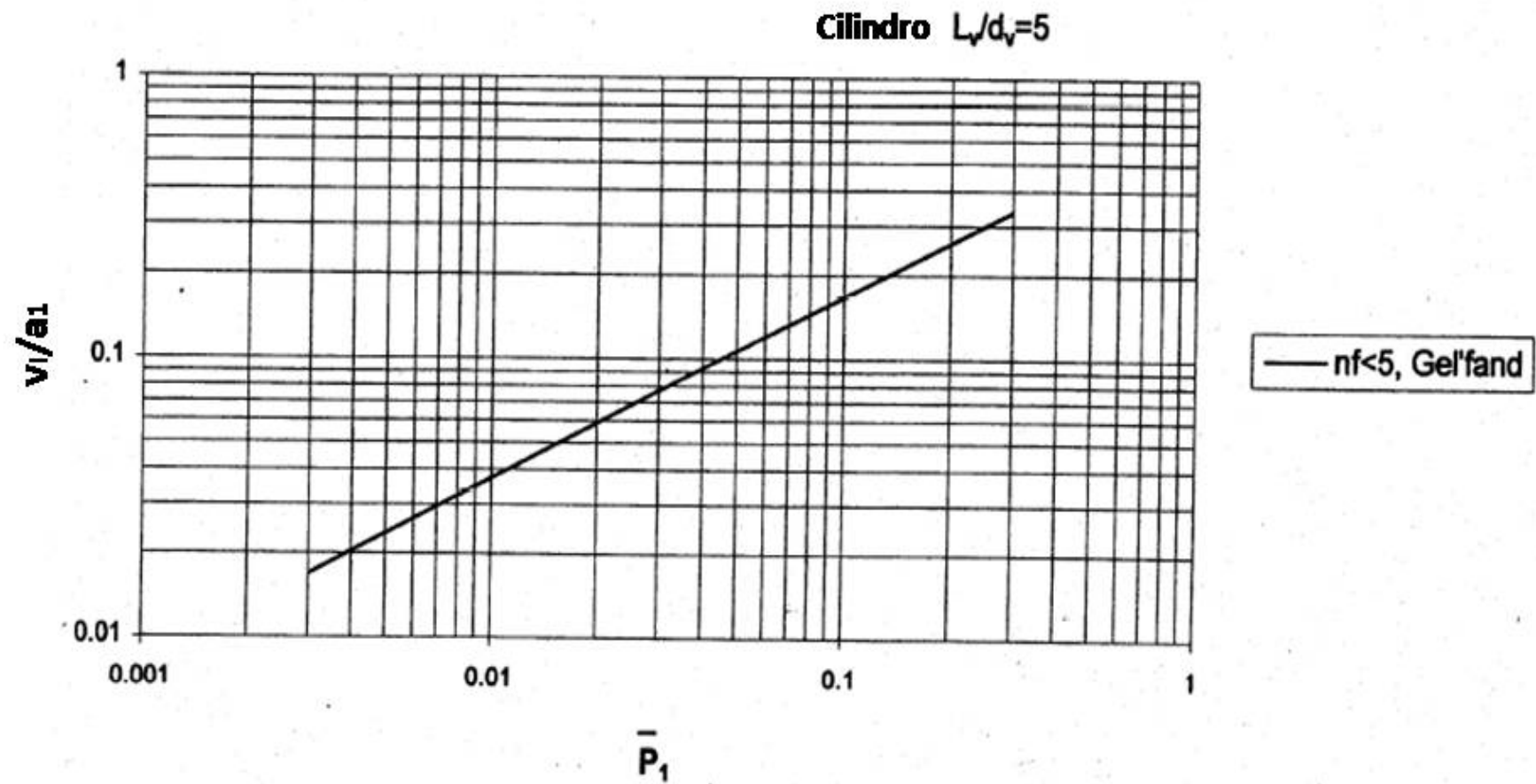


Figura 13 – Velocidade do fragmento vs Pressão escalar para vasos cilíndricos com $L_v/d_v=5$ contendo gás ideal.

