



**ESTUDO DAS EXPLOSÕES DE TANQUES DE GÁS E MEDIDAS DE MITIGAÇÃO
DE SEUS EFEITOS POR MEIO DE SIMULAÇÕES NUMÉRICAS COM USO DA
FLUIDODINÂMICA COMPUTACIONAL**

Tiago Rodrigues Coelho de Moura

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO EM ESTRUTURAS E CONSTRUÇÃO CIVIL
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL**

FACULDADE DE TECNOLOGIA

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL**

**ESTUDO DAS EXPLOSÕES DE TANQUES DE GÁS E
MEDIDAS DE MITIGAÇÃO DE SEUS EFEITOS POR MEIO
DE SIMULAÇÕES NUMÉRICAS COM USO DA
FLUIDODINÂMICA COMPUTACIONAL**

TIAGO RODRIGUES COELHO DE MOURA

ORIENTADORA: GRACIELA NORA DOZ DE CARVALHO

COORIENTADOR: MURILO LIMEIRA DA COSTA NETO

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO EM ESTRUTURAS E
CONSTRUÇÃO CIVIL**

PUBLICAÇÃO: DM-06A/23

BRASÍLIA/DF: MAIO – 2023

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL

**ESTUDO DAS EXPLOSÕES DE TANQUES DE GÁS E MEDIDAS DE
MITIGAÇÃO DE SEUS EFEITOS POR MEIO DE SIMULAÇÕES
NUMÉRICAS COM USO DA FLUIDODINÂMICA COMPUTACIONAL**

TIAGO RODRIGUES COELHO DE MOURA

**DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA
CIVIL E AMBIENTAL DA FACULDADE DE TECNOLOGIA DA
UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA COMO PARTE DOS REQUISITOS
NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM
ESTRUTURAS E CONSTRUÇÃO CIVIL.**

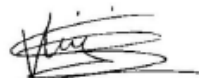
APROVADA POR:



Prof.ª Graciela Nora Doz de Carvalho, Dra. (ENC-UnB)
(Orientadora)



Prof. José Luís Vital de Brito, Dr. (ENC-UnB)
(Examinador Interno)



Prof. Gregorio Sandro Vieira, Dr. (UFU)
(Examinador Externo)

BRASÍLIA/DF, 05 DE MAIO DE 2023

FICHA CATALOGRÁFICA

MOURA, TIAGO RODRIGUES COELHO DE

Estudo das explosões de tanques de gás e medidas de mitigação de seus efeitos por meio de simulações numéricas com uso da fluidodinâmica computacional. [Distrito Federal] 2023.

xxii, 107p., 210 x 297 mm (ENC/FT/UnB, Mestre, Estruturas e Construção Civil, 2023).

Dissertação de Mestrado – Universidade de Brasília. Faculdade de Tecnologia.

Departamento de Engenharia Civil e Ambiental.

1. Tanque de gás

2. Explosão

3. Onda de choque

4. Danos

5. Barreiras de proteção

I. ENC/FT/UnB

II. Título (Mestre)

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

MOURA, T. R. C. (2023). Estudo das explosões de tanques de gás e medidas de mitigação de seus efeitos por meio de simulações numéricas com uso da fluidodinâmica computacional. Dissertação de Mestrado em Estruturas e Construção Civil. Publicação E. DM-06A/23, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 107p.

CESSÃO DE DIREITOS

AUTOR: Tiago Rodrigues Coelho de Moura.

TÍTULO: Estudo das explosões de tanques de gás e medidas de mitigação de seus efeitos por meio de simulações numéricas com uso da fluidodinâmica computacional.

GRAU: Mestre

ANO: 2023

É concedida à Universidade de Brasília permissão para reproduzir cópias desta dissertação de mestrado e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte dessa dissertação de mestrado pode ser reproduzida sem autorização por escrito do autor.

Tiago Rodrigues Coelho de Moura

QI 20, BL H, apto 209, Guará 1, 71.015-086, Brasília-DF, Brasil

e-mail: tiago.trcm@gmail.com

AGRADECIMENTOS

A Deus, ergo minha voz de gratidão pela graça, pela dádiva da vida e por Tua infalível misericórdia que, até nas dificuldades, permitiu-me crescer e superar obstáculos.

Expresso minha sincera gratidão à minha amada esposa Jéssica, cuja constante presença, apoio e companheirismo nos momentos alegres e difíceis ilumina minha vida.

Aos meus pais, pessoas simples do campo, agradeço pelo apoio e pelo ensinamento de valores que me ajudaram a trilhar um caminho justo.

A minha orientadora, Graciela Doz, e meu coorientador, Murilo, são detentores de minha gratidão pela paciência, dedicação e suporte que me possibilitou o desenvolvimento deste trabalho.

A todos os professores do PECC, em sua sabedoria e generosidade, minha admiração e agradecimento por compartilharem seus conhecimentos e, em muitas situações, por serem fonte de inspiração e motivação.

Por fim, expresso minha gratidão à Universidade de Brasília e seus colaboradores, que tornaram e tornam possível a capacitação de muitos, contribuindo para o desenvolvimento científico e profissional.

RESUMO

ESTUDO DAS EXPLOSÕES DE TANQUES DE GÁS E MEDIDAS DE MITIGAÇÃO DE SEUS EFEITOS POR MEIO DE SIMULAÇÕES NUMÉRICAS COM USO DA FLUIDODINÂMICA COMPUTACIONAL.

Autor: Tiago Rodrigues Coelho de Moura

Orientador: Graciela Nora Doz de Carvalho

Coorientador: Murilo Limeira da Costa Neto

Programa de Pós-graduação em Estruturas e Construção Civil

Brasília, Maio de 2023

Em muitas edificações urbanas, o gás é provido por meio de centrais onde se localiza tanques pressurizados. Um dos principais riscos associados a esses locais é a explosão, a qual pode gerar, como efeito primário, uma onda de choque. As explosões são caracterizadas pela expansão súbita de um material e liberação de energia. Em muitas situações, esse fenômeno pode ser catastrófico, pois a sobrepressão da onda de choque pode causar danos materiais e até mesmo fatalidades. Nesse contexto, muitos estudos contribuíram para o conhecimento sobre explosões de tanques pressurizados. No entanto, é necessário expandir ainda mais a compreensão desse tópico utilizando ferramentas numéricas que possam superar as limitações dos modelos analíticos, como a previsão de pressões em ambientes com múltiplas reflexões da onda de choque. Por meio de simulações numéricas com uso do programa Autodyn do pacote Ansys® Workbench, o presente trabalho objetivou a análise da distribuição das sobrepressões da onda de choque resultante de explosões de tanques de gás próximos às edificações. Primeiro, em ambientes representando situações comuns em meios urbanos, esse fenômeno das explosões foi analisado considerando alguns modelos de tanque sobre o solo e em abrigo enterrado. Além disso, foi analisada a influência de obstáculos físicos na propagação da onda de choque e seu potencial mitigatório em cada cenário proposto. Os resultados permitiram uma compreensão mais abrangente da distribuição de pressões em cada situação analisada bem como a correlação com possíveis danos. Ficou evidente que, quando bem posicionado, o uso de tanques em abrigos enterrados e muros de proteção são medidas apropriadas para reduzir os efeitos nocivos de uma explosão nas edificações e seus usuários.

Palavras-Chaves: Tanques de gás, Explosão, Onda de choque, Danos, Barreiras de proteção.

ABSTRACT

STUDY OF GAS TANKS EXPLOSIONS AND MITIGATION MEASURES OF THEIR EFFECTS THROUGH NUMERICAL SIMULATIONS USING COMPUTATIONAL FLUID DYNAMICS.

Author: Tiago Rodrigues Coelho de Moura

Supervisor: Graciela Nora Doz de Carvalho

Co-supervisor: Murilo Limeira da Costa Neto

Postgraduate Program in Structures and Civil Construction

Brasília, May of 2023

Gas is commonly supplied to urban buildings through centralized gas storage systems, utilizing pressurized tanks. Despite the understanding of the behavior of pressurized vessels, these locations present a significant risk of explosions, that leads to shock wave generation. Explosions occur when a material undergoes sudden expansion, releasing a tremendous amount of energy. In many cases, this phenomenon can have catastrophic consequences, causing material damage and even fatalities due to the high shock wave overpressure. Numerous studies have contributed to the knowledge about pressurized tank explosions. However, there is a need to further advance on the understanding of this subject using numerical tools that can overcome the limitations of analytical models, such as accurately predicting pressures in environments with multiple shock wave reflections. In this study, numerical simulations were conducted using the Autodyn program from the Ansys® Workbench package, aiming to analyze the distribution of overpressure resulting from gas tank explosions near buildings. The study first examined explosion scenarios in common urban settings, considering both aboveground and underground tanks. Additionally, the influence of physical barriers on shock wave propagation and their potential mitigating effects in each proposed scenario were analyzed. The results provided a comprehensive understanding of pressure distribution in each analyzed situation, along with its correlation with potential damage. It became evident that the strategic positioning of underground tanks and the use of protective walls are appropriate measures to reduce the harmful effects of explosions on buildings and their occupants.

Keywords: Gas tanks, Explosion, Shock wave, Damage, Protective barriers.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	1
1.1. JUSTIFICATIVA	3
1.2. OBJETIVOS	3
1.2.1. Objetivo geral	3
1.2.2. Objetivos específicos	3
1.3. SÍNTESE METODOLÓGICA	4
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	5
3. FUNDAMENTOS TEÓRICOS	14
3.1. CONCEITOS BÁSICOS DA EXPLOSÃO	14
3.2. ONDA DE CHOQUE	14
3.2.1. Características e fundamentos da onda de choque	14
3.2.2. Reflexão da onda de choque e seus efeitos	18
3.2.3. Refração da onda de choque	19
3.2.4. Difração da onda de choque	20
3.2.5. Carregamentos de explosões em estruturas	21
3.3. PREDIÇÃO DA ENERGIA EM TANQUES DE GÁS	22
3.3.1. Equações de estado e parâmetros de equivalência	22
3.3.2. Massa equivalente de TNT	25
3.3.3. Modelos de predição da energia mecânica em tanques de gás	26
3.4. SOBREPRESSÃO DA ONDA DE CHOQUE	29
3.4.1. Lei de escala	29
3.4.2. Prognóstico das sobrepressões	30
3.4.3. Efeitos da sobrepressão nas estruturas	30
3.4.4. Efeitos da sobrepressão nos seres humanos	32
3.5. PROTEÇÃO DE ESTRUTURAS CONTRA EXPLOSÕES	34
3.6. PARÂMETROS NORMATIVOS	35
3.6.1. Instalação de reservatórios de gás	35
3.6.2. Limites de sobrepressão nos seres humanos	38
3.7. FERRAMENTA COMPUTACIONAL	39
3.7.1. Conceito básico dos hidrocódigos	40
3.7.2. Autodyn	40
4. ANÁLISES E DISCUSSÕES	42
4.1. CONSIDERAÇÕES PRELIMINARES PARA AS SIMULAÇÕES	42
4.2. VALIDAÇÃO DA FERRAMENTA NUMÉRICA	47

4.3. PRIMEIRO GRUPO DE SIMULAÇÕES: ANÁLISE DA EXPLOSÃO DOS TANQUES DE GÁS SOBRE O SOLO E EM ABRIGOS ENTERRADOS	52
4.3.1. Considerações gerais para o primeiro grupo de simulação.....	53
4.3.2. Explosão dos tanques de gás sobre o solo.....	56
4.3.3. Explosão de tanques de gás em abrigo enterrado.....	66
4.3.4. Explosões de tanques de gás próximos à fachada de um edifício: análise comparativa entre o modelo com tanque sobre o solo e em abrigo enterrado.....	70
4.4. SEGUNDO GRUPO DE SIMULAÇÕES: ANÁLISE DE BARREIRAS FÍSICAS DE PROTEÇÃO CONTRA OS EFEITOS DAS EXPLOSÕES DE TANQUES DE GÁS .	75
4.4.1. Análise da eficiência de muros de concreto em cenários com tanques sobre o solo e enterrados	77
4.4.2. Análise da integridade dos muros de proteção.	81
4.4.3. Análise de posicionamento e geometria dos muros de proteção quanto à eficiência em mitigar as sobrepressões nas edificações	83
4.4.4. Análise de valetas e solo rugoso implementados como medidas para mitigação das sobrepressões na face frontal do muro	92
5. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	96
5.1. CONCLUSÕES	96
5.2. RECOMENDAÇÕES PARA ESTUDOS FUTUROS.....	99
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	100
ANEXO	107

LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1 - Esquema típico de uma onda de choque	15
Figura 3.2 - Esquema de propagação radial da onda de choque.....	15
Figura 3.3 - Esquema de um tubo de choque	16
Figura 3.4 - Esquema básico da reflexão oblíqua da onda de choque.....	18
Figura 3.5 - Esquema básico da reflexão Mach.....	19
Figura 3.6 - Simulação da reflexão da onda de choque no Autodyn.....	19
Figura 3.7 - Esquema básico da refração da onda de choque.....	20
Figura 3.8 - Difração da onda de choque num obstáculo	20
Figura 3.9 - Energia mecânica em função das pressões em um tanque de 72,4 L de hidrogênio.....	29
Figura 3.10 - Imagens de satélite comparando o antes e depois da explosão em Beirute.....	31
Figura 3.11 - Efeito da pressão de uma explosão associada à fase positiva e negativa	32
Figura 3.12 - Ambiente complexo resultante da explosão	33
Figura 3.13 - Modelos comuns de tanques de gás.....	35
Figura 3.14 - Centrais gás em ambientes urbanos do Distrito Federal. a) central com tanque enterrado. b), c) e d) centrais com tanques sobre o solo.....	36
Figura 3.15 - Afastamento de segurança para instalação de tanques de gás estacionários de superfície conforme NBR 13523 (ABNT, 2019).....	38
Figura 3.16 - Afastamento de segurança para instalação de tanques de gás estacionários enterrados conforme NBR 13523 (ABNT, 2019).....	38
Figura 4.1 - Simulação 2D para diferentes tamanhos do domínio do ar	43
Figura 4.2 - Picos de pressão para as diferentes larguras do domínio do ar.....	44
Figura 4.3 - Simulação com sensores em diferentes posições mantendo o mesmo raio em relação ao centro da explosão.....	45
Figura 4.4 - Pressões em função do tempo para as diferentes posições dos sensores e diferentes malhas	46
Figura 4.5 - Modelo de cunha para problemas esfericamente simétricos	46
Figura 4.6 - Cunha (wedge) discretizada com Ar e TNT no Autodyn	47
Figura 4.7 - Experimento de Tschirschwitz et al. (2017)	48
Figura 4.8 - Energia armazenada no tanque de 27,2 litros com gás propano.....	49
Figura 4.9 - Modelo discretizado no Autodyn.....	50

Figura 4.10 - Sobrepressões em função da distância da explosão para o tanque de 27,2 litros com propano	52
Figura 4.11 - Propagação da onda de choque no modelo numérico.....	52
Figura 4.12 - Ambiente 1.....	56
Figura 4.13 - Ambiente 2.....	56
Figura 4.14 - Modelo 1 discretizado no Autodyn com malha de 100 mm (tanque de gás com volume igual a 0,5 m ³).....	60
Figura 4.15 - Modelo 2 discretizado no Autodyn com malha de 100 mm (tanque de gás com volume igual a 2,0 m ³).....	61
Figura 4.16 - Modelo 3 discretizado no Autodyn com malha de 100 mm (tanque de gás com volume igual a 5,5 m ³).....	61
Figura 4.17 - Modelo 4 discretizado no Autodyn com malha de 100 mm (tanque de gás com volume igual a 8,0 m ³).....	61
Figura 4.18 - Modelo 5 discretizado no Autodyn com malha de 100 mm (tanque de gás com volume igual a 120 m ³).....	62
Figura 4.19 - Picos de sobrepressão nos sensores 1, 2 e 3 do modelo 1	62
Figura 4.20 - Picos de sobrepressão nos sensores 1, 2 e 3 do modelo 2	63
Figura 4.21 - Picos de sobrepressão nos sensores 1, 2 e 3 do modelo 3	63
Figura 4.22 - Picos de sobrepressão nos sensores 1, 2 e 3 do modelo 4	63
Figura 4.23 - Picos de sobrepressão nos sensores 1, 2 e 3 do modelo 5	64
Figura 4.24 - Sobrepressões máximas nos sensores 4 ao 7 do modelo 1 (explosão do tanque de propano com volume de 0,5 m ³).....	64
Figura 4.25 - Sobrepressões máximas nos sensores 4 ao 7 do modelo 2 (explosão do tanque de propano com volume de 2,0 m ³).....	65
Figura 4.26 - Sobrepressões máximas nos sensores A, B, C e D do modelo 3 (explosão do tanque de propano com volume de 5,5 m ³).....	65
Figura 4.27 - Sobrepressões máximas nos sensores externos 4, 5 e 6 e internos A, B, C e D do modelo 4 (explosão do tanque de propano com volume de 8 m ³).....	65
Figura 4.28 - Sobrepressões máximas nos sensores externos 4 ao 9 e internos A, B, C e D do modelo 5 (explosão do tanque de propano com volume de 120 m ³).....	66
Figura 4.29 - Esquema de tanques de gás em abrigo enterrado	66
Figura 4.30 - Modelo 6 discretizado no Autodyn com malha de 100 mm (tanque de gás com volume igual a 8,0 m ³ em abrigo enterrado)	68

Figura 4.31 - Modelo 7 discretizado no Autodyn com malha de 100 mm (tanque de gás com volume igual a 120 m ³ em abrigo enterrado)	68
Figura 4.32 - Picos de sobrepressão nos sensores 1, 2 e 3 do modelo 6	69
Figura 4.33 - Picos de sobrepressão nos sensores 1, 2 e 3 do modelo 7	69
Figura 4.34 - Sobrepressões máximas nos sensores A, B, C e D do modelo 6 (explosão do tanque de propano com volume de 8 m ³).....	70
Figura 4.35 - Sobrepressões máximas nos sensores externos 4 ao 9 e internos A, B, C e D do modelo 7 (explosão do tanque de propano com volume de 120 m ³).....	70
Figura 4.36 - Esquema do edifício para análise das sobrepressões na fachada e entorno.....	71
Figura 4.37 - Discretização no Autodyn para explosão do tanque sobre o solo.....	72
Figura 4.38 - Discretização no Autodyn para explosão do tanque em abrigo enterrado.....	72
Figura 4.39 - Picos de sobrepressões nos sensores 1, 2 e 3 para a explosão do tanque sobre o solo	73
Figura 4.40 - Picos de sobrepressões nos sensores 1, 2 e 3 para a explosão do tanque em abrigo enterrado.....	73
Figura 4.41 - Propagação da onda de choque da explosão do tanque sobre o solo.....	74
Figura 4.42 - Propagação da onda de choque da explosão do tanque em abrigo enterrado	74
Figura 4.43 - Pressões em cada sensor para os casos de explosões de tanques sobre o solo e em abrigo enterrado	74
Figura 4.44 - Sobrepressões máximas nos sensores 4 a 10 para as explosões dos tanques de 8 m ³ sobre o solo e em abrigo enterrado (malha de 20 mm).....	75
Figura 4.45 - Esquema em corte do ambiente de análise do muro de proteção	77
Figura 4.46 - Cenários discretizados no Autodyn para o tanque de 4950 L.....	79
Figura 4.47 - Picos de sobrepressões nos sensores 1, 2 e 3 para o cenário com tanque sobre o solo	80
Figura 4.48 - Picos de sobrepressões nos sensores 1, 2 e 3 para o cenário com tanque em abrigo enterrado.....	80
Figura 4.49 - Sobrepressões máximas nos pontos internos de cada cenário	81
Figura 4.50 - Integridade dos muros MR	82
Figura 4.51 - Integridade dos muros MT.....	82
Figura 4.52 - Esquema ilustrativo do ambiente de análise do tanque de 8,15 m ³	83
Figura 4.53 - Ambiente 2D de análise	85
Figura 4.54 - Sobrepressão na edificação em função do comprimento (L) do muro	86
Figura 4.55 - a) modelo de análise. b) modelo discretizado no Autodyn.....	86

Figura 4.56 - Sobrepressão nos sensores 4, 5 e 6	87
Figura 4.57 - Sobrepressão nos sensores 1, 2 e 3 para as situações sem muro e com muro nas posições P1, P2 e P3.....	87
Figura 4.58 - Geometria da seção transversal das barreiras físicas de proteção	88
Figura 4.59 - Sobrepressão nos sensores 1, 2 e 3 para cada tipo de barreira.....	90
Figura 4.60 - Bordas de topo do muro de proteção G1	91
Figura 4.61 - Sobrepressão nos sensores 1, 2 e 3 (fachada) para cada tipo de borda.....	92
Figura 4.62 - Discretização no Autodyn. a) valeta V1. b) solo rugoso	93
Figura 4.63 - Geometria da seção transversal das valetas	93
Figura 4.64 - Sobrepressão nos sensores 1, 2 e 3 (face do muro) para cada tipo de valeta.....	94
Figura 4.65 - Sobrepressão nos sensores 1, 2 e 3 (face do muro) para a valeta V3 com diferentes profundidades.....	95

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 - Coeficientes de arrasto.	22
Tabela 3.2 - Equivalências de TNT para alguns explosivos.....	25
Tabela 3.3 - Equações de predição das sobrepressões.....	30
Tabela 3.4 - Efeitos da Onda de Choque sobre Estruturas	32
Tabela 3.5 - Relação de alguns danos causados aos seres humanos	33
Tabela 3.6 - Normas do Corpo de Bombeiro Militar de cada estado brasileiro sobre manipulação, armazenamento, comercialização e utilização de gás liquefeito de petróleo (GLP).....	37
Tabela 3.7 - Processadores do Autodyn	41
Tabela 4.1 - Propriedades do ar	44
Tabela 4.2 - Propriedades do TNT	44
Tabela 4.3 - Dados experimentais de Tschirschwitz et al. (2017).....	47
Tabela 4.4 - Propriedades propano	48
Tabela 4.5 - Propriedades do ar	50
Tabela 4.6 - Propriedades do TNT	50
Tabela 4.7 - Propriedades da areia	51
Tabela 4.8 - Tipos de tanques de gás conforme a NBR 13523 (ABNT, 2019).....	53
Tabela 4.9 - Pressão do GLP em função da mistura e temperatura.....	54
Tabela 4.10 - Propriedades propano	54
Tabela 4.11 - Energia mecânica e massa equivalente de TNT em cada tanque.....	55
Tabela 4.12 - Distâncias de afastamento e identificação dos modelos de análise para os tanques sobre o solo.....	57
Tabela 4.13 - Dados de discretização dos modelos 1 e 2 com malha de 25 mm.....	57
Tabela 4.14 - Propriedades do ar	58
Tabela 4.15 - Propriedades do TNT	58
Tabela 4.16 - Propriedades do concreto 35 MPa.....	58
Tabela 4.17 - Propriedades da areia.....	59
Tabela 4.18 - Distância em metros dos sensores externos ao centro da explosão.....	60
Tabela 4.19 - Distâncias de afastamento e identificação dos modelos de análise para os tanques enterrados	67
Tabela 4.20 - Distância em metros dos sensores externos ao centro da explosão.....	67

Tabela 4.21 - Propriedades do ar	76
Tabela 4.22 - Propriedades do TNT	76
Tabela 4.23 - Propriedades do concreto 35 MPa.....	76
Tabela 4.24 - Propriedades da areia.....	77
Tabela 4.25 - Distâncias dos sensores 1, 2 e 3 ao ponto da explosão	78
Tabela 4.26 - Características do tanque de gás com 4,95 m ³	78
Tabela 4.27 - Propriedades propano	78
Tabela 4.28 - Energia mecânica e massa equivalente de TNT para o tanque de 4950 L	78
Tabela 4.29 - Detalhamento dos muros retangulares e trapezoidais	82
Tabela 4.30 - Características do tanque de gás com 8,15 m ³	83
Tabela 4.31 - Propriedades propano	84
Tabela 4.32 - Energia mecânica e massa equivalente de TNT para o tanque de 8,15 m ³	84
Tabela 4.33 - Distâncias do muro de proteção à explosão	86
Tabela 4.34 - Detalhamento das seções transversais das barreiras físicas	88
Tabela 4.35 - Porcentagem de redução dos picos de sobrepressão para cada tipo de barreira em relação ao modelo sem proteção.....	91
Tabela 4.36 - Detalhamento das seções transversais das valetas	93

LISTA DE SÍMBOLOS, NOMENCLATURA E ABREVIACÕES.