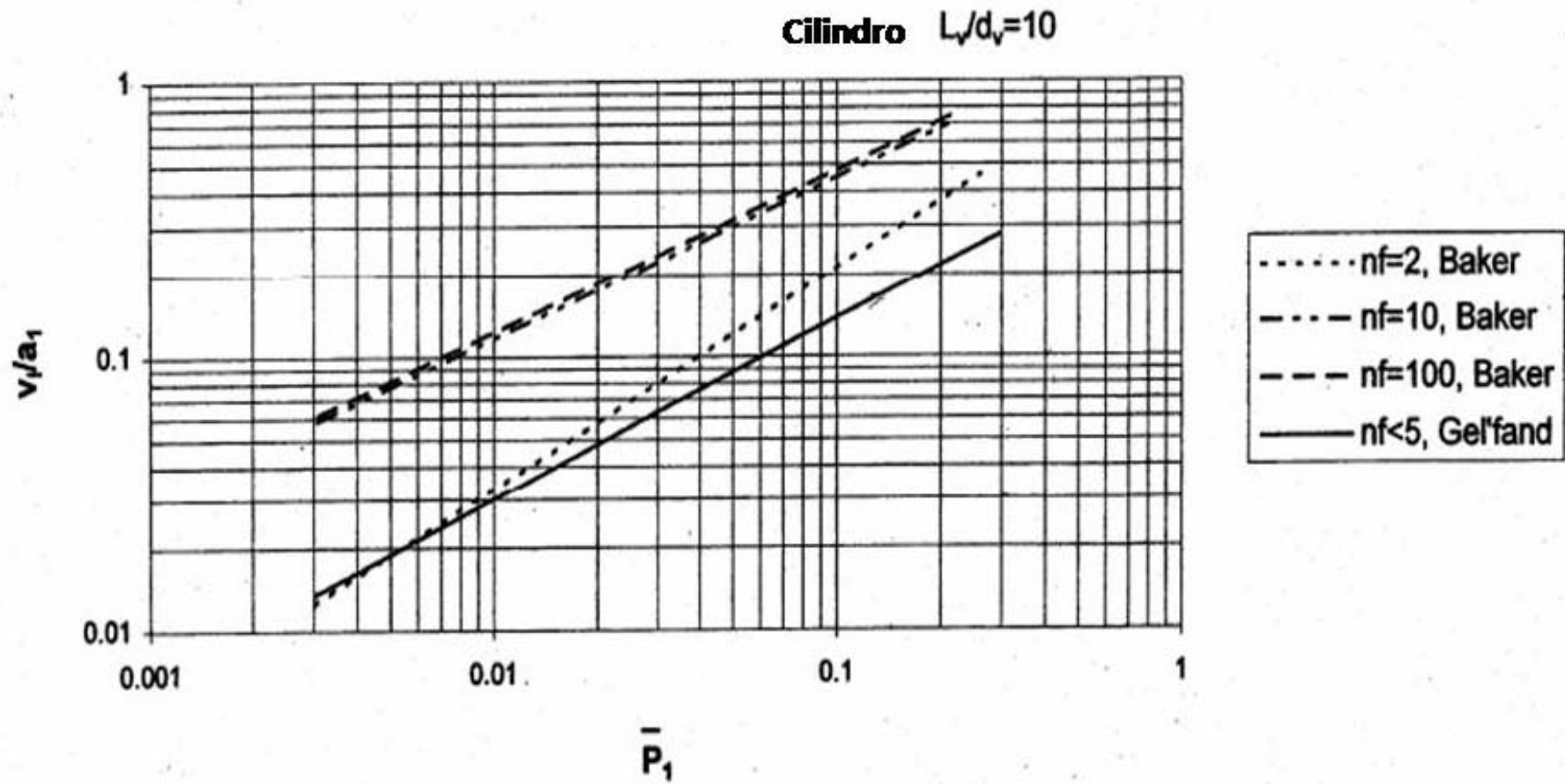


Figura 14 - Velocidade do fragmento vs Pressão escalar para vasos cilíndricos com $L_v/d_v=10$ contendo gás ideal.

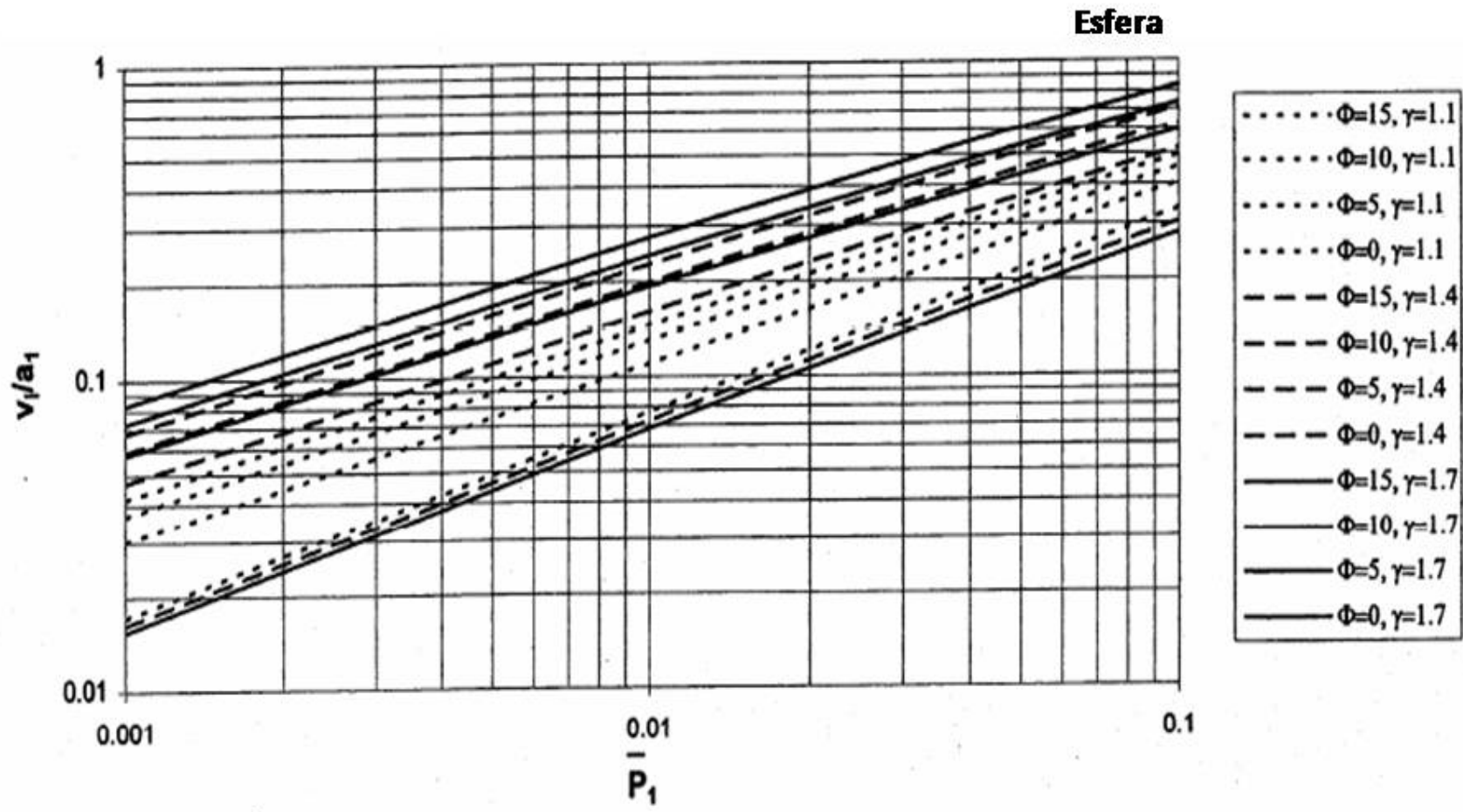


Figura 15 - Velocidade do fragmento vs Pressão escalar para vasos esféricos com ruptura devida a reações químicas fora de controle.