A	Área
$ABNT$	Associação Brasileira de Normas Técnicas
b	Covolume do gás
b_i	Covolume do gás “i” componente da mistura
b_m	Covolume da mistura dos gases
C_d	Coefficiente de arrasto (<i>drag coefficient</i>)
C_p	Calor específico a pressão constante
C_r	Coefficiente de reflexão
C_v	Calor específico a volume constante
C_0	Velocidade do som nas condições ambiente
C_1	Velocidade do som no meio 1
C_2	Velocidade do som no meio 2
CFD	Fluidodinâmica computacional (<i>Computational Fluid Dynamics</i>)
D	Dimensão do corpo para cálculo da força de arrasto
E	Energia
E_m	Energia mecânica armazenada no tanque de gás
e_i	Energia interna
F_d	Força de arrasto
H_{TNT}	Energia específica liberada numa explosão de TNT
$IATG$	<i>International Ammunition Technical Guideline</i>
$KOSHA$	<i>Korea Occupational Safety & Health Agency</i>
L	Comprimento da barreira de proteção
l	Comprimento do corpo para cálculo da força de arrasto
M	Massa molar
m	Massa do gás
N_i	Número de mols do gás “i” componente da mistura
N_m	Número de mols da mistura dos gases
P	Pressão
P_c	Pressão do ponto crítico do gás
P_g	Pressão do gás no interior do tanque
P_i	Pressão incidente da onda de choque

P_{r1}	Pressão refletida da onda de choque
P_{r2}	Pressão refratada da onda de choque
P_0	Pressão ambiente
q	Pressão dinâmica
R	Constante do gás
R_u	Constante universal dos gases ($R_u = 8.31434 \text{ J/mol}\cdot\text{K}$)
r	Distância do centro da explosão ao ponto de análise
S	Área de referência para o coeficiente de arrasto
T	Temperatura da onda de choque
T_c	Temperatura do ponto crítico do gás
T_0	Temperatura ambiente
TNT	Trinitrotolueno
t	tempo
U	Velocidade da onda de choque
u	Velocidade material
\vec{u}	Vetor de velocidade do fluxo
V_g	Volume do gás
\bar{v}	Volume de um mol de gás ou volume específico molar do gás
W	Massa de TNT
y_i	Fração molar
Z	Distância em escala
Z_c	Fator de compressibilidade
α_i	Ângulo de incidência
α_r	Ângulo refletido
γ	Razão dos calores específicos do gás ($\gamma=1,4$ para o ar)
ΔP	Sobrepessão
ΔP_r	Sobrepessão refletida
ρ	Massa específica
ρ_0	Massa específica inicial
∇	Gradiente

1. INTRODUÇÃO

As explosões podem ser entendidas como uma expansão súbita de um corpo sólido, líquido ou uma nuvem de gás. As fontes de uma explosão são diversas, por exemplo, depósito de materiais explosivos e combustíveis, bombas, centrais de gás, gasodutos, recipientes sob pressão, dentre outras, e em cada uma dessas fontes há um risco de explosão associado.

Uma explosão pode ocorrer tanto de forma acidental quanto de forma intencional ou criminosa. As explosões acidentais acontecem devido à falha em equipamentos, armazenamento inadequado de substâncias inflamáveis ou ruptura de vasos pressurizados, entre outros fatores. Já as explosões provocadas envolvem a ação de indivíduos.

Nos meios urbanos, muitas edificações estão sujeitas aos riscos de explosões, em especial aquelas próximas às centrais de gás. Essas centrais são locais onde se alojam os reservatórios pressurizados e os dispositivos de distribuição. As centrais de gás estão presentes em diversas construções, por exemplo, condomínios verticais, hotéis, hospitais, postos de combustíveis e outros. Nesse contexto, nota-se que a análise dos efeitos das explosões de tanques de gás próximos a essas edificações é essencial para elevar o nível de segurança e, se necessário, mitigar os efeitos danosos nas estruturas, usuários, bens e serviços.

A onda de choque produzida por uma explosão é um tipo de perturbação na massa de ar onde a pressão e velocidade variam de forma abrupta. Num ambiente aberto, a onda de choque propaga-se radialmente transportando muita energia. O trabalho desenvolvido por Zel'dovich e Raizer (1966) fundamenta temas relevantes sobre a física e equações de uma onda de choque, assim como discutem as abordagens Lagrangeana e Euleriana usadas nos cálculos numéricos. Baker et al. (1983), Kinney e Graham (1985) e Needham (2010) realizaram uma descrição detalhada das explosões e suas características fundamentais. Lees (1996) apresenta um amplo estudo sobre a prevenção de perdas nas indústrias onde uma parte do livro é dedicada às análises de explosões. Costa Neto (2019) cita que o estado da arte no campo das explosões indica um interesse no desenvolvimento de medidas para proteção de elementos estruturais, bem como a avaliação de diferentes materiais submetidos a este tipo de evento.

Os tanques de gás são recipientes hermeticamente fechados em que a alta pressão interna mantém o gás em estado líquido. Em razão desta alta pressão, um vaso

pressurizado possui elevada energia mecânica armazenada e sua explosão pode causar diversos danos no entorno. Nesse sentido, Cain (1996), Salzano et al. (2003), Schleyer (2004), Ferradás et al. (2009), Molkov e Kashkarov (2015) e Tschirschwitz et al. (2017) apresentaram estudos fundamentais sobre esta temática dos tanques de gás, permitindo uma compreensão ampla sobre explosões mecânicas e estimativa da energia armazenada nesses recipientes.

Os mecanismos de mitigação dos efeitos de uma explosão têm por finalidade a redução dos possíveis danos. Enterrar os tanques de gás tem sido uma medida de segurança bastante empregada nos ambientes urbanos. Na impossibilidade de enterrar esses tanques, o uso de barreiras físicas de proteção contra os efeitos das explosões pode ser uma solução apropriada. No contexto das barreiras de proteção, estudos relevantes foram feitos por Beyer (1986), Wu, Liu e Yan (2008), Zhou e Hao (2008), Gebbeken, Warnstedt e Rüdiger (2018), Jin, Hao e Hao (2019), Xiao, Andrae e Gebbeken (2019), Soukup et al. (2019), Taha et al. (2019), Skob, Ugryumov e Dreval (2020), Attia, Elwan e Kotb (2021), Gan, Remennikov e Ritzel (2021) e Chen et al. (2022).

As explosões são fenômenos estudados há vários anos, principalmente de forma experimental e analítica. Os experimentos são essenciais para o entendimento das explosões e também para a validação de modelos matemáticos, contudo, são custosos e perigosos de serem realizados. Em razão disso, realizar experimentos para cada situação que se deseja estudar é, em geral, inviável. Os modelos analíticos permitem obter aproximações de alguns parâmetros desse fenômeno, por exemplo, a pressão e a velocidade da onda de choque, no entanto, devido à complexidade de representar analiticamente uma explosão, os métodos numéricos são indispensáveis para essa problemática. Nesse sentido, a implementação dos hidrocódigos tem contribuído de forma valiosa no desenvolvimento de simulações no campo das explosões. Portanto, muitas das dificuldades dos processos analíticos e experimentais podem ser superadas.

Este trabalho apresenta um estudo sobre as explosões de tanques de gás próximas às edificações, tendo como finalidade a avaliação dos parâmetros da onda de choque e seus efeitos danosos nas construções e usuários, bem como a análise de medidas para mitigar esses efeitos. O estudo é desenvolvido por meio de simulações numéricas com o uso do Autodyn do pacote Ansys[®] Workbench. Esse programa tem como base a fluidodinâmica computacional (CFD) e é uma ferramenta que permite avaliar diversos parâmetros de uma explosão, por exemplo, a sobrepressão em ambientes com geometria complexa.

1.1. JUSTIFICATIVA

A compreensão dos efeitos das explosões nas estruturas próximas é necessária numa análise preliminar de possíveis danos e isso, certamente, aumenta o nível de segurança das edificações. Os efeitos de uma onda de choque podem ser catastróficos em cenários urbanos devido à aglomeração de construções e pessoas. Assim sendo, o estudo desses efeitos nas construções (existentes ou a serem construídas) é indispensável para checagem da distribuição de sobrepressão em pontos sensíveis em caso de explosão acidental, e a adoção, se necessário, de medidas protetivas.

Os tanques de gás estáticos destinados às edificações residenciais e comerciais são elementos que requerem uma atenção especial quanto à segurança. Para a instalação das centrais de gás, é preciso fazer diversas considerações, tais como, o volume do tanque, as condições gerais do local de instalação (acesso e ventilação, por exemplo), o afastamento das edificações e das propriedades vizinhas. Diante disso, a análise das explosões de tanques de gás destinados à essas centrais é uma contribuição importante para o entendimento dessa temática, pois, a distribuição de sobrepressão em cada ambiente de uma edificação e a identificação dos possíveis danos são critérios indispensáveis aos projetistas de centrais de gás.

1.2. OBJETIVOS

1.2.1. Objetivo geral

O objetivo deste estudo é investigar os efeitos das explosões de reservatórios de gás utilizados no abastecimento de edifícios. Além disso, o estudo visa correlacionar as sobrepressões resultantes dessas explosões com limites danosos bem como avaliar medidas para mitigar esses efeitos.

1.2.2. Objetivos específicos

Para cumprir o exposto no objetivo geral, a temática proposta neste trabalho é apresentada nos objetivos específicos listados abaixo:

- Analisar a energia liberada numa explosão de tanque de gás a fim de estabelecer uma relação com um alto explosivo.
- Analisar as sobrepressões da onda de choque proveniente da explosão de tanques de gás próximo às edificações com base em parâmetros normativos.
- Analisar os efeitos danosos da onda de choque nas edificações e em seus usuários.

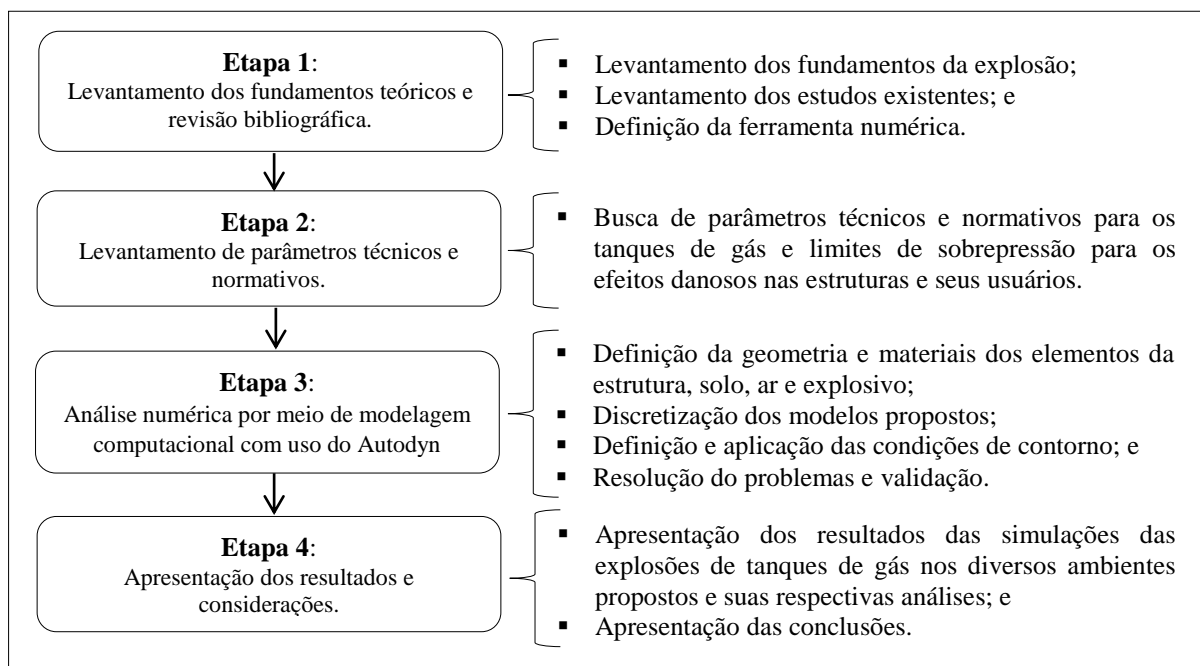
- Analisar barreiras físicas de proteção contra os efeitos de uma explosão acidental de tanque de gás próximo às construções.

1.3. SÍNTESE METODOLÓGICA

Neste estudo, as análises foram feitas por meio de um processo misto que envolve métodos analíticos e numéricos. Os métodos analíticos estão relacionados com a predição da energia mecânica nos tanques de gás e com o cálculo da massa equivalente de Trinitrotolueno (TNT), além disso, as equações semi-empíricas para estimar as sobrepessões são usadas em pelo menos três pontos de averiguação dos modelos computacionais. Os métodos numéricos foram usados para simular as explosões nos cenários propostos onde ocorrem múltiplas reflexões e canalização da onda de choque. Essas simulações foram realizadas no programa Autodyn. O uso dessa ferramenta tem por finalidade a obtenção de resultados mais acurados, tendo em vista que, em muitas situações, é inviável o desenvolvimento de cálculos analíticos. Além disso, segundo Costa Neto (2015), a opção por uma abordagem numérica quando se estuda as explosões em meios urbanos está vinculada à considerável dificuldade de execução de experimentos em escala real.

Para alcançar os objetivos propostos, este trabalho foi desenvolvido em quatro etapas, as quais estão apresentadas no fluxograma do Quadro 1.1. Em correspondência com cada uma das etapas, um detalhamento resumido é apresentado.

Quadro 1.1 – Fluxograma da pesquisa.



2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O estudo das explosões é de grande importância para vários setores da indústria, construção civil, mineração e outros. De modo geral, este fenômeno é fisicamente complexo e de difícil representação em modelos analíticos, com isso, suas análises demandam contribuições de diversas áreas do conhecimento, inclusive de recursos computacionais avançados. Neste capítulo, em uma ordem aproximadamente cronológica, são apresentados pequenos resumos de pesquisas relevantes sobre a temática das explosões, bem como de algumas medidas de mitigação de seus efeitos.

Uma abordagem importante que contém estudos sobre a física e equações das ondas de choque foi apresentada na primeira parte da obra de Zel'dovich e Raizer (1966). Ademais, esses pesquisadores tratam das abordagens Lagrangeana e Euleriana que são empregadas no cálculo numérico.

Baker et al. (1983) apresentaram um estudo para avaliação dos riscos de explosões; vários conceitos fundamentais desse fenômeno são abordados por esses pesquisadores. Além disso, um dos modelos analíticos (o método de Baker) bastante usado para a predição das sobrepressões e do impulso da onda de choque de uma explosão de vasos pressurizados é proposto. Esse método é limitado às explosões ao ar livre e não é capaz de captar as reflexões da onda de choque, porém, pode ser empregado para determinar áreas de riscos.

Kinney e Graham (1985) descreveram o fenômeno da explosão em suas características fundamentais, abordando desde os produtos de detonação e a termodinâmica do processo, até a interação da onda de choque com estruturas. Além do mais, apresentam algumas formas de proteger as estruturas contra as explosões com vistas a mitigar os danos.

Beyer (1986) realizou um estudo com muros de proteção contra os efeitos das explosões de detonação de alto explosivo. Os critérios de análises foram os picos de sobrepressão, impulso e duração das sobrepressões atrás do muro. Todos os dados de análises desse pesquisador foram obtidos de forma experimental. Os resultados mostraram que esse aparato de proteção pode reduzir as sobrepressões na região atrás do muro proposto.

Um extenso estudo sobre a prevenção de perdas nas indústrias é apresentado por Lees (1996). Um dos capítulos do livro desse pesquisador é dedicado às explosões, onde uma abordagem sobre as explosões químicas e mecânicas é feita focando em nuvens de

gás e estouro de tanques em plantas industriais, bem como seus efeitos. Esse autor menciona que a onda de choque transporta de 40% a 80% da energia liberada numa explosão, ou seja, parte da energia se dissipa de outras formas, por exemplo, calor, som, movimento dos fragmentos dentre outras.

Salzano et al. (2003) apresentaram um modelo matemático para avaliar o comportamento de tanques de gás liquefeito de petróleo (GLP) em diferentes cenários de incêndio. Os riscos foram identificados e classificados em ordem de gravidade. Diversos outros fatores também são considerados para aplicação do modelo, por exemplo, os efeitos das trincas acidentais, válvula de segurança e camada isolante.

Schleyer (2004) realizou um estudo de revisão apresentando métodos simplificados para prever os efeitos da carga de explosão de vasos pressurizados em componentes estruturais. Nesse estudo, é exposto um modelo matemático para estimar a sobrepressão das ondas de choque e procedimentos para análise de sistema dinâmico com um grau de liberdade. Esse autor destaca que esse método analítico é apropriado para uma avaliação de segurança, porém, dado o nível de incerteza no carregamento das explosões, é mais adequado o uso de métodos numéricos.

Niemann-Delius, Buhrow e Okafor (2006) fizeram um estudo da aplicação da fluidodinâmica computacional como técnica para analisar os efeitos da explosão de gás. Além disso, demonstraram os recursos de simulação para predição de explosão gasosa e apresentaram exercícios de validação e resultados de carga de explosão numa instalação industrial.

Wu, Liu e Yan (2008) investigaram de forma experimental e numérica os efeitos da onda de choque num muro de proteção e a distribuição da sobrepressão atrás do muro. Esse estudo mostrou que a capacidade do muro de proteção em atenuar as sobrepressões na região protegida é bastante significativa. Para o cenário investigado, em um dos pontos de análise, a redução das sobrepressões atrás do muro chegou a ser 3,06 vezes menor que a situação sem muro de proteção.

Zhou e Hao (2008) realizaram um estudo numérico em que o carregamento devido ao jato de ar de uma explosão foi analisado em uma estrutura situada atrás de uma barreira de proteção. Os resultados mostraram que a barreira de proteção não apenas reduz o pico de pressão refletido e o impulso na superfície do edifício, mas também atrasa o tempo de chegada da onda de choque na estrutura principal. Ademais, foi verificado que a eficácia do muro de proteção depende de sua altura, distância entre a explosão e a barreira, distância entre a barreira e a estrutura e, também, da altura da

estrutura. Com base nos resultados numéricos, esses pesquisadores propuseram fórmulas pseudo-analíticas para predição das cargas numa edificação posicionada atrás de um muro de proteção.

Ferradás et al. (2009) publicaram um trabalho com a finalidade de fornecer uma metodologia para estimar os danos em edifícios gerados pela incidência de ondas de choque produzidas por explosões de tanques cilíndricos. A metodologia consiste em combinar uma série de equações com curvas características de sobrepressão-impulso-distância, com isso, permitindo que o dano seja mostrado no mesmo diagrama que a sobrepressão, o impulso e a distância.

Needham (2010) apresentou uma ampla contribuição para o entendimento das ondas de explosões. Sua obra contém informações relativas ao estudo da formação e métodos de geração da onda de choque, relações de Rankine-Hugoniot, equações de estado, propagação, reflexão e características da onda de choque, técnicas de medição diversas (das sobrepressões, da massa específica do ar e da velocidade da onda, dentre outros), influência da rugosidade da superfície na reflexão, interação da onda com as estruturas em várias geometrias, detonações internas e externas e técnicas de simulações.

Costa Neto (2015) realizou um estudo de revisão sobre a temática das explosões, abordando os principais conceitos envolvidos neste fenômeno. No estudo, realizou-se uma série de simulações numéricas com uso da fluidodinâmica computacional. Com base nos resultados, foi feita uma análise sobre a acurácia e as limitações dos modelos analíticos em relação aos numéricos no que tange às pressões da onda de choque, onde foi verificado que os modelos computacionais são mais precisos e apropriados. Outrossim, os efeitos da canalização da onda de choque bem como a influência de obstáculos para a mitigação das pressões foram analisados. Com isso, concluiu-se que os espaços estreitos podem aumentar as sobrepressões devido ao efeito da canalização e os obstáculos são capazes de reduzir essas sobrepressões nos ambientes que se pretende proteger.

Molkov e Kashkarov (2015) apresentaram um estudo sobre a explosão de tanques de gás. Um dos principais tópicos abordados nessa pesquisa são os modelos de predição da energia mecânica armazenada em vasos pressurizados. Os modelos para um gás ideal são denominados como: Brode, expansão isentrópica, expansão isotérmica e disponibilidade termodinâmica. Para um gás não ideal, esses pesquisadores sugerem o

uso de um modelo baseado na equação de estado de Abel-Noble a fim de representar uma situação mais realista.

Aoude et al. (2015) realizaram experimentos em pilares de concreto reforçados com fibras os quais foram submetidos ao carregamento de ondas de choque. No estudo, foi verificado que essa técnica de adicionar fibras no concreto é bastante eficiente para reduzir os danos e aumentar a resistência de um elemento estrutural.

Kang et al. (2016), usando a abordagem da fluidodinâmica computacional, realizaram um estudo sobre a influência das explosões de gás na resposta dinâmica de um modelo com um grau de liberdade. A resposta dinâmica da estrutura foi investigada nos domínios do tempo e da frequência. No primeiro passo da pesquisa, os autores realizaram simulações numéricas de explosão para investigar as características da carga da explosão, onde, foi observado que as sobrepressões mais altas foram produzidas em ambientes mais congestionados. As pressões da fase negativa da onda de choque foram consideradas, a fim de obter uma análise mais precisa. Porém, a fase positiva foi o fator mais dominante na investigação. Posteriormente, com a aplicação da Transformada Rápida de Fourier, obteve-se a resposta dinâmica do modelo no domínio da frequência correspondente à intensidade das pressões de cada fase da onda de choque. Dessa forma, pôde-se observar que a frequência e a magnitude da primeira onda cíclica são os fatores que mais influenciam na resposta dinâmica da estrutura. Por outro lado, quando o efeito da ressonância for insignificante, foi constatado que as ondas secundárias e residuais podem ser desprezadas na análise.

Costa Neto e Doz (2017b) realizaram uma avaliação das sobrepressões de ondas de choque com uso da fluidodinâmica computacional. Esses pesquisadores fizeram análises dos fenômenos da reflexão e da canalização da onda de choque. Além disso, vários ambientes de análises foram propostos, inclusive com uso de obstáculo entre a explosão a edificação. O estudo mostrou que a ferramenta computacional é apropriada para análises de explosões, além disso, ficou evidente que a reflexão e canalização da onda de choque pode aumentar substancialmente os picos de sobrepressão em alguns pontos das construções, especialmente em ambientes confinados. O obstáculo mostrou ser eficiente em reduzir as sobrepressões na edificação. Contudo, esses aparatos devem ser posicionados com cautela, pois, podem redirecionar a onda de choque para outras regiões e isso ficou demonstrado nos resultados desse estudo.

Wang et al. (2017) realizaram um estudo numérico com o uso do CFD para simular uma explosão de gás num ambiente interno. Essa pesquisa foi baseada numa

explosão acidental de gás no interior de um edifício em Pequim, China. Na análise, pode-se conferir a forma de propagação da onda de choque, a velocidade da chama, os níveis de sobrepressão e a temperatura atingida. Os pesquisadores enfatizam o sucesso do estudo para fins de reconstrução de cenários para investigação e avaliação de acidentes envolvendo explosões.

Li et al. (2017) fizeram um trabalho experimental e numérico para verificar as sobrepressões internas na explosão de recipiente preenchido com uma mistura de metano-ar. O estudo foi feito em pequena escala, porém, trás informações importantes sobre uso da ferramenta computacional, como exemplo, as boas aproximações dos resultados de sobrepressões testadas e simuladas.

Tschirschwitz et al. (2017) realizaram vários experimentos com a explosões de tanques de gás propano, nos quais a válvula de segurança foi removida e os tanques foram expostos a uma fonte de calor. Nesse estudo, foram verificados os níveis de sobrepressões no entorno da explosão, dispersão dos fragmentos, tempo e pressão da ruptura do cilindro. Esse estudo contém informações valiosas sobre a explosão de reservatórios de gás para fins domésticos.