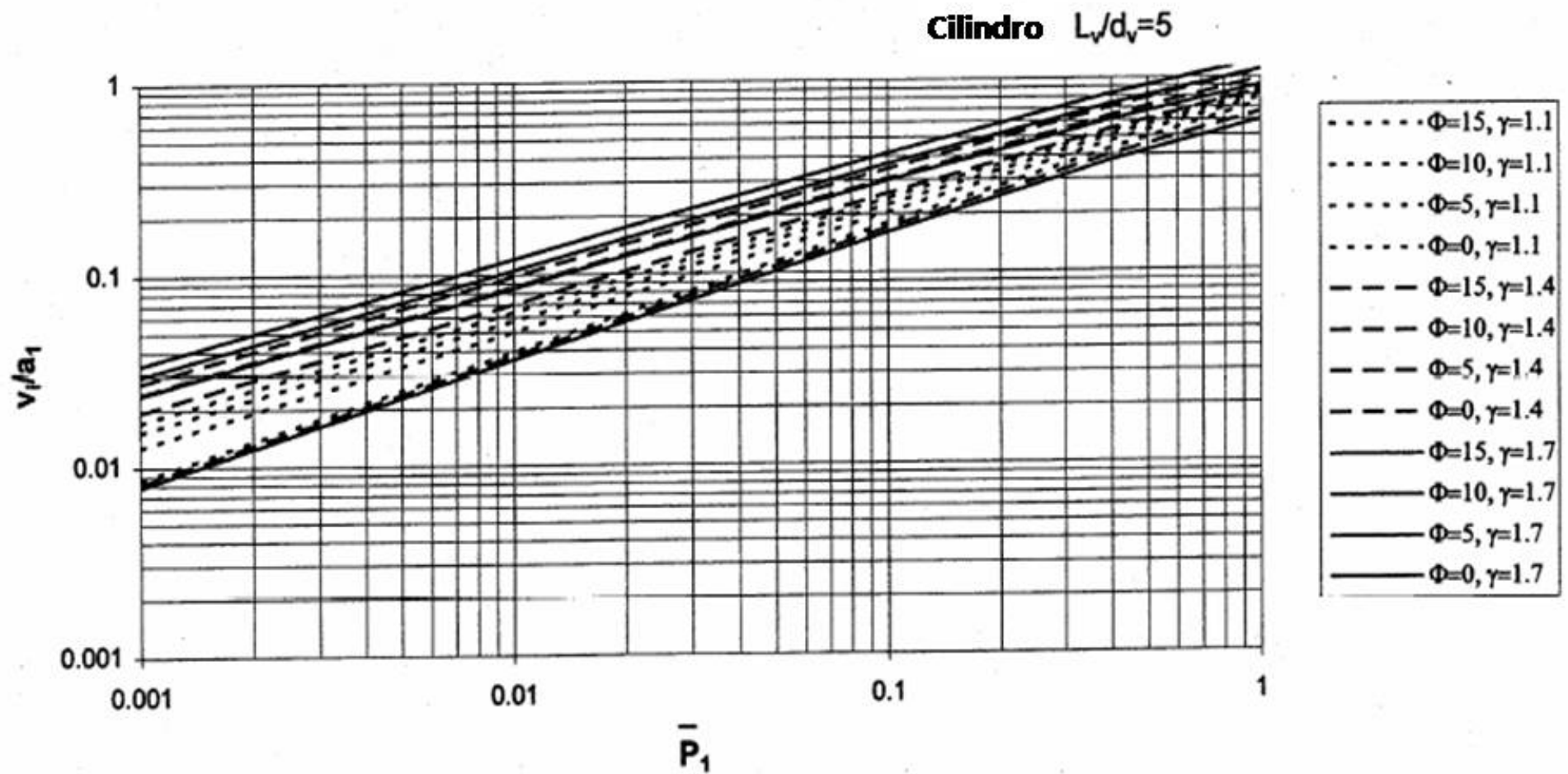


Figura 16 - Velocidade do fragmento vs Pressão escalar para vasos cilíndricos com ruptura devida a reações químicas fora de controle e com $L_v/d_v=5$.

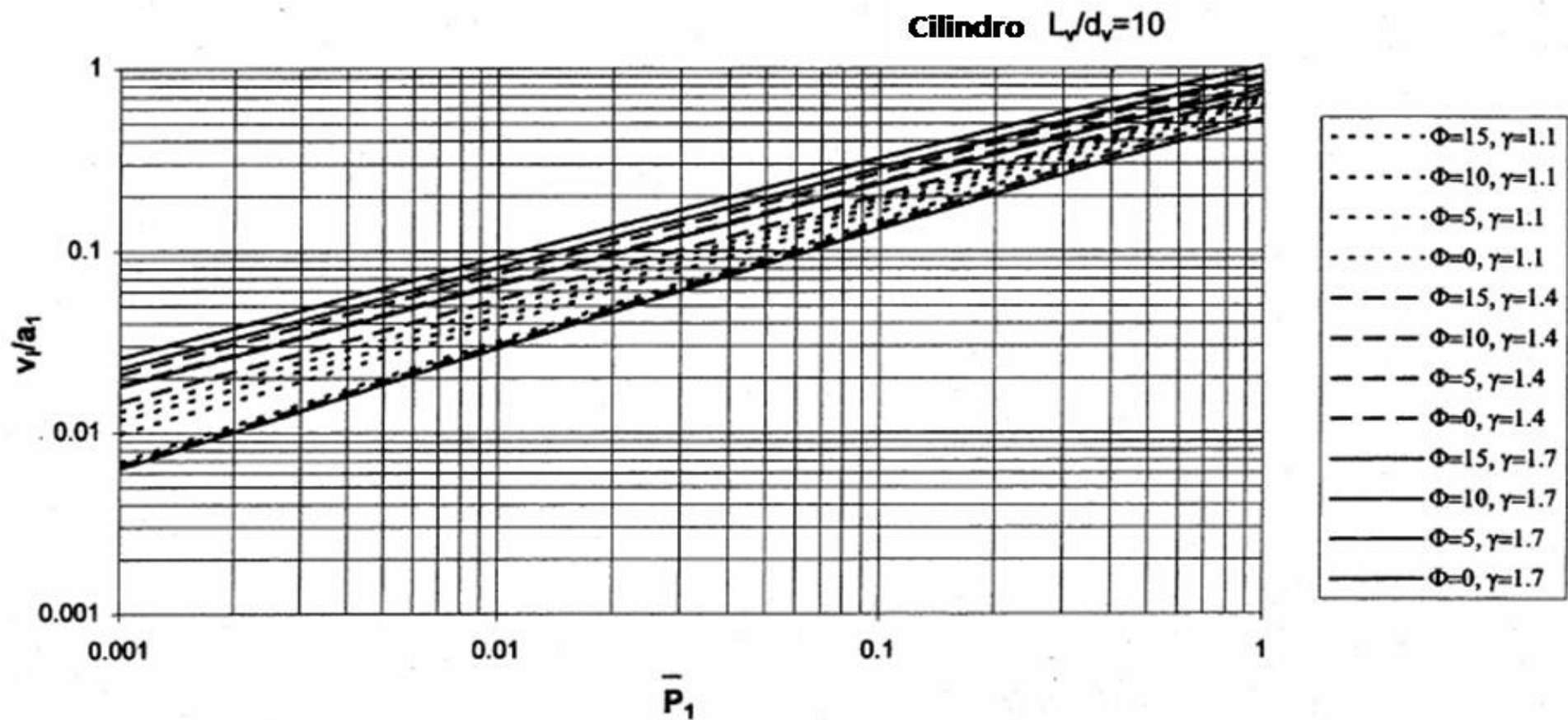


Figura 17 - Velocidade do fragmento vs Pressão escalar para vasos cilíndricos com ruptura devida a reações químicas fora de controle e com $L_v/d_v=10$.