Com o uso da fluidodinâmica computacional, Vyazmina et al. (2018) apresentaram uma avaliação do uso de muros de proteção com finalidade de mitigar os efeitos da sobrepressão de uma explosão. Os resultados dessa pesquisa mostram o quão eficaz essa técnica é para alguns modelos apresentados. Além do mais, verificou-se que o comprimento (L) reduzido em relação à altura (h) do muro influencia nas sobrepressões da parte posterior, os autores concluíram que, para uma relação $L/h < 6$, o fator de mitigação das sobrepressões é significativamente reduzido comparação com muros de comprimento elevado.

Rulin et al. (2018) fizeram uma simulação numérica da resposta dinâmica de um tanque de grande volume de armazenamento de gás sob uma carga de explosão. Com essa análise, foi possível verificar no tanque os picos de sobrepressão, níveis de tensões geradas pela carga da explosão e modos de vibração.

Kim (2018) realizou um estudo experimental sobre o uso de concreto reforçado com fibras na construção de muros resistentes à explosão de gás. Os resultados mostraram que a fibra introduzida no concreto aumenta o desempenho do muro no quesito integridade, conseqüentemente, reduzindo o lançamento de fragmentos do próprio muro.

Gebbeken, Warnstedt e Rüdiger (2018) realizaram um estudo experimental e numérico usando vegetação como barreira física de proteção contra os efeitos de uma explosão. Para o cenário investigado, os resultados mostraram que as vegetações utilizadas foram capazes de reduzir os picos de sobrepressão em até 60% se comparados à situação sem proteção. Esses pesquisadores sugerem que este tipo de barreira é compatível com a arquitetura urbanística, com isso, podendo ser amplamente usado.

Xiao, Andrae e Gebbeken (2019) conduziram um estudo experimental e numérico sobre o desempenho de muro gabião com uma chapa de aço inclinada no topo (*canopy*). Os resultados mostraram que esse tipo de barreira de proteção é muito eficiente para proteger estruturas e o uso da chapa metálica inclinada para o lado da explosão foi mais eficiente. Outra consideração importante destacada por estes pesquisadores é o fato da onda de choque contornar o muro pelas laterais, ou seja, muros com pouco comprimento podem não ser tão eficientes quanto se espera. Essa consideração sobre o comprimento do muro deve ser ponderada numa análise numérica bidimensional, pois, as frentes de onda que contornam as laterais do muro não são abrangidas num modelo 2D.

Soukup et al. (2019) investigaram a propagação da onda de choque sobre obstáculos por meio de modelagem numérica. Nesse estudo, utilizou-se um muro como barreira, com isso foi possível analisar as pressões numa região com e sem proteção. Ademais, outra análise foi realizada com intuito de aferir as pressões dentro de uma valeta bem como sua influência na propagação da onda de choque. As simulações buscaram a resolução das equações da continuidade, do movimento e da energia com uso do método dos elementos finitos.

No campo dos altos explosivos e com base na fluidodinâmica computacional, Costa Neto e Doz (2019) apresentaram simulações de detonação de explosivos C4 em superfície de placas de concreto. Através dos resultados desse estudo, os autores buscaram relacionar a geometria e diâmetro do explosivo com o dano causado, malha adequada para esse tipo de simulação e posição da armadura para fins de mitigação dos efeitos da explosão.

Li et al. (2019) realizaram simulações numéricas para compreender as características do processo de explosão de gás em túnel de serviço. Esse estudo mostrou o comportamento e níveis das sobrepressões em um ambiente confinado. Além do mais, analisaram as posições de ignição e foi constatado que essas posições não afetam significativamente a sobrepressão máxima de explosão.

Cen et al. (2019), com uso da fluidodinâmica computacional, fizeram a simulação de uma explosão interna de gás natural no interior de um apartamento. Esse estudo foi baseado em um acidente ocorrido num edifício residencial em Chengdu, China. Os autores estudaram as características dinâmicas da explosão de gás e propuseram medidas de mitigação dos efeitos da explosão, como por exemplo, a instalação de painéis de ventilação de explosão.

Wang et al. (2019) fizeram um estudo de caso sobre um acidente com vazamento e explosão de gás natural em um gasoduto na cidade de Nova York. O estudo teve como finalidade a avaliação de risco e o gerenciamento de segurança. Para isso realizaram simulações numéricas da dispersão da nuvem de gás, propagação da chama e distribuição de temperatura após a ignição e níveis de sobrepressão da onda de choque.

Taha et al. (2019) e Attia, Elwan e Kotb (2021) fizeram análises numéricas, por meio da fluido dinâmica computacional, de muros de concretos usados como anteparos para proteção de edificações a fim de mitigar os efeitos de explosões. Diversas geometrias da seção transversal foram verificadas quanto à eficiência em reduzir os níveis de sobrepressão na parte posterior do muro. Em ambas as pesquisas, a geometria côncava com curvatura de 60° foi mais eficiente para os cenários analisados.

Jin, Hao e Hao (2019), realizaram estudos numéricos sobre o uso de barreiras físicas formadas por postes de aço justapostos e de concreto armado com a finalidade de mitigar os efeitos das explosões na edificações. O muro de concreto mostrou ser mais eficiente que os postes de aço no que tange à redução do pico de sobrepressão da onda de choque na parte posterior. Por outro lado, no caso do concreto, as simulações mostraram que a onda de choque pode gerar fragmentos em alta velocidade.

Qiuhong et al. (2020) realizaram uma simulação numérica, com o uso da fluidodinâmica computacional, para verificar a dispersão da nuvem de gás formada devido ao vazamento em tanques estáticos superficiais e conseqüentemente a explosão dessa nuvem. Nesse estudo houve um enfoque nos parâmetros que mais influenciam a dispersão do gás: o vento e a vazão do vazamento. O que se destaca nessa pesquisa é o poder da ferramenta computacional em resolver problemas complexos e não-lineares.

Ainda no campo da fluidodinâmica computacional, Singh et al. (2020) realizaram uma pesquisa para relatar uma metodologia de simulação do experimento do tubo de choque e obter a energia incidente para qualquer pressão da seção. Além de obterem resultados muito próximo aos experimentos, os autores enfatizam que a

simulação do tubo de choque é uma alternativa mais segura e econômica para analisar a carga de choque em comparação com os testes experimentais.

Sharma (2020) realizou um estudo baseado em dados de explosões acidentais de nuvem de vapor que ocorreram em vários locais do mundo, com enfoque no ocorrido no terminal de armazenamento da Indian Oil Corporation Limited (IOCL) em Jaipur, Índia, em 2009. Nessa pesquisa, é mencionada a hipótese de ocorrer detonação em nuvem de vapor ou gás, pois, os níveis de sobrepressão verificados em função dos danos causados nesse acidente são incompatíveis com o processo de deflagração. Em outras palavras, considera-se a existência de uma transição de deflagração para detonação (*Deflagration-to-Detonation Transition - DDT*).

Oran, Chamberlain e Pekalski (2020) produziram uma pesquisa de revisão sobre os mecanismos e ocorrência de detonações em explosões de nuvem de vapor. Esses pesquisadores fizeram algumas considerações importantes sobre a temática da explosão de nuvens de gás, por exemplo, nem todas as liberações acidentais de gases e vapores inflamáveis criam explosões, pois, não encontram fontes de ignição e, dentre as que encontram, a maioria resulta em deflagrações com baixas ou moderadas sobrepressões. Porém, eles afirmam que em algumas situações em que há confinamento ou obstruções é possível ocorrer a transição de deflagração para detonação.

Com o uso de ferramenta numérica, Skob, Ugryumov e Dreval (2020) avaliaram o potencial de mitigação de uma parede sólida instalada em um posto de abastecimento com a finalidade de proteger o pessoal dos efeitos de uma explosão de gás. O estudo mostrou que o uso do muro de proteção desempenha uma função importante na redução dos picos de pressão no ambiente atrás do muro.

Gan, Remennikov e Ritzel (2021) investigaram o uso de árvores como barreiras naturais de proteção. A pesquisa foi desenvolvida de forma experimental num ambiente simulador de explosão, posteriormente, uma análise numérica foi conduzida para explicar observações experimentais. As plantas usadas no estudo foram capazes de reduzir em até 23% os picos de pressão atrás da barreira em relação à situação sem proteção.

Vaidogas (2021) realizou uma pesquisa numérica sobre as propagações de fragmentos advindos da ruptura de tanques pressurizados. Nesse estudo, o pesquisador aprofundou o conhecimento sobre a previsão das velocidades de ejeção desses fragmentos. Com isso, concluiu-se que as velocidades de ejeção dos estilhaços devem

ser estimadas em função de uma quantidade relativamente grande de fatores aleatórios, muitos dos quais são avaliados de forma subjetiva.

Bai et al. (2021) apresentaram um estudo numérico e experimental da explosão de nuvem de Combustível-Ar Explosivo (*Fuel-Air Explosive* - FAE). As simulações e experimentos foram realizados com múltiplas fontes para simular o processo de propagação e interação de múltiplas ondas de choque.

Em análise de explosões de gás no interior de ambiente de edificações, fazendo uso da abordagem CFD, Pang et al. (2021) trazem um estudo do campo de fluxo da explosão e das sobrepressões numa cozinha. Nesse trabalho, os autores relatam que esse tipo de incidente é muito comum e que, apenas no ano de 2019 na China, ocorreram 463 acidentes com explosão de gás em ambientes fechados.

Li e Hao (2021) apresentaram um estudo sobre a distância de segurança em tanques de armazenamento de gás. Essa distância é uma das maneiras mais utilizadas para segurança contra as explosões, pois, apresenta muita eficiência e economicidade na mitigação da sobrepressão de explosão de gás.

Park et al. (2021) avaliaram de forma numérica e experimental painéis à prova de explosão com finalidade de mitigar as vibrações de uma explosão subterrânea. No estudo são apresentadas informações sobre a construção do painel à prova de explosão e da estrutura de armazenamento de explosivos.

De forma experimental e numérica, Yu et al. (2022) investigaram o desempenho de paredes de alvenaria compostas por blocos de concreto aerado autoclavado sob cargas de explosões. O experimento consistiu em analisar essas paredes nas distâncias em escala entre 3,249 e 6,934 m/kg^{1/3}. Os resultados mostraram diversos tipo de falha das paredes – completa e parcial – com níveis de sobrepressão entre os 21,3 e 98,9 kPa.

Chen et al. (2022) conduziram um estudo experimental e numérico sobre a resposta de muro de gabião sob grandes cargas explosivas. O muro gabião usado por esses pesquisadores foi preenchido com areia ao invés das convencionais rochas. Nas condições analisadas, a falha do muro ocorreu principalmente pelo tombamento.

Neste capítulo, foi possível compreender que explosões podem ocorrer em diversas situações e as consequências desse evento podem ser catastróficas. Os estudos citados forneceram uma visão mais abrangente sobre a temática das explosões, onde as principais causas, efeitos e formas de proteção foram apresentadas.

3. FUNDAMENTOS TEÓRICOS

3.1. CONCEITOS BÁSICOS DA EXPLOSÃO

Explosões são fenômenos resultantes da liberação repentina de energia e sua magnitude é determinada pela quantidade dessa energia liberada (KINNEY; GRAHAM, 1985). Na literatura atual, as explosões são classificadas em função de sua natureza podendo ser mecânicas, químicas e nucleares.

As explosões mecânicas são resultantes da ruptura de recipientes com elevado diferencial de pressão entre a parte interna e externa. Esse tipo de evento pode ocorrer em tanques de gás, gasodutos, os balões de festa, erupções vulcânicas, dentre outros.

As explosões químicas são provenientes de uma reação físico-química de extrema velocidade seguida por uma elevação brusca de pressão e temperatura. A violenta e rápida liberação de energia nesse tipo de explosão ocorre por meio de dois mecanismos, a deflagração e a detonação. A deflagração é um processo de combustão lenta e sua propagação é subsônica, geralmente é resultante de explosões de nuvem de gás com participação do oxigênio do ar. A detonação é uma reação rápida de decomposição e ocorre com velocidades supersônicas e, segundo Silva (2007), a participação de oxigênio é exclusiva da substância explosiva.

As explosões nucleares são produzidas pela fissão ou fusão nuclear e são as mais poderosas já conhecidas e testadas pelo homem. Essas explosões produzem ondas de choques de elevada magnitude acompanhadas de radiação e altas temperaturas.

Silva (2007) apresenta uma quarta categoria na classificação das explosões, a elétrica. Essa é causada pelas descargas de corrente elétrica de alta intensidade, ocorrendo uma expansão gasosa por centelhamento. O exemplo mais conhecido desse fenômeno é a descarga atmosférica.

3.2. ONDA DE CHOQUE

3.2.1. Características e fundamentos da onda de choque

As ondas são perturbações que se propagam em um meio material e transportam apenas energia. No caso das explosões, a onda de choque formada se deve à expansão súbita que ocorre no momento da explosão. Em geral, quando a detonação acontece ao ar livre, observa-se que o comportamento da onda de choque em termos de pressão é semelhante ao indicado na Figura 3.1. Esse tipo de onda contém um elevado acúmulo de energia em sua frente, gerando um pico de pressão positiva (pressão acima da

ambiente) seguido por um intervalo de pressão negativa (pressão inferior à ambiente). No caso de deflagração (explosão de nuvem de gás), Bai *et al.* (2021) relatam que a intensidade da onda de choque atenua mais lentamente do que em explosão por detonação. As ondas de choque provenientes de explosões propagam-se de forma radial, conforme esquematizado na Figura 3.2, e dispersa sua a energia no entorno da explosão.

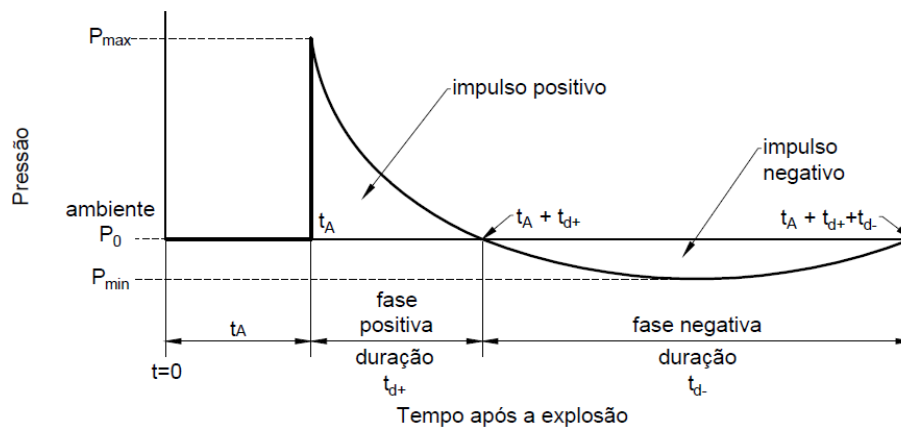


Figura 3.1 – Esquema típico de uma onda de choque (adaptado de CERNAK, 2015).

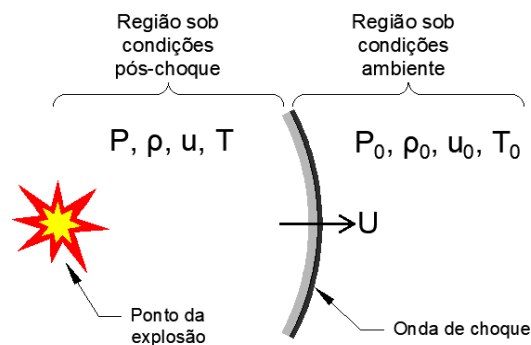


Figura 3.2 – Esquema de propagação radial da onda de choque.

Segundo Singh *et al.* (2020), essas ondas são complicadas de estudar e o tubo de choque cria um ambiente controlado para analisar o efeito da carga de choque em uma ampla gama de materiais. O esquema desse tubo é apresentado na Figura 3.3. Nessa figura, pode-se notar que o tubo de choque é dividido em duas zonas de pressão separadas por uma membrana. Na zona destacada em azul escuro, o gás fica em alta pressão e na outra (azul claro) em baixa pressão, nesta configuração, a membrana é rompida e em consequência uma onda de choque se propaga para a zona de baixa pressão. Ao incidir na contenção no final do tubo a onda é refletida, dessa forma, é possível o estudo tanto da onda incidente quanto da refletida.

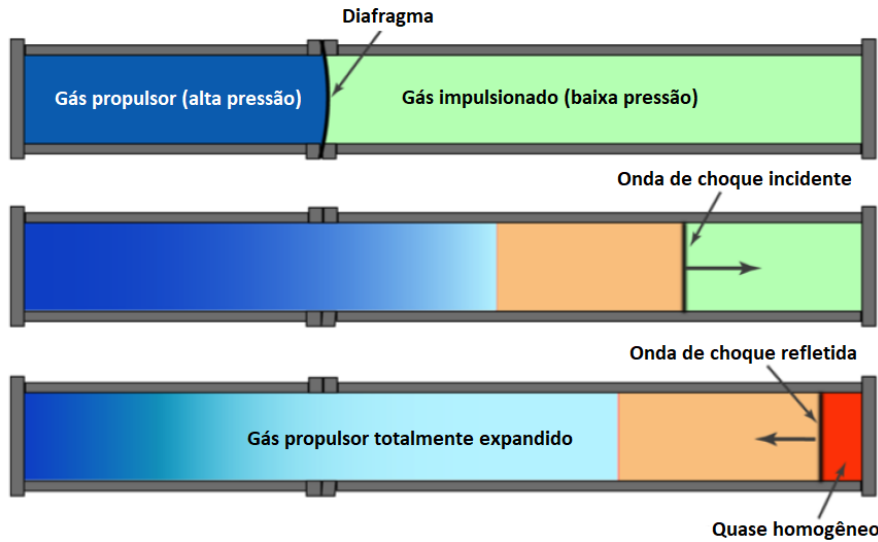


Figura 3.3 – Esquema de um tubo de choque (adaptado de WANG, 2016).

As ondas de choque podem ser estudadas com as relações de Rankine-Hugoniot. Conforme Needham (2010), essas relações (Equações 3.1, 3.2 e 3.3) são baseadas nos princípios de conservação da massa, do momento e da energia, respectivamente. O índice “0” representa os valores dos parâmetros do gás nas condições ambiente, conforme utilizado na Figura 3.2.

$$\rho(U - u) = \rho_0 U \quad (3.1)$$

$$P - P_0 = \rho_0 U u \quad (3.2)$$

$$E - E_0 = \frac{1}{2}(P + P_0) \left(\frac{1}{\rho_0} - \frac{1}{\rho} \right) \quad (3.3)$$

Onde:

ρ : massa específica do gás

U : velocidade da onda de choque

u : velocidade da partícula (velocidade material)

P : pressão

E : energia

A sobrepressão é definida pela diferença entre a pressão da onda de choque e a pressão ambiente, conforme Equação 3.4. A predição deste parâmetro é importante e necessária numa avaliação preliminar de danos.

$$\Delta P = P - P_0 \quad (3.4)$$

Onde:

ΔP : sobrepressão

P : pressão da onda de choque

P_0 : pressão ambiente

Para uma análise puramente analítica das ondas de choque, o uso de diversas outras equações é necessário. Conforme Needham (2010), as equações 3.5, 3.6, 3.7, 3.8 e 3.9 expressam, respectivamente, a velocidade da onda de choque, velocidade material, velocidade do som, pressão dinâmica e temperatura.

$$U = C_0 \left(1 + \frac{[\gamma + 1] \Delta P}{2\gamma P_0} \right)^{1/2} \quad (3.5)$$

$$u = \frac{\Delta P}{\gamma P_0} \frac{C_0}{\left(1 + \frac{[\gamma + 1] \Delta P}{2\gamma P_0} \right)^{1/2}} \quad (3.6)$$

$$C_0 = \sqrt{\gamma P_0 / \rho_0} \quad (3.7)$$

$$q = \frac{(\Delta P)^2}{2\gamma P_0 + (\gamma - 1)\Delta P} \quad (3.8)$$

$$T = T_0 \left(1 + \frac{\Delta P}{P_0} \right) \left(\frac{2\gamma + (\gamma - 1)(\Delta P / P_0)}{2\gamma + (\gamma + 1)(\Delta P / P_0)} \right) \quad (3.9)$$

Onde:

C_0 : velocidade do som nas condições ambiente

γ : razão dos calores específicos do gás. ($\gamma=1,4$ para o ar)

q : pressão dinâmica

T : temperatura da onda de choque

T_0 : temperatura ambiente

3.2.2. Reflexão da onda de choque e seus efeitos

Ao se propagar, uma onda interage com o meio e quando encontra um obstáculo suficientemente rígido ocorre a reflexão. Esse fenômeno provoca alterações significativas nas sobrepressões, uma vez que o movimento das partículas é interrompido abruptamente. A reflexão de uma onda depende de vários fatores e Needham (2010) apresenta uma série de estudos mostrando a influência da rugosidade da superfície refletora, da geometria dos obstáculos e do ângulo de incidência na reflexão. As Equações 3.10 e 3.11 expressam, respectivamente, a sobrepressão da onda choque refletida quando incide frontalmente e o coeficiente de reflexão. O coeficiente de reflexão é definido pela razão entre a sobrepressão refletida e a incidente. É importante destacar que, devido à reflexão de uma onda de choque, as sobrepressões podem ser amplificadas e, segundo Cernak (2015), essa amplificação pode chegar a nove vezes.

$$\Delta P_r = 2\Delta P + (\gamma + 1)q \quad (3.10)$$

$$C_r = \frac{\Delta P_r}{\Delta P} \quad (3.11)$$

Onde:

ΔP_r : sobrepressão refletida

C_r : coeficiente de reflexão

A reflexão pode ser dividida em três tipos, normal, oblíqua e Mach. A reflexão normal ocorre quando a direção de propagação é perpendicular à superfície refletora. A reflexão oblíqua (Figura 3.4) é aquela em que o ângulo de incidência é maior que 0° e menor que 90° , nesse caso, o ângulo refletido é diferente do ângulo de incidência, isso ocorre devido ao fato da onda incidente modificar o ambiente de propagação da onda refletida.

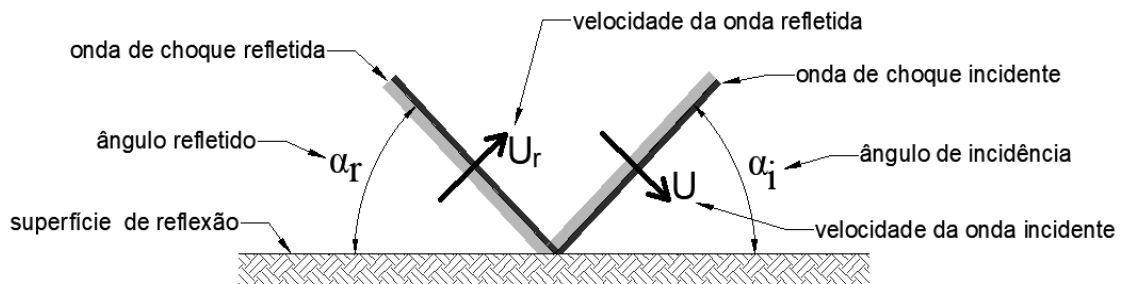


Figura 3.4 – Esquema básico da reflexão oblíqua da onda de choque.

A reflexão Mach ocorre quando a onda refletida alcança a incidente, formando assim, onda Mach. O efeito destrutivo dessa onda é superior a incidente. O esquema básico do processo de formação da onda Mach é apresentado na Figura 3.5 e um exemplo dessa onda simulado no Autodyn está exposto na Figura 3.6. A frente da reflexão também é chamada de haste Mach.

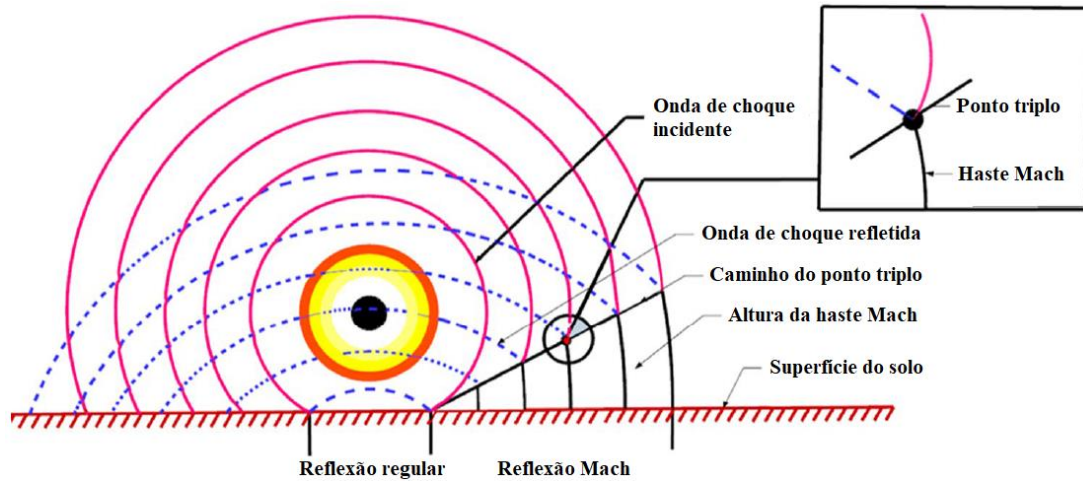


Figura 3.5 – Esquema básico da reflexão Mach (SHIRBHATE; GOEL, 2020).

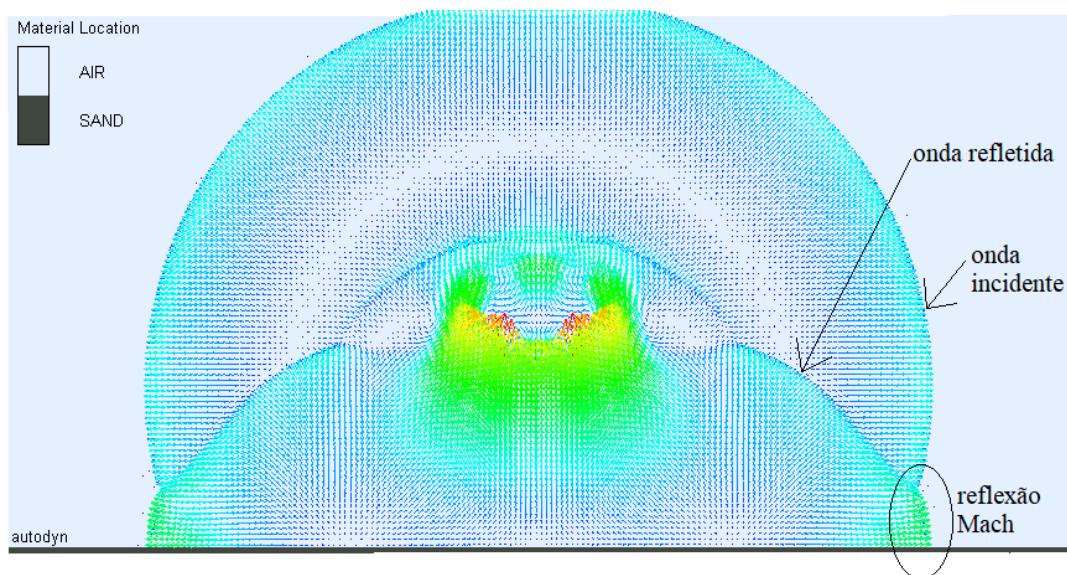


Figura 3.6 – Simulação da reflexão da onda de choque no Autodyn.

3.2.3. Refração da onda de choque

A refração ocorre quando há a transmissão da onda de um meio para outro, por exemplo, uma onda que se propaga pelo ar, ao incidir numa estrutura, passa a se propagar pela estrutura, conforme exemplificado na Figura 3.7. É importante destacar que, no caso da interação da onda de choque com estruturas rígidas, apenas parte

pequena dela é refratada. Esses fenômenos (reflexão e refração) dependem das propriedades físicas dos materiais que compõem os meios de propagação, por exemplo, massa específica e velocidade do som.

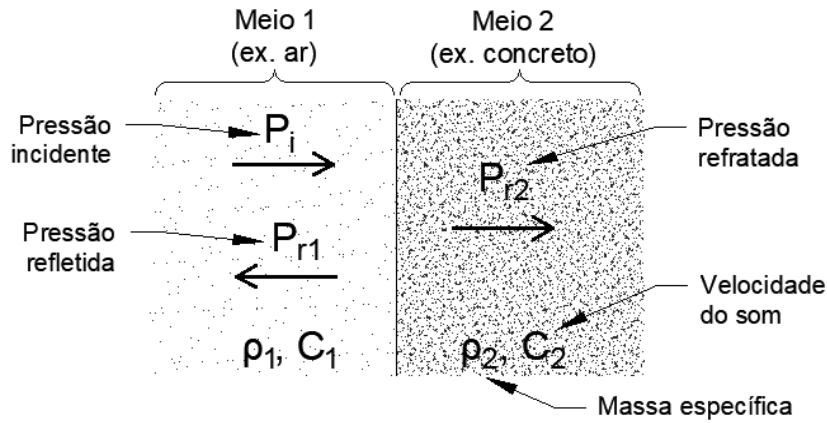


Figura 3.7 – Esquema básico da refração da onda de choque.

3.2.4. Difração da onda de choque

Entende-se como difração a capacidade de uma onda em contornar obstáculos. Em geral, as sobrepressões existentes atrás de muros de proteção, por exemplo, são resultantes da difração da onda de choque de uma explosão. Conforme Taha et al. (2019), o uso desses muros difrata a onda de choque, conseqüentemente, a parte posterior fica com fluxo complexo que muda as ações de carregamento no alvo. Esse fenômeno da difração está exemplificado na Figura 3.8.

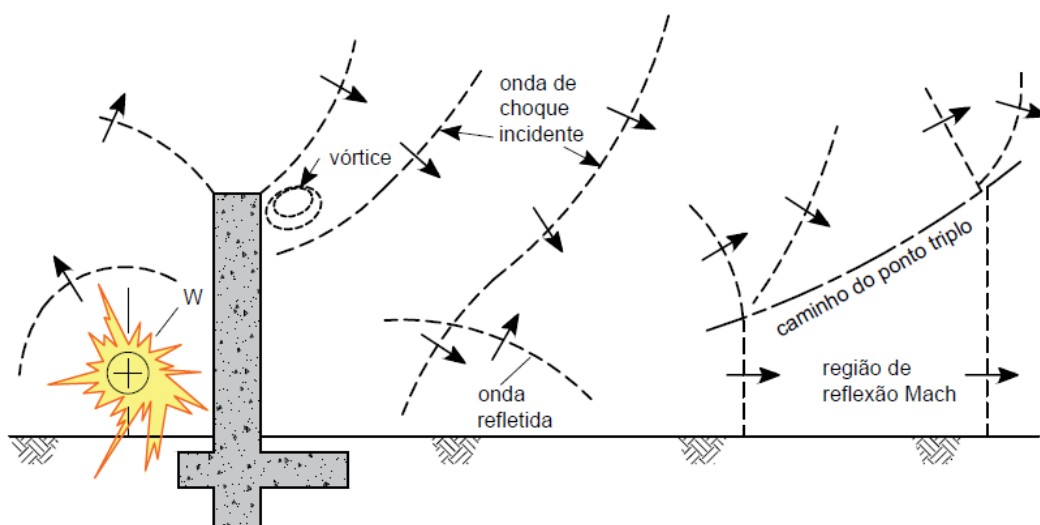


Figura 3.8 – Difração da onda de choque num obstáculo (adaptado de BEYER, 1986).

3.2.5. Carregamentos de explosões em estruturas

A frente de uma onda de choque tem uma elevada concentração de energia, com isso, sua incidência numa estrutura produz carregamentos acidentais. Essas cargas são complicadas de calcular, pois dependem de várias considerações, por exemplo, o ângulo de incidência, nível de sobrepressão, coeficiente de reflexão, impedância de choque, geometria da estrutura, rugosidade da superfície e outros. Segundo Needham (2010), o pico de sobrepressão que carrega uma parede, por exemplo, é igual à sobrepressão refletida da onda de choque. Quando se tem uma face muito grande em uma edificação, os picos de sobrepressão são diferentes em cada ponto, com isso, esse pesquisador sugere a divisão em áreas menores, assim, pode-se considerar a sobrepressão homogênea em cada uma destas subdivisões.

Além do carregamento da onda de choque, o vento produzido pela explosão provoca pressões de arrasto. Segundo Kinney e Graham (1985), a rajada de vento de uma explosão exerce forças nas edificações de forma análogas aos ventos naturais. Contudo, essas forças são de natureza transitória e podem ser de magnitude maior do que aquelas desenvolvidas por ventos comuns.

A força de arrasto num objeto depende da pressão dinâmica, área de incidência da massa de ar em deslocamento e coeficiente de arrasto. Para uma pressão dinâmica uniforme, essa força de arrasto pode ser obtida por meio da Equação 3.12. Essa equação está presente na literatura e foi utilizada no estudo de Aziz et al. (2008).

$$F_d = qAC_d \quad (3.12)$$

Onde:












F_d : força de arrasto

A: área efetiva frontal

C_d : coeficiente de arrasto (*drag coefficient*)

O coeficiente de arrasto é um parâmetro obtido em função da forma do objeto em que a pressão dinâmica incide. Para geometrias bidimensionais, Aziz et al. (2008) compilaram alguns valores para o coeficiente de arrasto, os quais estão apresentados na Tabela 3.1.

Tabela 3.1 - Coeficientes de arrasto (AZIZ et al., 2008) - Adaptado.

Tipo de corpo	Área de referencia S ($l =$ comprimento)	Número de Reynolds Re	Coeficiente de Arrasto C_D
Quadrado		$A = l D$	$Re > 10^4$ → 2.00
		$A = l D$	$Re > 10^4$ → 1.50
Casca semicircular		$A = l D$	$Re > 10^4$ → 1.20 ← 2.30
		$A = l D$	$Re > 10^4$ → 1.15 ← 2.15
Triângulo equilátero		$A = l D$	$Re > 10^4$ → 1.40 ← 2.10
	Placa plana		$A = l D$ $Re > 10^4$ → 1.90
Viga T		$A = l D$	$Re > 10^4$ → 1.80 ← 1.65
	Viga I		$A = l D$ $Re > 10^4$ → 2.05
Hexágono		$A = l D$	$Re > 10^4$ → 1.00
		$A = l D$	$Re > 10^4$ → 0.70
Cilindro circular		$A = l D$	$Re > 10^4$ → 0,51

3.3. PREDIÇÃO DA ENERGIA EM TANQUES DE GÁS

3.3.1. Equações de estado e parâmetros de equivalência

Em geral, a onda de choque se propaga pelo ar, o qual é composto por uma mistura de diversos gases. A compreensão dos mecanismos envolvendo este fenômeno da onda de choque está atrelada às teorias da dinâmica dos fluidos, com isso, é imprescindível apresentar algumas considerações e parâmetros dos gases.

Conforme Costa Neto (2015), o modelo idealizado com base no conceito de gás ideal em que as partículas se movem de forma arbitrária despreza, para efeito de cálculo, relações intermoleculares. Com isso, permite-se a aplicação das equações de estado e a concordância com as leis dos gases.

A equação de estado para um gás ideal, também chamada de equação de Clapeyron, é bastante conhecida e baseia-se em princípios físicos e químicos estudados há várias décadas. No âmbito das explosões, essa equação de estado (Equação 3.13) é apresentada por Kinney e Graham (1985).

$$P\bar{v} = R_u T \quad (3.13)$$

Onde:

\bar{v} : volume de um mol de gás ou volume específico molar do gás

R_u : constante universal dos gases ($R_u = 8.31434 \text{ J/mol}\cdot\text{K}$)

O comportamento de um gás ideal é diferente de um gás real, devido a isso, há um parâmetro que correlaciona ambos. Esse parâmetro é chamado de fator de compressibilidade e, conforme Kinney e Graham (1985), é calculada pela Equação 3.14.

$$Z_c = \frac{P\bar{v}}{R_u T} \quad (3.14)$$

Onde:

Z_c : fator de compressibilidade

Segundo Molkov e Kashkarov (2015), dentre as equações de estado existentes para um gás não ideal, a Equação 3.15 de Abel-Noble representa de forma apropriada uma situação real. Essa expressão é obtida a partir da equação de estado de Van der Waals, a qual considera a diferença entre o volume ocupado por um gás e o volume ocupado pelas moléculas desse gás. Essa diferença é o covolume, também denominado de volume excluído molar.

$$P \left(\frac{1}{\rho} - b \right) = \frac{R_u}{M} T \quad (3.15)$$

Onde:

M : massa molar do gás

b : covolume do gás

Conforme Çengel e Boles (2014), esse parâmetro b pode ser estimado pela Equação 3.16 e com base nos parâmetros do ponto crítico do gás. Para uma mistura

gasosa, o covolume pode ser calculado pelas Equações 3.17, 3.18 e 3.19. Para alguns gases, estes parâmetros estão apresentados no Anexo 1.

$$b = \frac{RT_c}{8P_c} \quad (3.16)$$

$$b_m = \sum_{i=1}^n y_i b_i \quad (3.17)$$

$$y_i = \frac{N_i}{N_m} \quad (3.18)$$

$$N_m = \sum_{i=1}^n N_i \quad (3.19)$$

Onde:

R : constante do gás

T_c : temperatura do ponto crítico do gás

P_c : pressão do ponto crítico do gás

b_m : covolume da mistura dos gases

b_i : covolume do gás “i” componente da mistura

y_i : fração molar

N_i : número de mols do gás “i” componente da mistura

N_m : número de mols da mistura dos gases

Outro parâmetro necessário no estudo das ondas de choque é a relação da capacidade de calor, que pode ser expressa pela Equação 3.20. Esse parâmetro é descrito pela razão do calor específico a pressão constante e o calor específico a volume constante. Segundo Needham (2010), essa razão expressa a medida da eficiência potencial de converter a energia adicionada a um gás em trabalho realizado por esse gás.

$$\gamma = \frac{C_p}{C_v} \quad (3.20)$$

Onde:

C_p : calor específico a pressão constante

C_v : calor específico a volume constante

Outra relação importante no estudo dos gases ideais é a razão da constante molar dos gases pela massa molar. Essa relação está expressa na Equação 3.21.

$$\frac{R_u}{M} = C_p - C_v \quad (3.21)$$

3.3.2. Massa equivalente de TNT

O TNT é uma abreviação para o composto químico Trinitrotolueno. A maioria das equações envolvendo explosões foram desenvolvidas com base nos parâmetros desse material. Portanto, é conveniente o uso de uma massa equivalente de TNT nas análises dos efeitos das explosões. Alguns explosivos com suas respectivas equivalências estão apresentados na Tabela 3.2. Para análises de outros materiais ou sistemas, essa relação de equivalência pode ser feita relacionando a energia liberada na explosão com a energia específica liberada numa explosão de TNT. Essa energia específica é, aproximadamente, igual a 4184 J/g, conforme Bolonkin (2016).

Tabela 3.2 - Equivalências de TNT para alguns explosivos (COSTA NETO, 2019).

Explosivo	TNT Equivalente em Massa
TNT	1
C4	1,20
PENT	1,27
Nitroglicerina	0,90
RDX	1,10
ANFO	0,87
Tetryl	1,07
Tropex	1,23
LX-14	1,80

Numa explosão mecânica, a predição da energia armazenada no tanque de gás pressurizado é necessária. Uma vez que essa energia é estimada por algum método, por exemplo, os descritos na seção subsequente, faz-se a correlação com a energia específica de TNT, dessa forma, estabelecendo uma massa equivalente de TNT. Essa massa equivalente em função da energia de expansão de um determinado volume de gás pode ser calculada pela Equação 3.22, conforme Rodriguez e Schofield (2009).

$$W = \frac{E_m}{H_{TNT}} \quad (3.22)$$

Onde:

W : massa de TNT

E_m : energia mecânica armazenada no tanque de gás

H_{TNT} : energia específica liberada numa explosão de TNT

3.3.3. Modelos de predição da energia mecânica em tanques de gás

Molkov e Kashkarov (2015) apresentaram um compilado de métodos para fazer a predição da energia armazenada em um recipiente pressurizado e preenchido com gás, de forma geral, esses métodos partem-se da Equação 3.23. Para um gás ideal, a energia mecânica liberada numa explosão física pode ser calculada com base em quatro modelos: Brode, expansão isentrópica, expansão isotérmica e disponibilidade termodinâmica.

$$E_m = mC_v T \quad (3.23)$$

Onde:

m : massa do gás

No modelo de Brode, faz-se as operações algébricas das Equações 3.13, 3.20, 3.21 e 3.23, e como resultado, tem-se a Equação 3.24. Com essa equação, pode-se calcular a energia mecânica de um gás ideal liberado numa explosão física.

$$E_m = \frac{(P_g - P_0)V_g}{\gamma - 1} \quad (3.24)$$

Onde:

V_g : volume do gás

P_g : pressão do gás

P_0 : pressão ambiente

No modelo de expansão isentrópica, assume-se a expansão numa pressão inicial para a pressão ambiente com entropia constante. Para um gás ideal, esse modelo está representado pela Equação 3.25, que é chamada de equação de Baker, conforme Lees (1996).

$$E_m = \frac{P_g V_g}{\gamma - 1} \left[1 - \left(\frac{P_0}{P_g} \right)^{\left(\frac{\gamma - 1}{\gamma} \right)} \right] \quad (3.25)$$

A expansão isotérmica ocorre quando não há variação de temperatura durante o processo. A Equação 3.26 representa o modelo de expansão isotérmica. Contudo, Molkov e Kashkarov (2015) destacam que esse processo dificilmente se aplica a uma expansão rápida de gás de alta para baixa pressão durante a ruptura de um tanque.

$$E_m = P_g V_g \ln \left(\frac{P_g}{P_0} \right) \quad (3.26)$$

A disponibilidade termodinâmica representa a energia mecânica máxima extraível de uma massa fixa de um material conforme ela se move para o equilíbrio com o ambiente (MOLKOV; KASHKAROV, 2015). Esses pesquisadores relatam que esse método dificilmente se aplica na predição da energia da explosão, pois, o tempo de propagação da onda da explosão é muito pequeno se comparado ao tempo necessário para o gás liberado entrar em equilíbrio com o ambiente. No entanto, para fins comparativos, esse modelo está expresso pela Equação 3.27.

$$E_m = P_g V_g \left[\ln \left(\frac{P_g}{P_0} \right) - \left(1 - \frac{P_0}{P_g} \right) \right] \quad (3.27)$$

O comportamento de um gás não ideal é diferente de um gás ideal. Em suas análises, Molkov e Kashkarov (2015) apresentaram um método de predição da energia de uma explosão física que representa uma situação mais realista com o uso da equação de estado de Abel-Noble. Isolando a massa específica na Equação 3.15 e considerando a diferença entre a pressão interna e a externa ao tanque de gás, tem-se as Equações 3.28. Além do mais, as Equações 3.29 e 3.30 expõem relações elementares sobre o tema.

$$\rho = \frac{P_g - P_0}{(R_u / M)T + b(P_g - P_0)} \quad (3.28)$$

$$m = \rho V_g \quad (3.29)$$

$$R = R_u / M \quad (3.30)$$

Substituindo as Equações 3.28, 3.29 e 3.30 na 3.23 e fazendo as correlações corretas das unidades de medidas tem-se como resultado a Equação 3.31. Com essa equação pode-se fazer uma predição da quantidade de energia liberada numa explosão puramente mecânica. A fim de facilitar a aplicação da equação 3.31, todas as suas variáveis são listadas novamente com as respectivas unidades de medidas. Vale ressaltar que essa equação pode ficar numa forma mais reduzida desde que sejam consideradas as relações dos gases ideais (Equações 3.20 e 3.21).

$$E_m = \left(\frac{P_g - P_0}{RT + b(P_g - P_0)} \right) V_g C_v T \quad (3.31)$$

Onde:

E_m : energia mecânica [J]

P_g : pressão do gás no interior do recipiente [Pa]

P_0 : pressão ambiente [Pa], sendo $P_0 = 101,325$ kPa ao nível do mar

R : constante do gás [J/kg·K]

T : temperatura do gás no interior do recipiente [K]

b : covolume do gás [m³/kg]

V_g : volume do gás [m³]

C_v : calor específico a volume constante [J/kg·K]

Um gráfico comparativo entre os modelos supracitados para gás ideal e não ideal é apresentado na Figura 3.9. Neste exemplo, Molkov e Kashkarov (2015) apresentaram um estudo da energia armazenada em um tanque de hidrogênio com volume de 72,4 L. O gráfico foi feito neste trabalho com a finalidade de testagem das equações e conferência das unidades de medidas.

Portanto, Molkov e Kashkarov (2015) concluíram que os modelos desenvolvidos para gás ideal não representam um comportamento real para explosão mecânica de tanques de gás. O modelo de Brode está presente na literatura e pode ser usado na predição da energia mecânica em vasos pressurizados, pois, não apresenta resultados

superestimados, no exemplo da Figura 3.9, a energia obtida por esse modelo foi 64,8% superior à obtida pelo modelo de gás não ideal quando a pressão no tanque é igual a 100MPa. No entanto, quando se deseja uma análise mais precisa, é conveniente considerar os gases como não ideal. No estudo de gás natural comprimido (GNC), gás liquefeito de petróleo (GLP) e hidrogênio, Molkov e Kashkarov (2015) consideraram a equação de estado de Abel-Noble como melhor opção, pois, representa um comportamento mais realista para os gases.

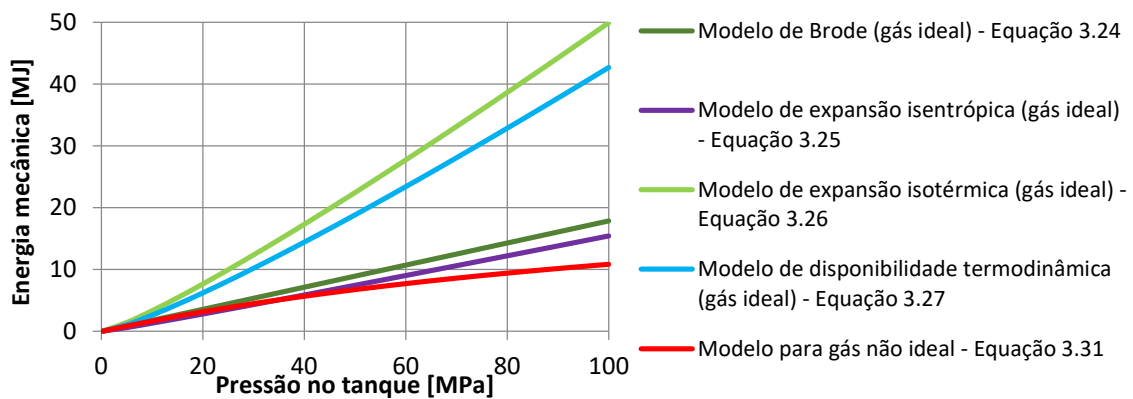


Figura 3.9 – Energia mecânica em função das pressões em um tanque de 72,4 L de hidrogênio (MOLKOV; KASHKAROV, 2015) – adaptado.

3.4. SOBREPRESSÃO DA ONDA DE CHOQUE

3.4.1. Lei de escala

Em um determinado local no entorno de uma explosão, os efeitos da onda de choque são analisados com base na quantidade de explosivo e na distância da explosão. Numa abordagem com modelos semi-empíricos em que uma massa equivalente de TNT é considerada, é necessária a obtenção de um parâmetro denominado de distância em escala. A distância em escala mensura o efeito de uma explosão em termos de dispersão energética relacionando a distância com a raiz cúbica da massa de TNT e é calculado pela Equação 3.32.

$$Z = \frac{r}{\sqrt[3]{W}} \quad (3.32)$$

Onde:

Z: distância em escala

r: distância em metros do centro da explosão ao ponto de análise

W: massa de TNT em kg

3.4.2. Prognóstico das sobrepressões

Numa análise analítica, a predição das sobrepressões da onda de choque de uma explosão a céu aberto pode ser obtida com a aplicação de algumas equações semi-empíricas. Costa Neto e Doz (2017a) apresentaram um compilado de várias dessas equações as quais estão dispostas na Tabela 3.3. Esses métodos permitem a obtenção de picos de sobrepressão no entorno de uma explosão ao ar livre e sem o efeito da reflexão da onda de choque. Todas essas equações podem ser usadas numa análise, porém, para distâncias pequenas, os resultados tendem a divergir entre si, por outro lado, à medida em que se afasta da explosão, os resultados de todos esses métodos convergem para um valor.