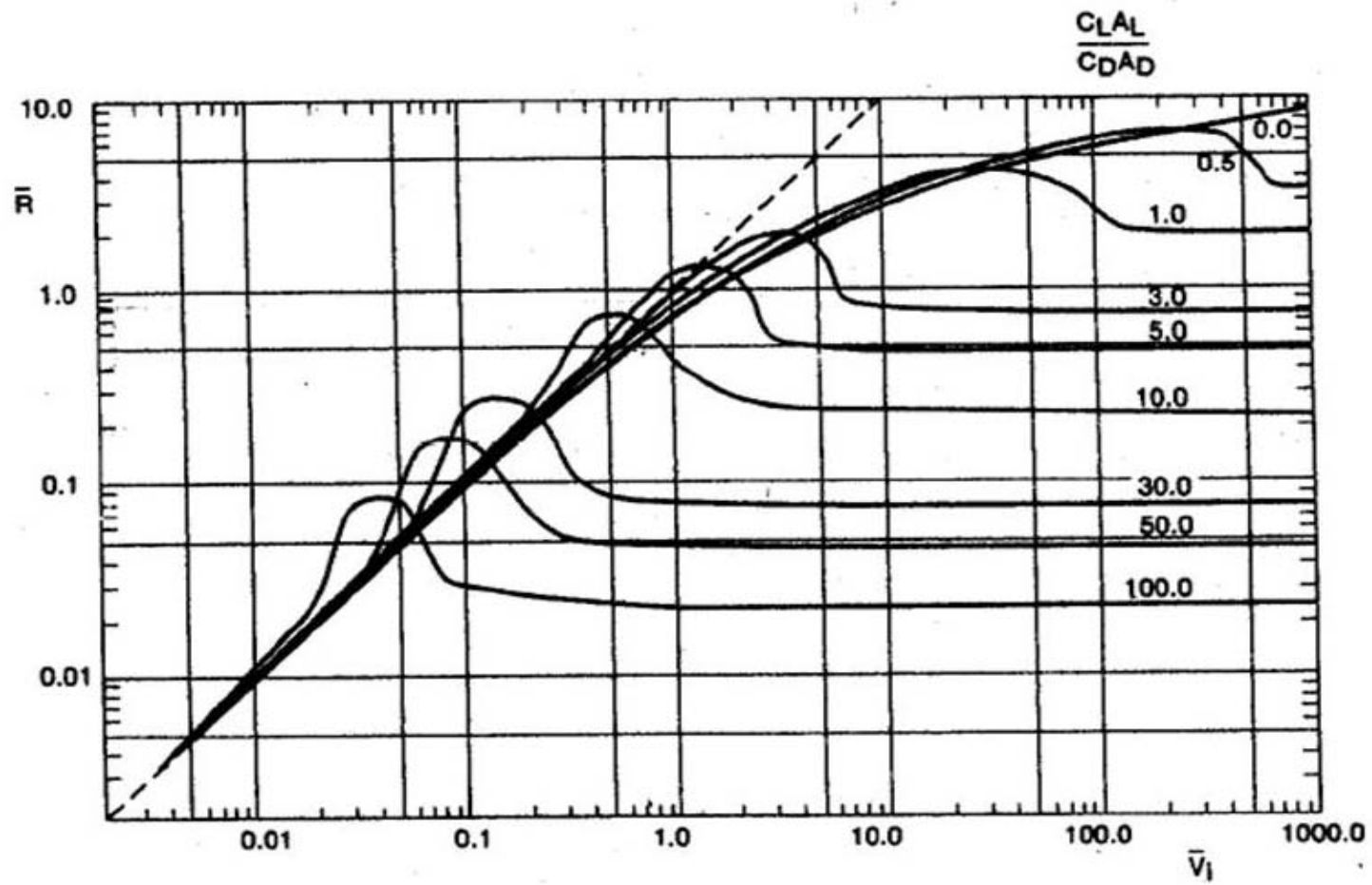


Figura 18 – Previsão de alcance de fragmentos.