Tabela 3.3 – Equações de predição das sobrepressões (COSTA NETO; DOZ, 2017a).

Autor	Fórmulas de predição	Requisito	Unidade
Brode	$\Delta P = \frac{6,7}{Z^3} + 1$ (3.33)	$\Delta P > 10$	Bar
	$\Delta P = \frac{0,975}{Z} + \frac{1,455}{Z^2} + \frac{5,85}{Z^3} - 0,019$ (3.34)	$0,1 < \Delta P < 10$	Bar
Henrych	$\Delta P = \frac{14,072}{Z} + \frac{5,540}{Z^2} - \frac{0,357}{Z^3} + \frac{0,00625}{Z^4}$ (3.35)	$0,05 \leq Z \leq 0,3$	Bar
	$\Delta P = \frac{6,194}{Z} - \frac{0,326}{Z^2} + \frac{2,132}{Z^3}$ (3.36)	$0,3 \leq Z \leq 1$	Bar
	$\Delta P = \frac{0,662}{Z} + \frac{4,05}{Z^2} + \frac{3,288}{Z^3}$ (3.37)	$1 \leq Z \leq 10$	Bar
Mill	$\Delta P = \frac{1772}{Z^3} - \frac{114}{Z^2} + \frac{108}{Z}$ (3.38)	-	kPa
Kinney	$\frac{\Delta P}{P_0} = \frac{808 \left[1 + \left(\frac{Z}{4,5} \right)^2 \right]}{\sqrt{1 + \left(\frac{Z}{0,048} \right)^2} \sqrt{1 + \left(\frac{Z}{0,32} \right)^2} \sqrt{1 + \left(\frac{Z}{1,35} \right)^2}}$ (3.39)	-	-
Newmark	$\Delta P = 6784 \frac{W}{R^3} + 93 \left(\frac{W}{R^3} \right)^{1/2}$ (3.40)	-	Bar

3.4.3. Efeitos da sobrepressão nas estruturas

De modo geral, nem toda explosão provoca danos nas estruturas próximas, entretanto, dependendo do potencial da explosão, nem mesmos os mecanismos de proteção impedirão os efeitos danosos. A título de exemplo, a grande explosão que ocorreu no ano de 2020 em Beirute (Líbano) foi um evento catastrófico. Nesse evento,

as estruturas no local e entorno da explosão ficaram parcialmente ou completamente destruídas, conforme imagens da Figura 3.10. Nesse acidente, pode-se notar o poder de destruição de uma onda de choque.

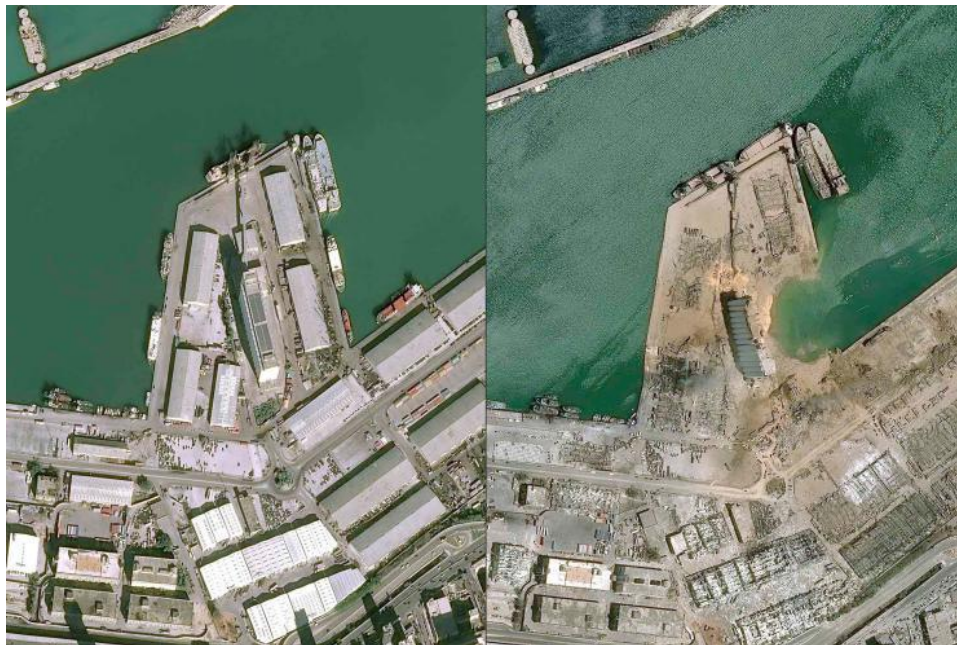


Figura 3.10 – Imagens de satélite comparando o antes e depois da explosão em Beirute (FITZ-GIBBON, 2020)

Cada explosão é um caso particular e, conforme Silva (2007), as características de uma onda de choque podem variar dependendo muito da forma que ocorre a detonação. Conseqüentemente, os efeitos nas estruturas serão diferentes para cada evento. O principal e mais significativo desses efeitos é o carregamento acidental que, em geral, ocorre de forma impulsiva.

Como visto anteriormente na Figura 3.4, uma onda de choque possui uma fase positiva seguida de uma fase negativa. Esse fenômeno causa uma variação de forças em sentidos opostos numa estrutura próxima à explosão, primeiro, a fase positiva incide sobre a estrutura aplicando arrasto no sentido do deslocamento da onda de choque, após esta fase, tem início a fase negativa onde o arrasto ocorre no sentido oposto. Esse efeito em função de cada fase da onda de choque está exemplificado na Figura 3.11. Algumas literaturas apresentam diversos tipos de danos em razão da sobrepressão e, na Tabela 3.4, Silva (2007) compilou alguns desses efeitos nas edificações.

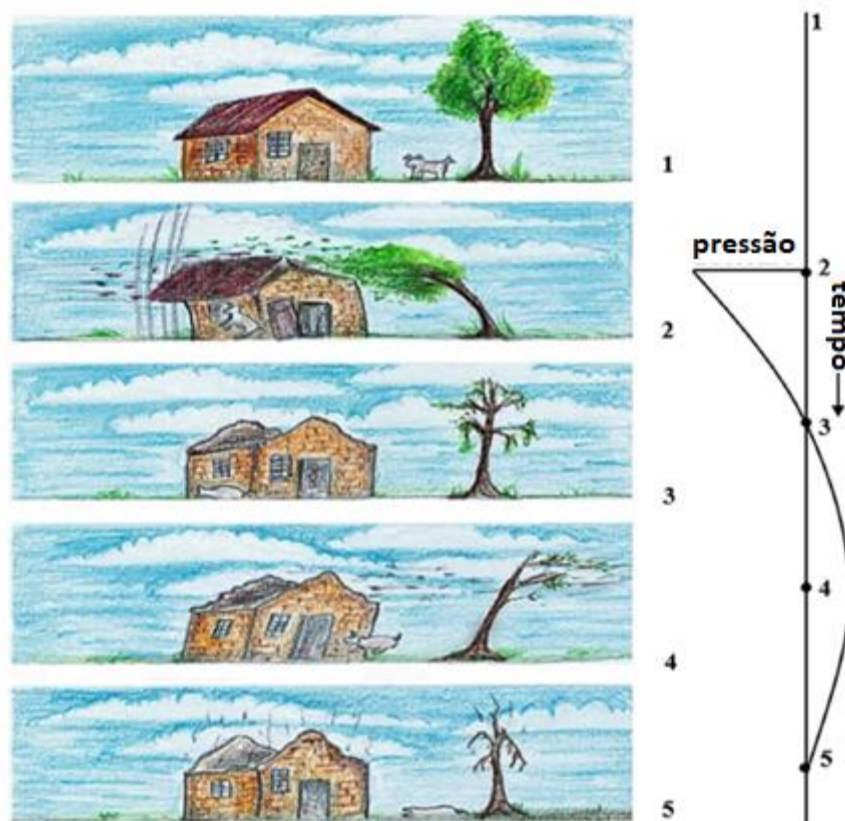


Figura 3.11 – Efeito da pressão de uma explosão associada à fase positiva e negativa (adaptado de SHIRBHATE; GOEL, 2020).

Tabela 3.4 – Efeitos da Onda de Choque sobre Estruturas (SILVA, 2007).

DANO	Variação de Pressão (P_{SO})	
	Bar	psi
Quebra de vidraças	0,01 - 0,015	0,15 - 0,22
Danos mínimos em construções	0,035 - 0,075	0,52 - 1,12
Danos em painéis metálicos	0,075 - 0,125	1,12 - 1,87
Falha de painéis de madeira (construções)	0,075 - 0,15	1,12 - 2,25
Falha em paredes de tijolos	0,125 - 0,2	1,87 - 3
Rompimento de tanques de refinarias	0,2 - 0,3	3 - 4,5
Danos em edifícios (estruturas metálicas)	0,3 - 0,5	4,5 - 7,5
Danos em estruturas concretadas	0,4 - 0,6	6,0 - 9,0
Provável destruição total da maioria das construções	0,7 - 0,8	10,5 - 12

3.4.4. Efeitos da sobrepressão nos seres humanos

O efeito da sobrepressão em seres humanos e em animais é uma das considerações mais importantes a ser ponderada em um projeto com risco de explosões

próximas. Conforme Baker et al. (1983 apud Silva, 2007), há duas classificações para os efeitos de uma explosão sobre os usuários; as diretas e as indiretas. A primeira está relacionada com as variações de pressão da onda de choque e a segunda envolve o lançamento de fragmentos oriundos da própria explosão ou de algum material desprendido pela passagem da onda. O ambiente complexo resultante de uma explosão está exemplificado na Figura 3.12, nessa figura pode-se notar de forma resumida e didática os efeitos diretos e indiretos. Conforme compilado por Silva (2007), alguns danos causados aos seres humanos por uma onda de choque estão apresentados na Tabela 3.5..



Figura 3.12 – Ambiente complexo resultante da explosão (CERNAK, 2015).

Tabela 3.5 – Relação de alguns danos causados aos seres humanos (SILVA, 2007).

Efeito	Variação de Pressão	
	Bar	psi
Suportável (não causa danos)	Até 0,0001	Até 0,0015
Queda	0,07 - 0,1	1,05 - 1,5
Ruptura do tímpano	0,35 - 1,0	5,25 - 15
Lesões nos pulmões	2,0 - 5,0	30 - 75
Morte	7,0 - 15,0	105 - 225

As explosões podem causar vários tipos de lesões no corpo humano. Um exemplo de lesão que é consequência direta da sobrepressão gerada pela onda de

choque é a *blast lung*, um tipo de lesão nos pulmões (SILVA, 2007). Além do mais, esse pesquisador afirma que esta lesão é o ferimento fatal mais comum, seguido de perfuração nos tímpanos.

Além dos danos aos seres humanos apresentados por Silva (2007), Kobeissy (2015) apresenta uma série de estudos sobre os efeitos da onda de choque no cérebro humano. Essa série abrange áreas multidisciplinares de pesquisa do cérebro, por exemplo, neurociência computacional e neuroengenharia. Nesses estudos, foram realizadas pesquisas teóricas e experimentais sobre os tipos de lesões cerebrais que podem ocorrer em razão da sobrepressão. Os experimentos realizados por diversos pesquisadores em animais e compilados por Kobeissy (2015) mostram alguns tipos de lesões, por exemplo, edema cerebral, vasoespasmos cerebrais e outros. Além disso, simulações numéricas foram realizadas para compreender o comportamento da onda de choque ao incidir no crânio humano.

Nos seres vivos, parte da onda de choque é refletida e outra fração é absorvida e transmitida pelos tecidos do corpo. Em razão disso, a energia cinética dessa fração absorvida causa ondas de estresse que aceleram o tecido do corpo inicialmente em repouso, levando a um rápido movimento físico, em consequência, deslocando, deformando ou até mesmo rompendo-o (CERNAK, 2015).

3.5. PROTEÇÃO DE ESTRUTURAS CONTRA EXPLOSÕES

A segurança das estruturas e de seus usuários é uma questão que necessariamente deve ser considerada nos projetos de centrais de gás. Nesse sentido, numa análise preliminar de explosões de tanques de gás, a avaliação da conjuntura de potenciais incidentes bem como seus efeitos danosos torna-se imprescindível para orientar a adoção de medidas protetivas.

Segundo Li e Hao (2021), a distância é uma das formas mais eficiente e econômica para a mitigação da sobrepressão de uma explosão, conseqüentemente, a mais utilizada. No entanto, essa medida pode ser inviável e até mesmo impossível em ambientes urbanos, pois, em muitos desses locais não há disponibilidade de espaço físico. Em razão disso, enterrar os tanques de gás pode ser uma boa medida de segurança para mitigar os efeitos da onda de choque em caso de explosão acidental. Na impossibilidade de enterrar o reservatório de gás, o uso de barreiras físicas, por exemplo os muros de concreto, podem ser usadas como anteparo para absorver e redirecionar a

energia da onda de choque, dessa forma, protegendo a edificação e usuários dos efeitos danosos mais graves. Outras medidas de proteção também podem ser consideradas. Um exemplo disso, porém para armazenamento de altos explosivos, é o uso de abrigos protegidos por painéis à prova de explosão, conforme apresentado no estudo de Park et al. (2021).

Todas as medidas de proteção são válidas e uteis, porém, é importante ressaltar que elevados níveis de proteção não necessariamente irão garantir a segurança total de uma estrutura, mas, são responsáveis por maiores níveis de confiabilidade aos usuários e ao fim a que se destina (COSTA NETO, 2015).

3.6. PARÂMETROS NORMATIVOS

3.6.1. Instalação de reservatórios de gás

Os reservatórios de gás são recipientes hermeticamente fechados de tal forma a resistir às pressões internas. A pressão elevada faz o gás ficar na forma líquida. Em geral, os tanques destinados a esse fim possuem um formato arredondado. Esse formato é amplamente usado para evitar as concentrações de tensão.

Os tanques de gás, objetos deste estudo, são do tipo estático, ou seja, instalados em locais fixos e abastecidos a granel. Alguns modelos de tanques de gás estão apresentados na Figura 3.13 e algumas centrais de gás encontradas na região de Brasília-DF estão expostas na Figura 3.14.



Figura 3.13 – Modelos comuns de tanques de gás (PEGORARO, 2021).

O local destinado à instalação destes tanques deve seguir rigorosamente os parâmetros estabelecidos nas legislações vigentes. O Corpo de Bombeiros de cada estado possui normas ou instruções técnicas com diretrizes para instalações de gás. Na maioria dessas instituições, as próprias normas já apresentam os parâmetros de distanciamento

para instalações de reservatórios de gás. Em alguns estados, não há especificações desses parâmetros, porém, suas normas referenciam a NBR 13523 (ABNT, 2019), a qual descreve recomendações para instalações de centrais de gás. As legislações estaduais dos Corpos de Bombeiros de cada estado brasileiro estão citadas na Tabela 3.6.

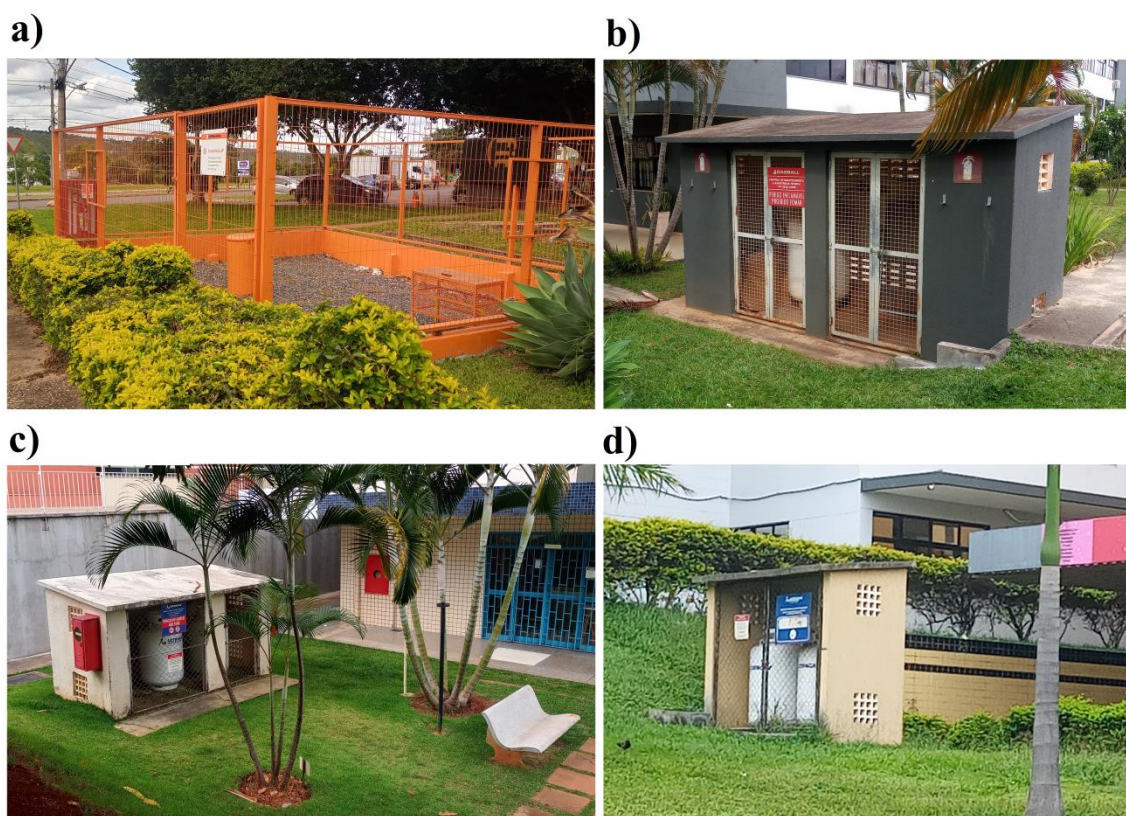


Figura 3.14 – Centrais gás em ambientes urbanos do Distrito Federal. a) central com tanque enterrado. b), c) e d) centrais com tanques sobre o solo.

A NBR 13523 (ABNT, 2019) é uma norma que apresenta diversas recomendações para as instalações de centrais de gás. Neste trabalho, os tanques de gás estacionários de superfície e enterrados são analisados por meio de simulações numéricas onde os parâmetros de afastamento e volume são preconizados por essa legislação. Os tanques estacionários de superfícies são do tipo A, B, C, D e E, com volumes máximos de 0,5, 2, 5,5, 8 e 120 m³, respectivamente. Os recipientes estacionários enterrados são classificados em dois tipos; A e B, respectivamente, com volumes máximos de 8 e 120 m³. Os parâmetros de distanciamento para cada tipo de reservatório estão apresentados nas Figuras 3.15 e 3.16.

Tabela 3.6 – Normas do Corpo de Bombeiros Militar de cada estado brasileiro sobre manipulação, armazenamento, comercialização e utilização de gás liquefeito de petróleo (GLP).

Região	UF	Norma do Corpo de Bombeiro Militar do respectivo estado
Centro-Oeste	DF	NORMA TÉCNICA Nº 05 (2021)
	GO	NORMA TÉCNICA Nº 28 – Parte 1 (2014)
	MS	NORMA TÉCNICA Nº 28 (2013)
	MT	NORMA TÉCNICA Nº 26 (2020)
Sudeste	ES	NORMA TÉCNICA Nº 18 (2015)
	MG	INSTRUÇÃO TÉCNICA Nº 23 - 2ª edição (2022)
	RJ	NOTA TÉCNICA Nº 3-02 (2019)
	SP	INSTRUÇÃO TÉCNICA Nº 28 (2018)
Sul	PR	NORMA DE PROC. TÉCNICO Nº 28 (2014)
	RS	INSTRUÇÃO NORMATIVA Nº 001 (2014)
	SC	INSTRUÇÃO NORMATIVA Nº 8 (2018)
Nordeste	AL	INSTRUÇÃO TÉCNICA Nº 28 (2021)
	BA	INSTRUÇÃO TÉCNICA Nº 28 (2021)
	CE	NORMA TÉCNICA Nº 7 (2008)
	MA	NORMA TÉCNICA Nº 28 (2021)
	PB	NORMA TÉCNICA Nº 7 (2019)
	PE	ENUNCIADO TÉCNICO 006 (2021)
	PI	INSTRUÇÃO TÉCNICA Nº 28 (2019)
	RN	INSTRUÇÃO TÉCNICA Nº 28 (2022)
	SE	PORTARIA Nº 049/2014-GCG (2014)
Norte	AC	NORMA TÉCNICA 28 (2022)
	AM	INSTRUÇÃO TÉCNICA Nº. 28 (2019)
	AP	NORMA TÉCNICA Nº 008 (2020)
	PA	INSTRUÇÃO TÉCNICA Nº 12 – Parte II (2019)
	RO	INSTRUÇÃO TÉCNICA Nº 28 (2017)
	RR	NORMA TÉCNICA Nº 40 (2019)
	TO	NORMA TÉCNICA Nº 23 (2022)

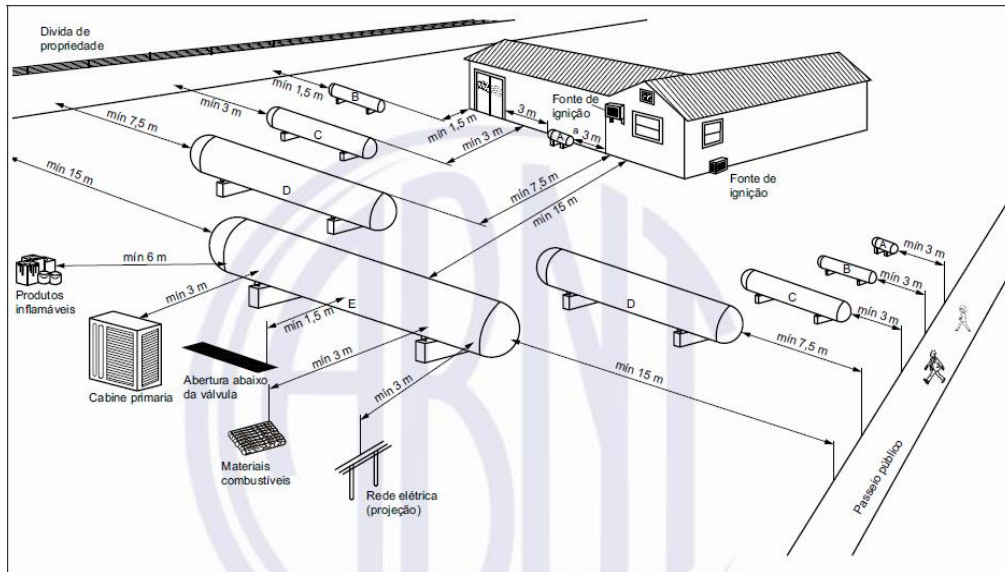


Figura 3.15 – Afastamento de segurança para instalação de tanques de gás estacionários de superfície conforme a NBR 13523 (ABNT, 2019).

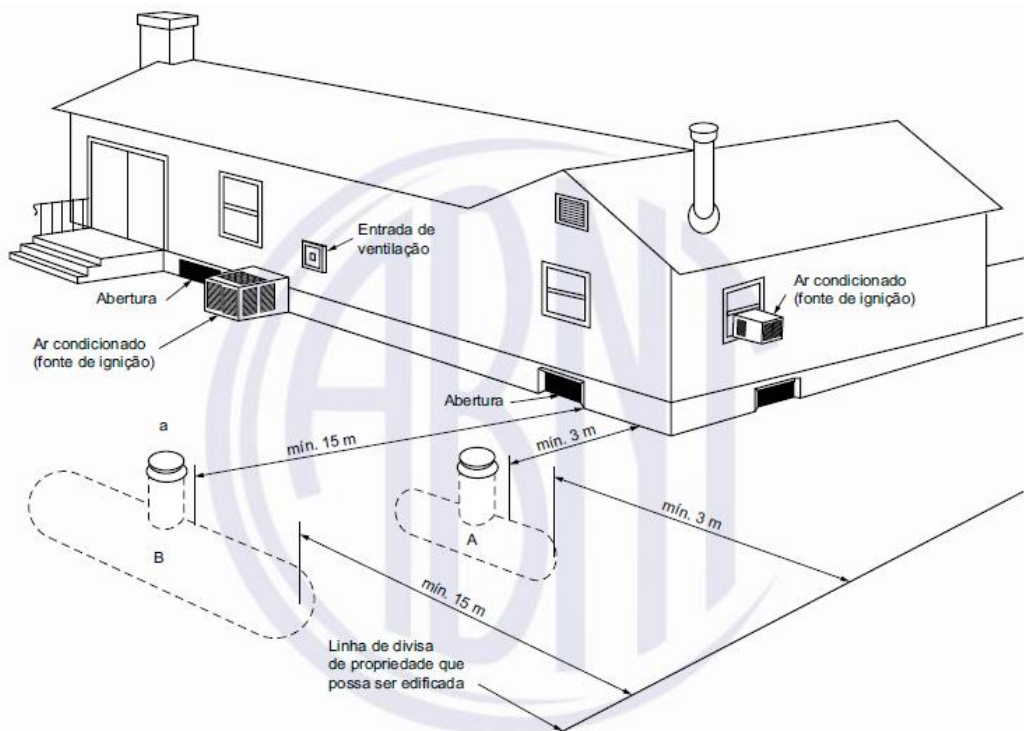


Figura 3.16 – Afastamento de segurança para instalação de tanques de gás estacionários enterrados conforme a NBR 13523 (ABNT, 2019).

3.6.2. Limites de sobrepressão nos seres humanos

No âmbito de estudos acadêmicos, foi apresentado na seção 3.4.4 uma visão geral sobre os efeitos da sobrepressão nos seres humanos. No campo normativo, não

foram encontradas legislações específicas associadas a este tipo de evento; provavelmente, este tipo de informação esteja incluída em manuais industriais de segurança.

Em um projeto para instalação de central de gás, é apropriado fazer uma análise de risco a fim de aplicar as medidas de mitigação das sobrepressões em caso de explosão acidental. Como parâmetro para estabelecer o nível de sobrepressão e seus respectivos danos, pode-se fazer uso da Diretriz Técnica Internacional de Munição (*International Ammunition Technical Guideline - IATG*) 02.10 (2015). Essa diretriz técnica das Nações Unidas estabelece os seguintes limites de sobrepressão de explosão: 34,5 kPa (0,345 Bar) para o surgimento de lesão auditiva, 207 kPa (2,07 Bar) para danos nos pulmões e 690 kPa (6,90 Bar) para fatalidade.

3.7. FERRAMENTA COMPUTACIONAL

As explosões são eventos muito complexos e não lineares, assim, a combinação de estudos analíticos, numéricos e experimentais é imprescindível. O rápido avanço da tecnologia dos computadores tem proporcionado ferramentas muito poderosas para solucionar problemas de alta complexidade. As simulações numéricas baseadas na dinâmica dos fluidos computacional (*computational fluid dynamics - CFD*) são técnicas que visam a resolução das equações fundamentais da dinâmica dos fluidos: conservação de massa, momento e energia. Essas equações são baseadas nas descrições Euleriana e Lagrangeana. De forma sintetizada, na descrição Euleriana, considera-se um volume de controle nas análises, e na Lagrangeana, uma partícula individual é observada. Conforme Abdelalim (2013), as equações 3.41, 3.42 e 3.43, na descrição Euleriana e as 3.44, 3.45 e 3.46, na Lagrangeana, expressam, respectivamente, a conservação de massa, momento e energia.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{u}) = 0 \quad (3.41)$$

$$\frac{\partial \rho \vec{u}}{\partial t} + \nabla \cdot (\vec{u} \times (\rho \vec{u})) + \nabla P = 0 \quad (3.42)$$

$$\frac{\partial E}{\partial t} + \nabla \cdot (\vec{u}(E + P)) = 0 \quad (3.43)$$

$$\frac{D\rho}{Dt} = -\rho(\nabla \cdot \vec{u}) \quad (3.44)$$

$$\frac{D\vec{u}}{Dt} = \frac{\nabla P}{\rho} \quad (3.45)$$

$$\frac{De_i}{Dt} = -\frac{P}{\rho}(\nabla \cdot \vec{u}) \quad (3.46)$$

Onde:

ρ : massa específica

t : tempo

\vec{u} : vetor de velocidade do fluxo

P : pressão

E : energia total por unidade de volume

∇ : Gradiente

e_i : energia interna por unidade de massa

D/Dt : derivada material ou derivada Lagrangeana

Em adição às equações listadas acima, é necessária a utilização das equações de estado de cada material em um problema de dinâmica dos fluidos. Além disso, a resolução de um problema envolvendo essas equações precisa das condições de contorno corretamente aplicadas na modelagem.

3.7.1. Conceito básico dos hidrocódigos

Os hidrocódigos são programas computacionais que lidam com problemas de ondas de choque e calculam pressões, velocidades, tensões e outros, em função do tempo e posição. Um exemplo de hidrocódigo é Autodyn do pacote Ansys® Workbench. As simulações numéricas deste trabalho foram feitas por meio desse programa.

3.7.2. Autodyn

O Autodyn é um hidrocódigo desenvolvido com base na dinâmica dos fluidos computacional com a finalidade de lidar com problemas dinâmicos e não lineares. Nesse programa, as equações fundamentais da dinâmica dos fluidos (Equações 3.41, 3.42, 3.43, 3.44, 3.45 e 3.46) são resolvidas por meio da integração de tempo explícita.

Esse programa faz uso de um conjunto de processadores numéricos para modelar diversas regiões de um problema. Uma síntese de cada processador do Autodyn é apresentada na Tabela 3.7.

Tabela 3.7 – Processadores do Autodyn (COSTA NETO, 2019) – adaptado.

Processador	Descrição básica
Lagrange	Este processador distorce a malha junto com a deformação do material e é indicado para modelar sólidos, por exemplo, concreto, areia, aço e outros. O custo computacional deste processador é mais vantajoso em relação ao de Euler.
Euler	Este processador possui malha fixa e o material flui através dela. O uso deste processador é indicado para análise de fluidos ou de sólido muito deformado, porém, o custo computacional é mais elevado se comparado ao de Lagrange. O ar, por exemplo, é modelado com o processador de Euler.
<i>ALE (Arbitrary Lagrange Euler)</i>	Este processador permite a combinação das técnicas de Euler e Lagrange, porém, pode ser custoso computacionalmente, pois, realiza um rezoneamento das malhas distorcidas.
<i>SPH (Smooth Particle Hydrodynamics)</i>	Este processador não utiliza malha, em geral, usado na modelagem de materiais frágeis para uma melhor captação das trincas.

4. ANÁLISES E DISCUSSÕES

Neste capítulo, as simulações numéricas desenvolvidas de modo a atender os objetivos propostos são apresentadas. Preliminarmente, discorre-se sobre as diversas considerações utilizadas nas modelagens numéricas como, por exemplo, as verificações sobre o tamanho do domínio do ar e posição dos sensores em função da malha. Em seguida, a validação da ferramenta numérica é apresentada de forma tornar possível a comparação dos resultados experimentais, analíticos e numéricos. Posteriormente, dois grupos de simulações das explosões de tanques de gás são apresentados. No primeiro, os tanques de gás sobre o solo e em abrigo enterrado foram modelados e analisados com base nos parâmetros da NBR 13523 (ABNT, 2019). No segundo grupo, além da verificação da integridade de muros de concreto, a eficiência de diversas barreiras físicas de proteção (muros, aterros, solo rugoso e valetas) contra os efeitos das explosões foram analisadas. O parâmetro analisado em todas as simulações foi a sobrepressão de pico da onda de choque que está diretamente relacionado com a capacidade destrutiva da explosão.

4.1. CONSIDERAÇÕES PRELIMINARES PARA AS SIMULAÇÕES

No desenvolvimento das simulações pelo Autodyn, parâmetros como tipo de malha, definição do modelo de simetria, equações de estado, modelos de erosão devem ser adequadamente avaliados de modo representar com fidelidade a situação real de explosão. Nesta seção, o tamanho da malha, tamanho do domínio do ar, posicionamento dos sensores virtuais e modelagem da massa de explosivo equivalente são avaliados previamente.

Definir o tamanho da malha é um quesito indispensável em qualquer simulação numérica. Para cada problema existe uma malha ideal. Um modelo discretizado com elementos grandes leva a resultados distorcidos, por outro lado, quando os elementos são muito pequenos, há um elevado custo computacional, dessa forma, podendo inviabilizar a simulação. Luccioni, Ambrosini e Danesi (2006) citam que uma malha de 100 mm é suficientemente precisa para a análise da propagação de ondas em ambientes urbanos. Com intuito de melhorar ainda mais a precisão dos resultados, as simulações deste trabalho foram desenvolvidas com diferentes malhas mais refinadas, por exemplo, para os modelos 3D, foram usadas malhas de até 25 mm. Os detalhes de discretização de cada problema proposto estão detalhados nas próximas seções deste trabalho.

Outro fator importante que deve ser observado nas simulações é o tamanho do domínio do ar. Em modelos onde o volume de ar é muito pequeno, há resultados de pressão discrepantes do esperado para uma situação real. Com isso, é sempre recomendável a realização de algumas simulações de teste a fim de ajustar o modelo com as condições adequadas. Neste trabalho, uma simulação 2D de teste foi realizada com a finalidade de exemplificar esse problema, conforme apresentada na Figura 4.1. Nesse caso, uma região de ar com diferentes dimensões foi proposta para simular uma explosão de TNT. O domínio do ar foi discretizado com larguras de 500, 1000, 1500, 2000 e 2500 mm e comprimento de 3000 mm, essas medidas foram escolhidas de forma aleatória apenas para mostrar o problema que se descreve neste parágrafo. A malha usada nesse teste foi de 25 mm e a massa de TNT igual a 100 g, esses valores são adequados para esta modelagem.

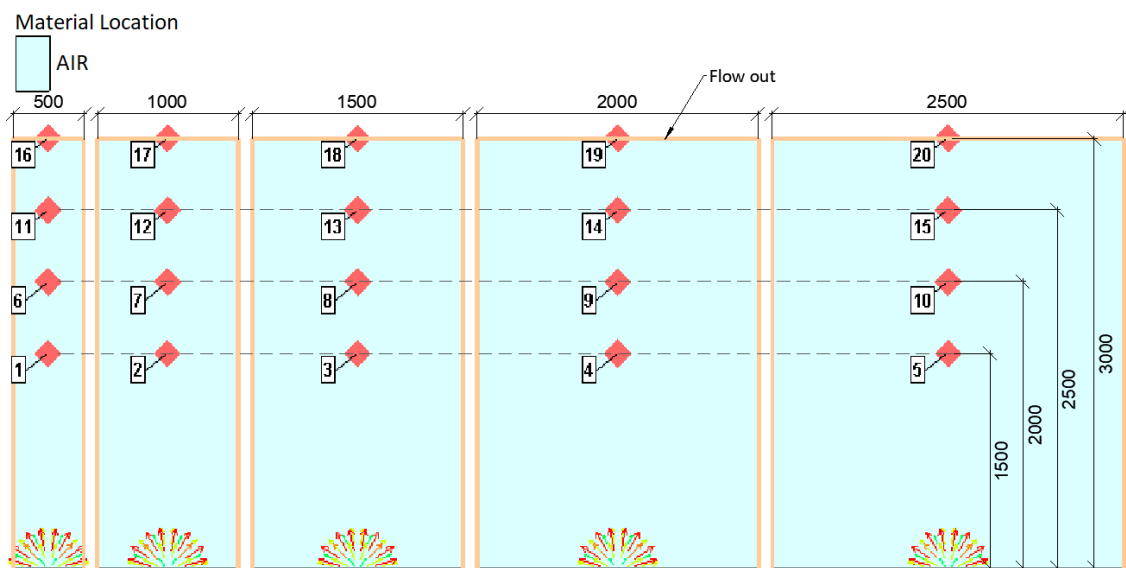


Figura 4.1 – Simulação 2D para diferentes tamanhos do domínio do ar.

As propriedades dos materiais utilizados nestas análises preliminares estão apresentadas nas Tabelas 4.1 e 4.2. Todos esses materiais estão previamente cadastrados na biblioteca do Autodyn. Outro parâmetro necessário no Autodyn é a energia interna específica do ar, segundo Choi, Lee e Kong (2014), para as condições ambientes de temperatura e pressão, essa energia é igual a $2,068 \times 10^5$ J/kg, esse valor também é recomendado pelo manual do ANSYS Autodyn (2013) quando se usa as unidades de medidas mm, ms e mg.

Tabela 4.1 – Propriedades do ar

Massa específica	0,001225 g/cm ³
Equação de Estado	Gás ideal
Razão de calores específicos (γ)	1,4
Temperatura de referência	288,2 K
Calor específico	717,599976 J/kg·K
Pressão ambiente (P_0)	101,3 kPa

Tabela 4.2 – Propriedades do TNT

Massa específica	1,63 g/cm ³
Equação de Estado	JWL
Parâmetro A	$3,7377 \cdot 10^8$ kPa
Parâmetro B	$3,7471 \cdot 10^6$ kPa
Parâmetro R_1	4,15
Parâmetro R_2	0,9
Parâmetro ω	0,35
Velocidade de detonação	$6,93 \cdot 10^3$ m/s
Energia/unidade de volume	$6,00 \cdot 10^6$ kJ/m ³

Conforme mostrado na Figura 4.2, é possível observar a convergência dos picos de pressão à medida que o volume de ar é aumentado em cada sensor virtual. Dessa forma, nota-se que é necessário adotar um volume de ar adequado a cada problema analisado.

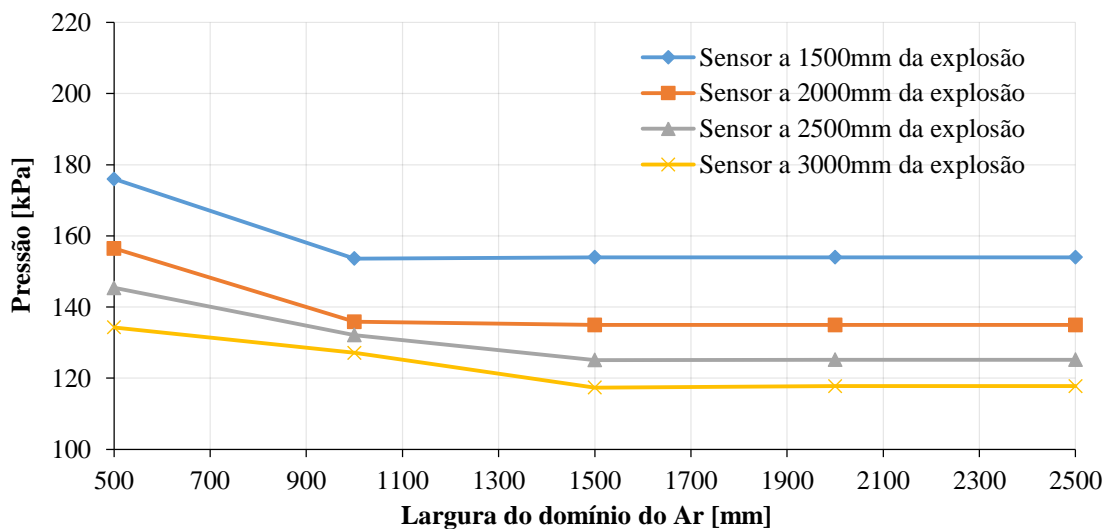


Figura 4.2 – Picos de pressão para as diferentes larguras do domínio do ar.

A posição do sensor pode influenciar nos resultados de uma simulação. Um teste bidimensional com simetria axial foi realizado a fim de exemplificar essa questão, para isso, a explosão de uma massa de TNT igual a 100 g foi analisada num domínio de ar com dimensões 1000 mm por 1000 mm, conforme Figura 4.3. Os sensores virtuais (*gauges*) foram colocados em várias posições, mantendo o raio de 900 mm e variando o ângulo em relação ao eixo x. Foi observado que os valores de pressão são diferentes de uma posição em relação a outra, contudo, à medida em que a malha é refinada, este problema é minimizado, conforme se nota nos resultados da Figura 4.4. Esse fenômeno pode estar relacionado aos erros de interação do próprio cálculo numérico quando se usa malha mais grosseira combinado com domínio do ar muito pequeno. Vale ressaltar que, neste caso, as pressões abaixo da pressão ambiente mostradas nos resultados não representam com fidelidade uma situação real, pois, quanto menor o volume de ar maior será a distorção dessas pressões. Isso ocorre devido à condição de contorno *flow out*, onde a energia vai se perdendo do modelo ao longo do processo de simulação e o ar fica rarefeito. Esse problema pode ser minimizado com uso de um domínio de ar suficientemente grande.

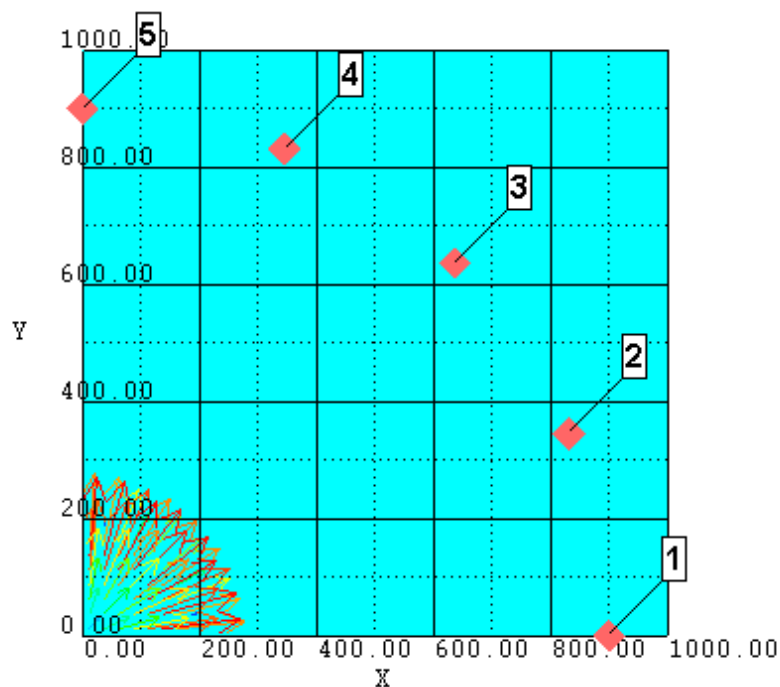


Figura 4.3 – Simulação com sensores em diferentes posições mantendo o mesmo raio em relação ao centro da explosão.

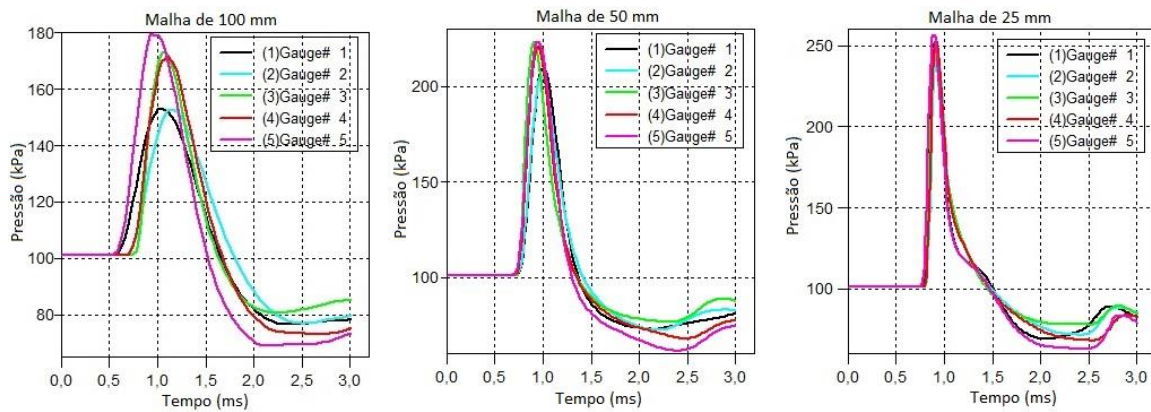


Figura 4.4 – Pressões em função do tempo para as diferentes posições dos sensores e diferentes malhas.

Numa explosão mecânica de gás, devido às grandes dimensões dos reservatórios, é extremamente complicado estabelecer os parâmetros geométricos da massa equivalente de TNT. Ademais, é difícil prever o local e o formato da ruptura de um tanque pressurizado. Contudo, definir a geometria desse explosivo equivalente é um passo compulsório nas modelagens deste trabalho.

Para facilitar o processo de simulação e reduzir o custo computacional, é conveniente adotar a geometria de forma esférica para as massas de explosivo. No Autodyn é possível discretizar uma esfera em um modelo linear de cunha (*wedge*) e, posteriormente, inseri-lo (*remap*) no modelo bidimensional ou tridimensional. A relação da cunha com a geometria esférica e uma cunha discretizada com ar e TNT estão apresentadas nas Figuras 4.2 e 4.3, respectivamente.

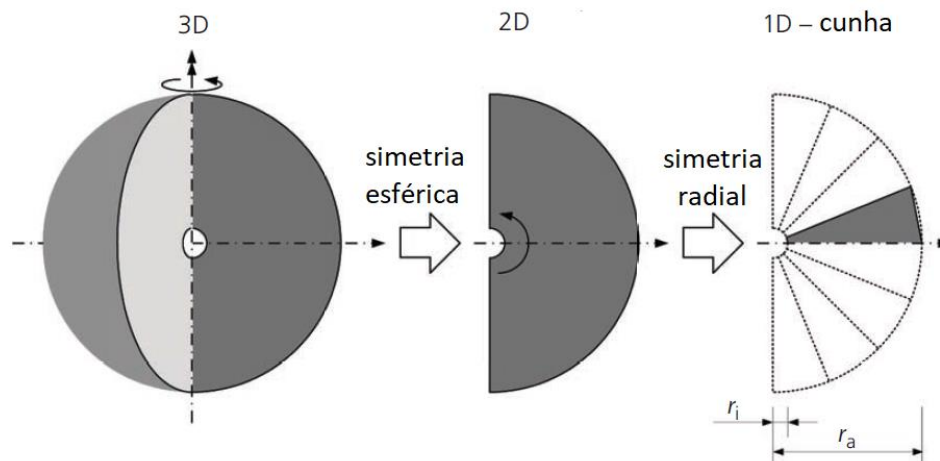


Figura 4.5 – Modelo de cunha para problemas esfericamente simétricos (adaptado de ZIMBELMANN; BOLEY, 2016)

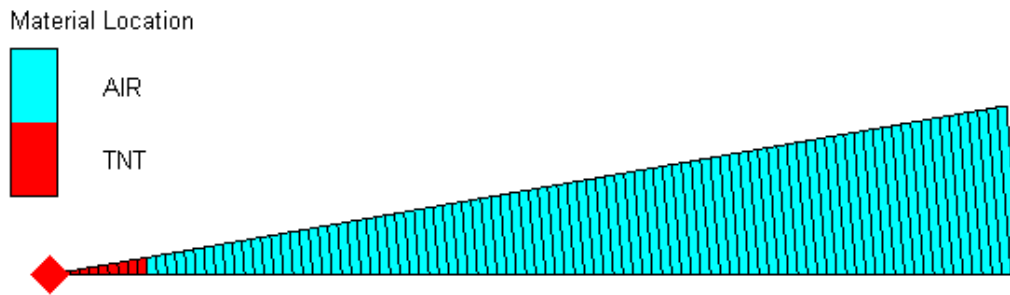


Figura 4.6 – Cunha (*wedge*) discretizada com Ar e TNT no Autodyn.

4.2. VALIDAÇÃO DA FERRAMENTA NUMÉRICA

A validação de modelagens numéricas é um processo fundamental que visa garantir a precisão e confiabilidade dos resultados, permitindo que sejam usados com segurança em aplicações práticas. Borg, Husted e Njå (2014) citam que a validação é vista como uma medida de precisão entre as previsões de um modelo numérico e o mundo real. Entretanto, esses pesquisadores esclarecem que os experimentos no campo das explosões são caros de realizar, com isso, apenas um número limitado de dados experimentais estão disponíveis.

Neste trabalho, a validação da ferramenta numérica consistiu em analisar a explosão de tanques de gás propano com base nos dados experimentais de Tschirschwitz et al. (2017). Esses pesquisadores realizaram diversos experimentos sobre a explosão mecânica de tanques com volume igual a 27,2 litros expostos a uma fonte de calor. Por terem resultados próximos entre si, dois desses experimentos foram escolhidos para serem simulados, cujos dados estão na Tabela 4.3 e um deles está apresentado na Figura 4.7.

Tabela 4.3 – Dados experimentais de Tschirschwitz et al. (2017) - adaptado

Tanque		Momento da ruptura		Sobrepessões (ΔP)		
Identificação	Volume	Pressão	Temperatura	($r = 5$ m)	($r = 7$ m)	($r = 9$ m)
Experimento 1	0,0272 m ³	82,1 bar	111,4 °C	0,15 bar	0,11 bar	0,09 bar
Experimento 2	0,0272 m ³	86,9 bar	97,0 °C	0,15 bar	0,11 bar	0,10 bar

Obs.: r é a distância do sensor de sobrepressão ao ponto central da explosão.



Figura 4.7 – Experimento de Tschirschwitz et al. (2017).

Com base nas propriedades dos tanques (Tabela 4.3) e do gás propano (Tabela 4.4), a energia mecânica armazenada foi estimada por meio da Equação 3.31 para cada um dos experimentos. Os resultados estão apresentados na Figura 4.8 e, para fins comparativos, a energia calculada pela equação de Brode (Equação 3.24) também é apresentado.

Tabela 4.4 – Propriedades propano (ÇENGEL; BOLES, 2014) - adaptado.

Temperatura de referência (T)	15° C (288,2 K)
Calor específico a volume constante (C_v)	1,4909 kJ/kg·K
Razão de calores específicos (γ)	1,126
Constante do gás (R)	0,1885 kJ/kg·K
Temperatura no ponto crítico (T_c)	370 K
Pressão no ponto crítico (P_c)	4,26 MPa
Covolume (b) – obtido pela Eq. 3.16: $b = RT_c/8P_c$	0,00205 m ³ /kg

Conforme resultados da figura a seguir, a energia mecânica máxima no momento da ruptura dos tanques foi igual a 1,419 MJ no primeiro experimento e 1,475 MJ no segundo. Conforme já referido, Lees (1996) indica que a perda de energia numa explosão fica entre 20 % e 60 %, essa perda é a parcela de energia não carregada pela onda de choque. A massa equivalente de TNT foi calculada considerando uma perda de 25 %. Esse valor de 25 % foi obtido por meio de um processo iterativo, ou seja, foram feitas várias simulações numéricas até que as sobrepressões se aproximassem dos resultados experimentais. Com essa taxa de perda, as massas

equivalentes de TNT são iguais a 254,4 e 264,4 g, respectivamente, para os experimentos 1 e 2. O valor médio dessas duas massas foi adotado para a simulação numérica e para as equações semi-empíricas.

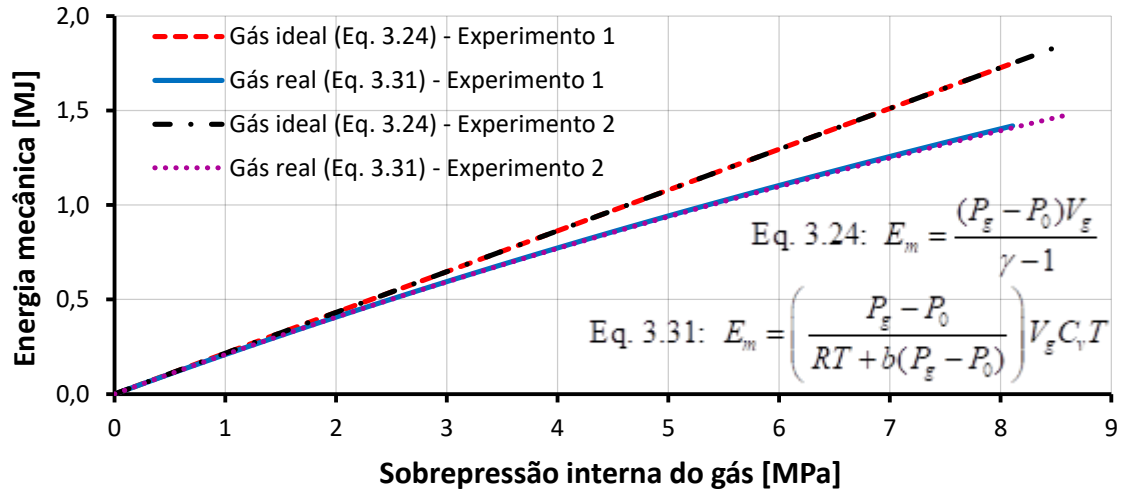


Figura 4.8 – Energia armazenada no tanque de 27,2 litros com gás propano.

O modelo numérico discretizado no Autodyn para representar de forma aproximada o modelo experimental está apresentado na Figura 4.9. Esta simulação foi feita de forma bidimensional, com simetria axial e discretizado com malha de 10 mm. O domínio do ar contém 4000 mm de altura e 9200 mm de comprimento. Uma faixa de areia com espessura de 100 mm foi colocada na borda inferior do domínio ar de forma a representar o solo, com isso, foi possível se analisar as reflexões da onda de choque. As propriedades dos materiais utilizados nesta simulação estão apresentadas nas Tabelas 4.5, 4.6, e 4.7.

Os sensores virtuais foram colocados a 5, 7 e 9 m da explosão e a 1,2 m do solo de forma a representar as situações dos experimentos. Em relação às condições de contorno, nas bordas livres do domínio do ar aplicou-se *flow out* (ar considerado como um meio ilimitado), pois, nessas bordas não pode haver efeito da reflexão e o solo foi considerado como rígido. Com relação a essa última condição de contorno, que pode ser imposta aos materiais sólidos, ela é apropriada para reduzir o custo computacional, uma vez que o interesse primário nas análises é a sobrepressão da onda de choque. Gebbeken, Warnstedt e Rüdiger (2018) citam que as reflexões obtidas numericamente para a condição de contorno rígida podem ser até certo ponto mais fortes que as reais, no entanto, os parâmetros necessários para modelar os materiais de forma mais realista,

especialmente o solo, não podem ser quantificados com esforço razoável, com isso, é conveniente negligenciá-los nas simulações.

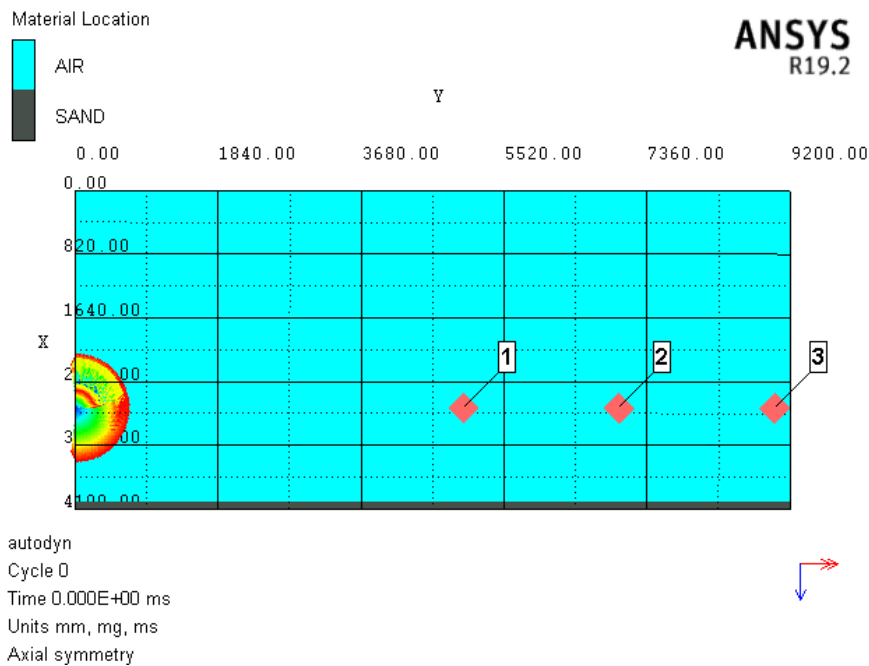


Figura 4.9 – Modelo discretizado no Autodyn.

Tabela 4.5 – Propriedades do ar

Massa específica	0,001225 g/cm ³
Equação de Estado	Gás ideal
Razão de calores específicos (γ)	1,4
Temperatura de referência	288,2 K
Calor específico	717,599976 J/kg·K
Pressão ambiente (P_0)	101,3 kPa

Tabela 4.6 – Propriedades do TNT

Massa específica	1,63 g/cm ³
Equação de Estado	JWL
Parâmetro A	$3,7377 \cdot 10^8$ kPa
Parâmetro B	$3,7471 \cdot 10^6$ kPa
Parâmetro R_1	4,15
Parâmetro R_2	0,9
Parâmetro ω	0,35
Velocidade de detonação	$6,93 \cdot 10^3$ m/s
Energia/unidade de volume	$6,00 \cdot 10^6$ kJ/m ³

Tabela 4.7 – Propriedades da areia (*sand*)

Massa específica de referência:		2,641 g/cm ³	
Equação de Estado:		Compaction Linear	
Massa específica x pressão		Massa específica x velocidade do som	
Massa específica [g/cm ³]	Pressão [kPa]	Massa específica [g/cm ³]	Velocidade do som [m/s]
1,6740	0,0	1,6740	265,20
1,7395	4577,0	1,7456	852,10
1,8738	14980,0	2,0863	1721,70
1,9970	29151,0	2,1468	1875,50
2,1438	59175,0	2,3000	2264,80
2,2500	98098,0	2,5720	2956,10
2,3800	179443,0	2,5980	3112,20
2,4850	289443,0	2,6350	4600,00
2,5850	450198,0	2,6410	4634,00
2,6713	650660,0	2,8000	4634,00

Com base nos resultados da Figura 4.10, para a distância de 5 m, nota-se que as sobrepressões estimadas por todos os modelos são próximas aos resultados experimentais. Nas distâncias de 7 m e 9 m, houve uma divergência dos modelos semi-empíricos em relação aos experimentos, porém, o modelo numérico foi capaz de representar com boa precisão o fenômeno. Nesse caso, as sobrepressões obtidas na simulação divergiram em menos de 4% em relação aos experimentos, com exceção do sensor a 9 m da explosão no experimento 1, nesse, a divergência foi próxima de 14%. Estas pequenas divergências podem estar relacionadas com a perda de energia considerada (25%) ou com o fenômeno da reflexão de onda, uma vez que o solo real pode ter absorvido parte da energia incidente. Em relação aos modelos semi-empíricos, as divergências são maiores nas posições mais distantes da explosão, isso ocorreu devido ao fato que estes modelos não captam o efeito da reflexão da onda de choque. Nas distâncias de 7 e 9 m, a reflexão Mach começou a influenciar nos níveis de sobrepressão, dessa forma, apenas o modelo numérico foi capaz de captar esse efeito. Na Figura 4.11, pode-se ver a chegada da onda refletida nos dois pontos a 7 m e 9 m da explosão, respectivamente, nos sensores 2 e 3.

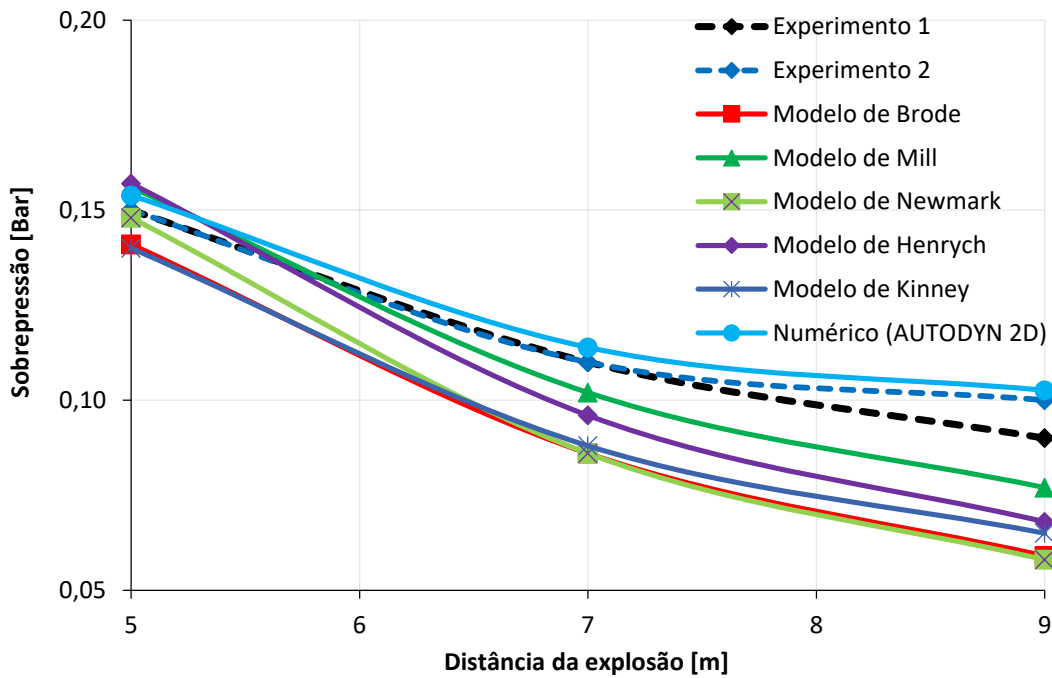


Figura 4.10 – Sobrepensões em função da distância da explosão para o tanque de 27,2 litros com propano.

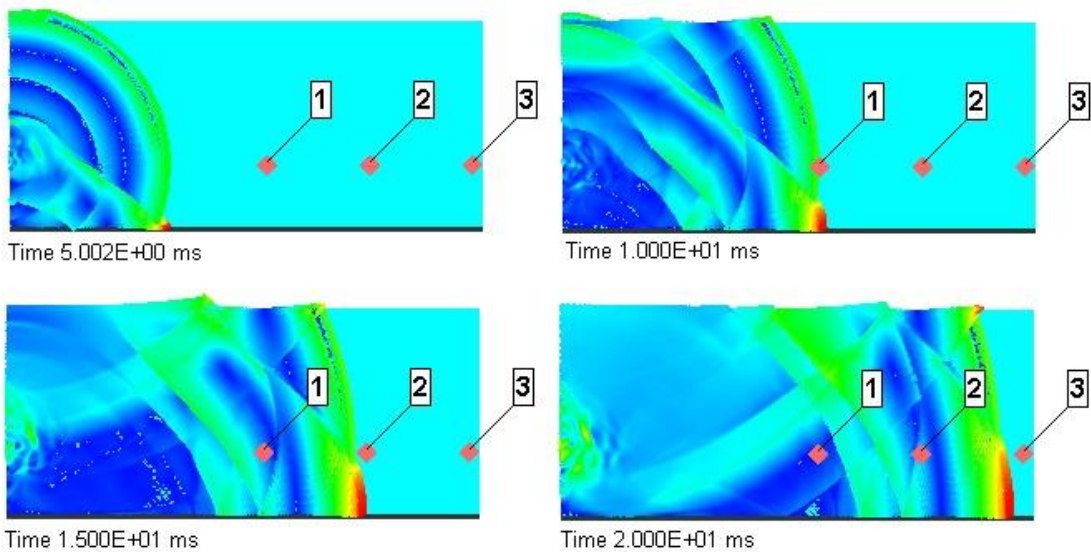


Figura 4.11 – Propagação da onda de choque no modelo numérico.

4.3. PRIMEIRO GRUPO DE SIMULAÇÕES: ANÁLISE DA EXPLOSÃO DOS TANQUES DE GÁS SOBRE O SOLO E EM ABRIGOS ENTERRADOS

Neste primeiro grupo de simulações, as explosões de tanques de gás estacionários sobre o solo e em abrigo enterrado foram analisadas. A grandeza física

verificada em todas as análises foi a sobrepressão da onda de choque no entorno da explosão e numa edificação próxima. Para isso, preliminarmente são apresentados os parâmetros técnicos e normativos dos tanques de gás, bem como os ambientes de análise e o cálculo da energia mecânica nos reservatórios e suas respectivas massas equivalentes de TNT.

4.3.1. Considerações gerais para o primeiro grupo de simulação

Inicialmente, para efetuar as análises, foram adotados os parâmetros (volume e afastamento) dos reservatórios de gás em concordância com a NBR 13523 (ABNT, 2019). Essa norma apresenta os tanques estacionários do tipo A, B, C, D e E sobre o solo e do tipo A e B enterrados, conforme Tabela 4.8. As aberturas indicadas nessa tabela referem-se principalmente às portas e janelas.

Os parâmetros técnicos dos tanques de gás são estabelecidos no processo de fabricação. Neste trabalho, o principal parâmetro necessário para os cálculos foi a pressão de projeto que é igual a 2,0 MPa (20 Bar), esse dado foi adotado de um fabricante europeu. É importante ressaltar que a pressão de projeto se refere à pressão máxima de segurança dentro do tanque para que não ocorra ruptura, porém, a pressão do gás para mantê-lo em estado líquido varia em razão da temperatura e da proporção de mistura dos hidrocarbonetos. Algumas pressões em razão dessas variáveis são apresentadas na Tabela 4.9.

Tabela 4.8 – Tipos de tanques de gás conforme a NBR 13523 (ABNT, 2019).

Tipo de tanque		Volume do tanque	Distância do tanque à edificação e às aberturas
Estacionário de superfície	A	até 0,5 m ³	Junto à edificação e a 3 m da abertura
	B	0,5 a 2,0 m ³	1,5 m da edificação e a 3 m da abertura
	C	2,0 a 5,5 m ³	3 m da edificação
	D	5,5 a 8,0 m ³	7,5 m da edificação
	E	8,0 a 120,0 m ³	15 m da edificação
Estacionário enterrado	A	até 8,0 m ³	3 m da edificação
	B	8,0 a 120,0 m ³	15 m da edificação

Tabela 4.9 – Pressão do GLP em função da mistura e temperatura (LAPESA, 2022).

Temperature °C	Pure propane 100%	Commercial mixes % propane / % butane				
		85% / 15%	60% / 40%	40% / 60%	15% / 85%	0% / 100%
45	14,3 bar	12,7 bar	9,9 bar	7,7 bar	5,0 bar	3,3 bar
50	16,1 bar	14,3 bar	11,2 bar	8,8 bar	5,8 bar	4,0 bar
55	18,0 bar	16,0 bar	12,7 bar	10,0 bar	6,6 bar	4,6 bar

Uma vez que os parâmetros dos reservatórios de gás são definidos, calcula-se a energia mecânica armazenada em cada um deles e em seguida suas respectivas massas equivalentes de TNT. Nesta etapa, foi adotada a mesma perda de energia obtida no processo de validação da ferramenta numérica, com valor igual a 25%. Além disso, ao observar a Tabela 4.9, nota-se que quanto maior a parcela de propano numa mistura, maior será a pressão necessária para manter o gás no estado líquido. Devido a isso, foram adotadas as propriedades físicas e químicas do gás propano puro (Tabela 4.10), pois, representa uma situação mais crítica. A energia mecânica e a massa equivalente de TNT em cada tipo de tanque estão apresentadas na Tabela 4.11. Nesse processo, a energia química da explosão foi desprezada, pois, ela só contribui na amplitude da onda de choque quando há ignição da mistura gasosa que se forma após a ruptura do tanque.

Tabela 4.10 – Propriedades propano (ÇENGEL; BOLES, 2014) - adaptado.

Temperatura de referência (T)	15° C (288,2 K)
Massa específica no estado líquido (ρ)	581 kg/m ³
Calor específico a pressão constante (C_p)	1,6794 kJ/kg·K
Calor específico a volume constante (C_v)	1,4909 kJ/kg·K
Razão de calores específicos (γ)	1,126
Massa molar (M)	44,097 kg/kmol
Constante molar (R)	0,1885 kJ/kg·K
Temperatura no ponto crítico (T_c)	370 K
Pressão no ponto crítico (P_c)	4,26 MPa
Covolume (b) – obtido pela Eq. 3.16: $b = RT_c/8P_c$	0,00205 m ³ /kg

É importante destacar que a técnica usada neste estudo (uso de massa equivalente de TNT para representar tanque de gás) permite apenas aproximações numa análise de explosões de tanques de gás. A explosão de TNT ao ar livre espalha sua energia de forma radial na vizinhança. No entanto, numa explosão mecânica de vasos pressurizados, pode ocorrer concentração da energia numa determinada direção, pois, a

ruptura, normalmente, ocorre no ponto de falha da parede do reservatório. Além do mais, não sendo objeto deste estudo, há diversos outros parâmetros que podem afetar esse tipo de explosão como, por exemplo, as intemperes, incêndio próximo, temperatura e pressão ambiente, fixação do tanque, dentre outros.

Tabela 4.11 – Energia mecânica e massa equivalente de TNT em cada tanque.

Tanques de gás		Energia mecânica armazenada [J]	Massa equivalente de TNT [kg]	
Tipo	V_g [m ³]	Eq. 3.31: $E_m = \left(\frac{P_g - P_0}{RT + b(P_g - P_0)} \right) V_g C_v T$	Eq. 3.22: $W_{TNT} = \frac{E_m}{H_{TNT}}$	
superfície	A	0,5	7.005.291,9	1,256
	B	2,0	28.021.167,7	5,023
	C	5,5	77.058.211,2	13,813
	D	8,0	112.084.670,8	20,092
	E	120,0	1.681.270.061,9	301,375
enterrado	A	8,0	112.084.670,8	20,092
	B	120,0	1.681.270.061,9	301,375

Notas: 1) energia específica do TNT (H_{TNT}) é igual a 4184 J/g.
2) perda de energia igual a 25%.

Para as simulações deste grupo, dois ambientes foram propostos de forma a representar situações comuns em edificações urbanas, por exemplo, cômodos de residências, salas de escritórios, dentre outros. No primeiro (ambiente 1 apresentado na Figura 4.12) simulou-se a explosão dos tanques do tipo A e B de superfície, ou seja, sobre o solo. No segundo ambiente (ambiente 2 apresentado na Figura 4.13) a região de modelagem foi ampliada de modo permitir a verificação da canalização da onda de choque em corredores estreitos, isso foi possível devido às distâncias de afastamento serem maiores para os tanques do tipo C, D e E de superfícies e A e B enterrados. Esses dois ambientes foram concebidos em escala real. Todas as dimensões indicadas nas figuras a seguir estão em milímetros. As lajes possuem espessura de 100 mm e a altura livre é igual a 2900 mm.

Os sensores foram colocados em forma a captar as sobrepressões em pontos importantes como, por exemplo, porta, janela, cantos, centro do ambiente e corredores. Todos os sensores indicados nas Figuras 4.12 e 4.13 e o ponto da explosão estão localizados a 1200 mm do solo, exceto quando simulados com tanques de 120 m³, nesse caso, essa medida foi de 1300 mm devido às grandes dimensões do reservatório. Essas alturas adotadas são apropriadas para avaliar os efeitos danosos nos seres humanos,

pois, representam a posição aproximada dos órgãos vitais quando uma pessoa está nas posições em pé ou sentada numa cadeira, por exemplo.

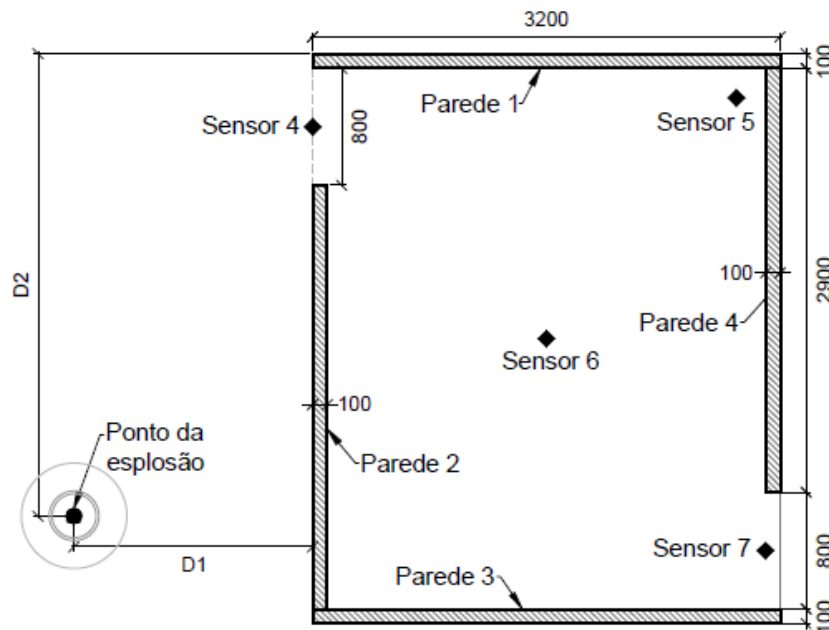


Figura 4.12 – Ambiente 1.

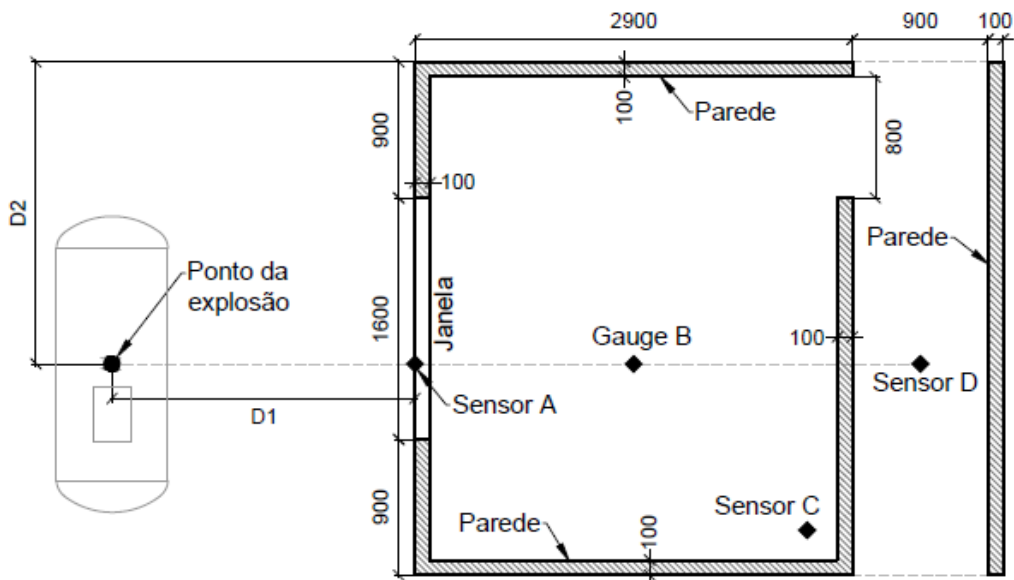


Figura 4.13 – Ambiente 2.

4.3.2. Explosão dos tanques de gás sobre o solo

Nesta seção, os ambientes 1 e 2 são analisados com tanques de gás sobre o solo de forma a compor os modelos 1, 2, 3, 4 e 5, conforme Tabela 4.12. Nessa tabela

também estão apresentadas as distâncias de afastamentos D1 e D2, as quais estão indicadas nas Figuras 4.12 e 4.13. A distância D1 é igual à soma do afastamento mínimo normativo com a metade do diâmetro do tanque.

Tabela 4.12 – Distâncias de afastamento e identificação dos modelos de análise para os tanques sobre o solo.

Tipo dos tanques de superfície	Volume do tanque [m ³]	Diâmetro do tanque [mm]	Distâncias de afastamento		Identificação dos modelos para as simulações
			D1 [mm]	D2 [mm]	
A	0,5	1000	500	3900	Modelo 1
B	2,0	1200	2100	3050	Modelo 2
C	5,5	2000	4000	2000	Modelo 3
D	8,0	2200	8600	2000	Modelo 4
E	120,0	2400	16200	2000	Modelo 5

Para a modelagem no Autodyn, os dados de construção do ambiente 1 referente aos modelos 1 e 2 com malha de 25 mm estão apresentados na Tabela 4.13. Cada parte (elemento que compõe a geometria do ambiente) tem uma identificação, um ponto de origem, dimensões em cada eixo, número de elementos em cada dimensão, material constituinte e o processador. As dimensões geométricas de todas as partes foram adotadas de forma que os elementos da malha ficassem iguais e todos os nós coincidissem nas faces de contato entre as partes, inclusive o ar. As propriedades de cada material empregado neste grupo de simulações estão apresentadas nas Tabelas 4.14, 4.15, 4.16 e 4.17. Todos os demais modelos seguiram o mesmo processo de discretização.

Tabela 4.13 – Dados de discretização dos modelos 1 e 2 com malha de 25 mm.

Parte	Coordenadas do ponto de origem			Dimensões da parte em cada direção [mm]			Nº de elementos da malha em cada direção			Processador
	x	y	z	Dx	Dy	Dz	Nx	Ny	Nz	
Ar	0	0	0	5800	3100	3900	232	124	156	Euler
Solo	0	0	0	5800	100	3900	232	4	156	Lagrange
Parede 1	2600	100	0	3200	2900	100	128	116	4	Lagrange
Parede 2	2600	100	900	100	2900	2900	4	116	116	Lagrange
Parede 3	2600	100	3800	3200	2900	100	128	116	4	Lagrange
Parede 4	5700	100	100	100	2900	2900	4	116	116	Lagrange
Laje	2600	3000	0	3200	100	3900	128	4	156	Lagrange

Tabela 4.14 – Propriedades do ar

Massa específica	0,001225 g/cm ³
Equação de Estado	Gás ideal
Razão de calores específicos (γ)	1,4
Temperatura de referência	288,2 K
Calor específico	717,599976 J/kg·K
Pressão ambiente (P_0)	101,3 kPa

Tabela 4.15 – Propriedades do TNT

Massa específica	1,63 g/cm ³
Equação de Estado	JWL
Parâmetro A	$3,7377 \cdot 10^8$ kPa
Parâmetro B	$3,7471 \cdot 10^6$ kPa
Parâmetro R_1	4,15
Parâmetro R_2	0,9
Parâmetro ω	0,35
Velocidade de detonação	$6,93 \cdot 10^3$ m/s
Energia/unidade de volume	$6,00 \cdot 10^6$ kJ/m ³

Tabela 4.16 – Propriedades do concreto 35 MPa

Massa específica	2,50 g/cm ³
Equação de Estado	Polinomial
Módulo volumétrico A_1	$35,27 \cdot 10^6$ kPa
Parâmetro A_2	$39,58 \cdot 10^6$ kPa
Parâmetro A_3	$9,04 \cdot 10^6$ kPa
Parâmetro B_0	1,22
Parâmetro B_1	1,22
Parâmetro T_1	$35,27 \cdot 10^6$ kPa
Parâmetro T_2	0 kPa
Temperatura de referência	288,2 K

Tabela 4.17 – Propriedades da areia (*sand*)

Massa específica de referência:		2,641 g/cm ³	
Equação de Estado:		Compaction Linear	
Massa específica x pressão		Massa específica x velocidade do som	
Massa específica [g/cm ³]	Pressão [kPa]	Massa específica [g/cm ³]	Velocidade do som [m/s]
1,6740	0,0	1,6740	265,20
1,7395	4577,0	1,7456	852,10
1,8738	14980,0	2,0863	1721,70
1,9970	29151,0	2,1468	1875,50
2,1438	59175,0	2,3000	2264,80
2,2500	98098,0	2,5720	2956,10
2,3800	179443,0	2,5980	3112,20
2,4850	289443,0	2,6350	4600,00
2,5850	450198,0	2,6410	4634,00
2,6713	650660,0	2,8000	4634,00

A condição de contorno aplicada aos materiais sólidos foi rígida, dessa forma, foi evitado o tempo excessivo de simulação que as grandes deformações e fragmentação ocasionam. Esse tipo de condição de contorno também foi usado por Luccioni, Ambrosini e Danesi (2006) e Gebbeken, Warnstedt e Rüdiger (2018). Uma vez que o ar foi considerado como um meio ilimitado, aplicou-se a condição de contorno *flow out* nas faces livres do domínio deste material, com isso, eliminou-se a possibilidade de reflexão da onda de choque nas bordas. Essas considerações foram adotadas em todas as simulações deste trabalho.

Os sensores virtuais dispostos nos pontos de importância estão nomeados da seguinte forma: os externos estão identificados com números em todos os modelos e os internos com números para os modelos 1 e 2 e com letra para os demais. A distância de afastamento de cada sensor externo ao ponto de explosão está detalhada na Tabela 4.18. Uma vez que não há experimentos para cada modelo deste grupo de simulações, os resultados numéricos de três pontos foram comparados com resultados obtidos pelas equações semi-empíricas, as quais estão dispostas da Tabela 3.3 do capítulo 3, para isso, os sensores 1, 2 e 3 foram colocados em locais onde não houve efeito da reflexão antes da incidência direta da onda de choque.

Tabela 5.18 – Distância em metros dos sensores externos ao centro da explosão.

Sensor	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Modelo 1	1,594	2,790	3,986	-	-	-	-	-	-
Modelo 2	1,368	2,438	3,509	-	-	-	-	-	-
Modelo 3	2,689	3,087	3,735	-	-	-	-	-	-
Modelo 4	2,112	3,697	5,281	2,600	4,600	6,600	-	-	-
Modelo 5	3,040	4,050	5,070	4,200	6,200	8,200	10,200	12,200	14,200

De acordo com Luccioni, Ambrosini e Danesi (2006), a precisão dos resultados numéricos é fortemente dependente do tamanho da malha. Por outro lado, o refino da malha fica limitado pela capacidade computacional. No estudo desses pesquisadores, ficou demonstrado que uma malha de 100 mm é adequada para uma análise de propagação da onda de choque em ambientes urbanos. No estudo de Costa Neto e Doz (2017b) sobre explosões próximas às edificações, a malha usada foi de 50 mm. Portanto, esses dois tamanhos dos elementos de malhas foram adotados em todos os modelos. Com a finalidade de melhorar ainda mais a precisão dos resultados, uma outra malha de 25 mm foi empregada nos modelos 1, 2, 3 e 4. O modelo 5 ficou limitado às malhas de 100 e 50 mm devido às grandes dimensões geométricas.

Respectivamente, os modelos 1, 2, 3, 4 e 5 discretizados no Autodyn com malha de 100 mm estão apresentados nas Figuras 4.14, 4.15, 4.16, 4.17 e 4.18.

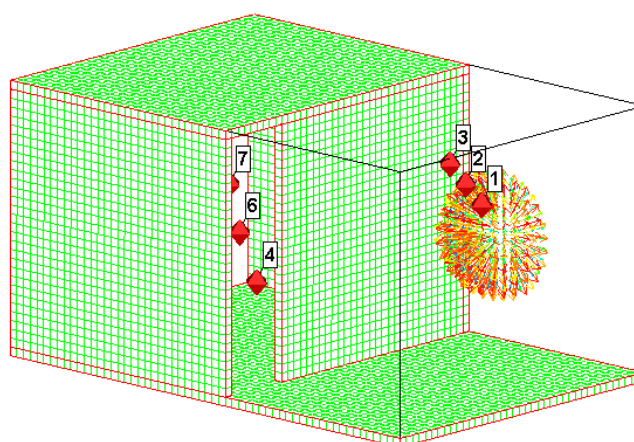


Figura 4.14 – Modelo 1 discretizado no Autodyn com malha de 100 mm (tanque de gás com volume igual a 0,5 m³).

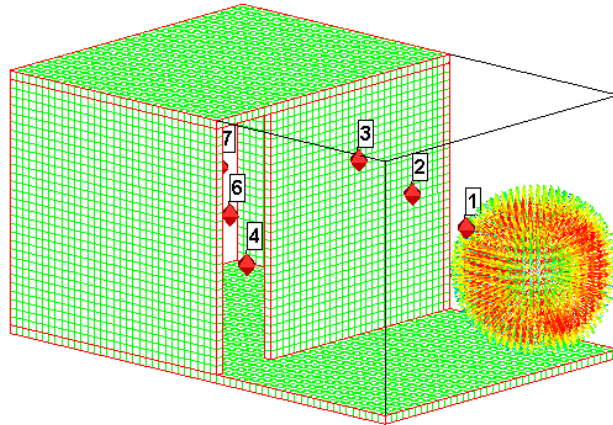


Figura 4.15 – Modelo 2 discretizado no Autodyn com malha de 100 mm (tanque de gás com volume igual a $2,0 \text{ m}^3$).

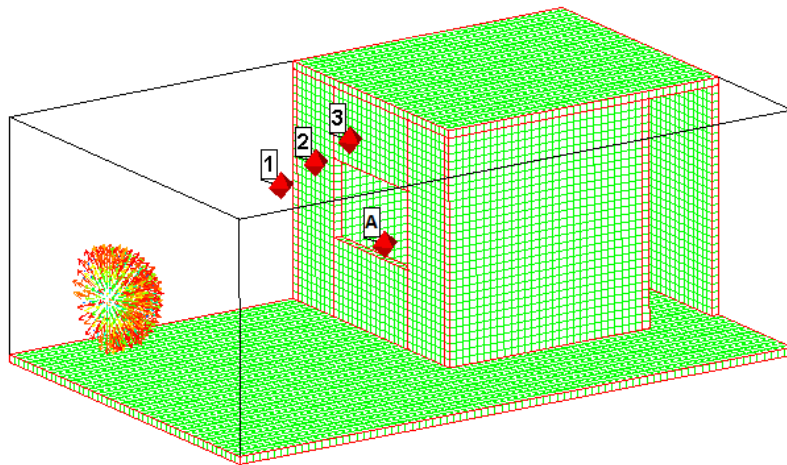


Figura 4.16 – Modelo 3 discretizado no Autodyn com malha de 100 mm (tanque de gás com volume igual a $5,5 \text{ m}^3$).

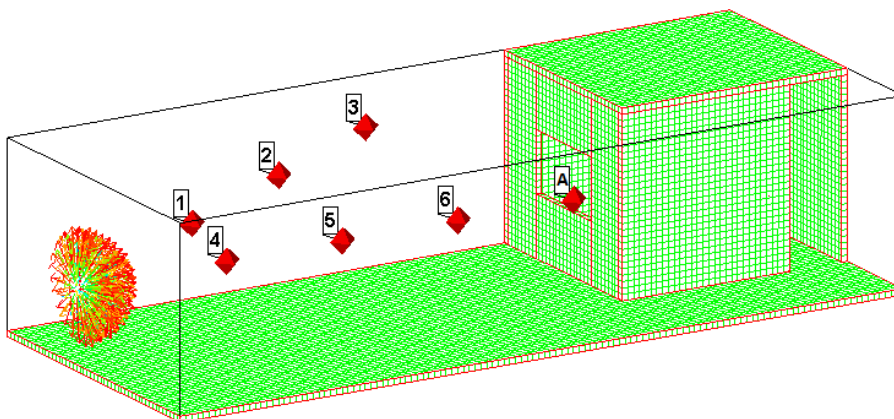


Figura 4.17 – Modelo 4 discretizado no Autodyn com malha de 100 mm (tanque de gás com volume igual a $8,0 \text{ m}^3$).

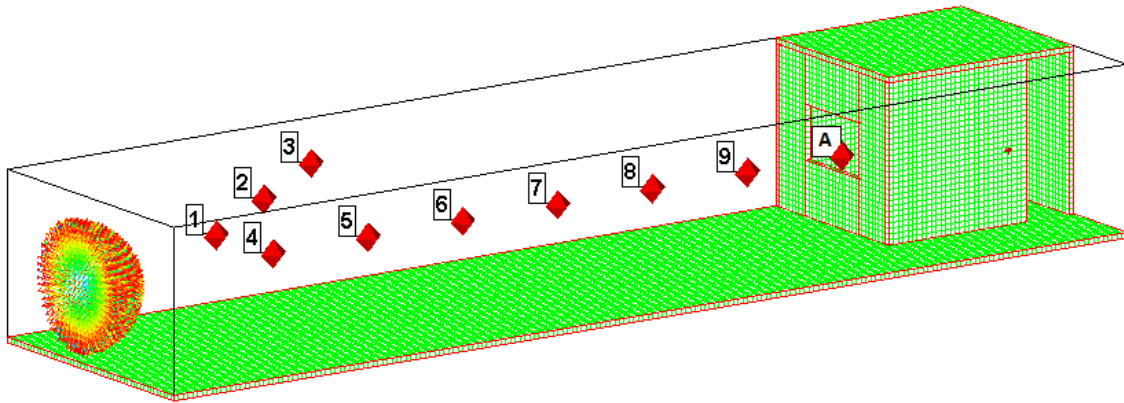


Figura 4.18 – Modelo 5 discretizado no Autodyn com malha de 100 mm (tanque de gás com volume igual a 120 m³).

Como parâmetro de comparação entre os modelos numéricos e semi-empíricos, os resultados dos sensores 1, 2 e 3 dos modelos 1, 2, 3, 4 e 5 estão apresentados nas Figuras 4.19, 4.20, 4.21, 4.22 e 4.2, respectivamente. Esses resultados mostram uma convergência entre todos os métodos à medida em que se afasta do ponto da explosão, com base nisso, verifica-se que as simulações numéricas estão coerentes com a situação real representada em cada cenário. Por outro lado, vale ressaltar que há muitas imprecisões nos pontos mais próximos da explosão. Ademais, apesar do custo computacional mais elevado, foi observado que a malha mais refinada proporciona resultados mais acurados em relação aos modelos semi-empíricos, isso está relacionado à redução dos erros numéricos.

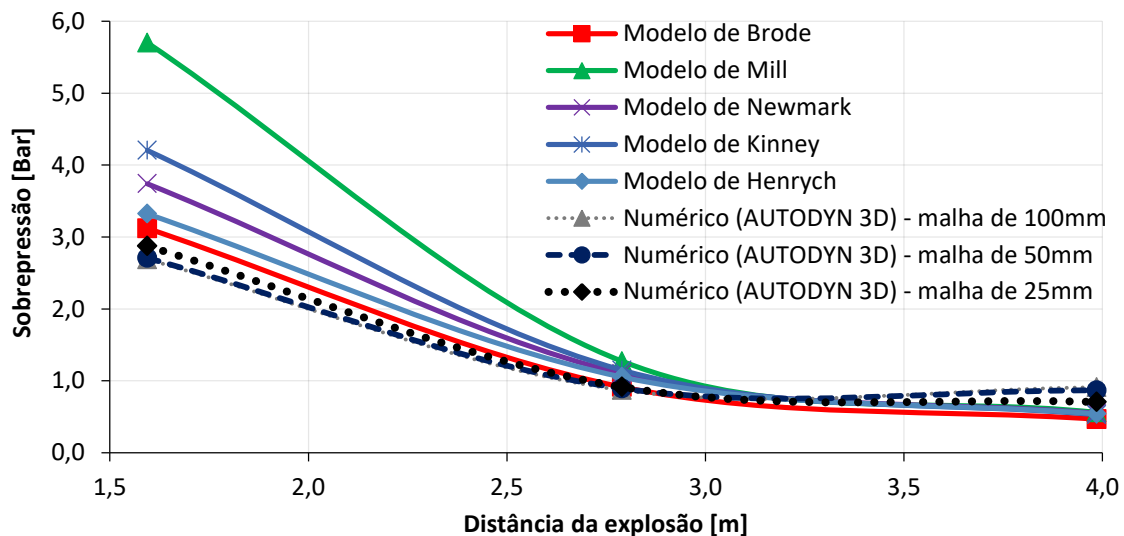


Figura 4.19 – Picos de sobrepessão nos sensores 1, 2 e 3 do modelo 1.

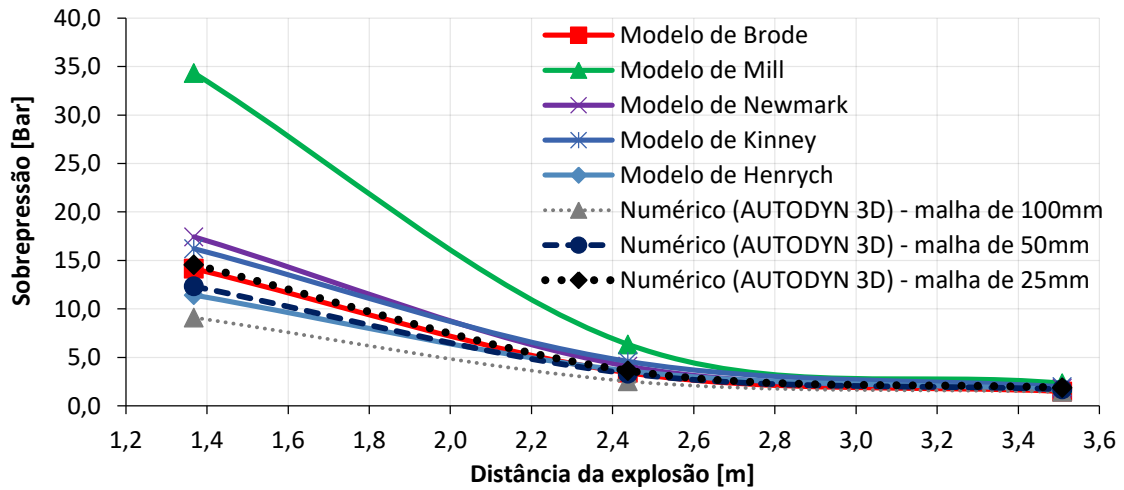


Figura 4.20 – Picos de sobrepessão nos sensores 1, 2 e 3 do modelo 2.

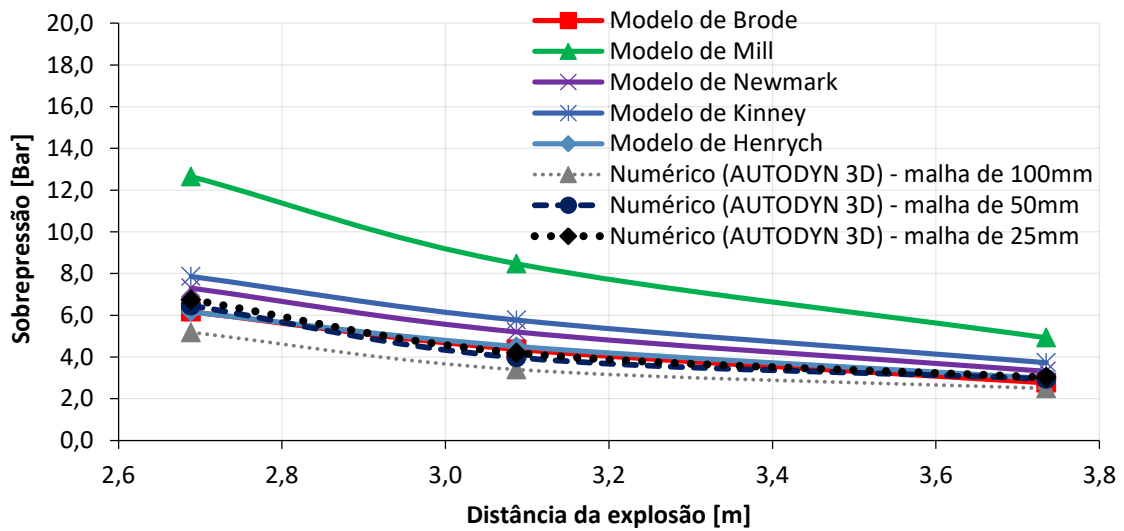


Figura 4.21 – Picos de sobrepessão nos sensores 1, 2 e 3 do modelo 3.

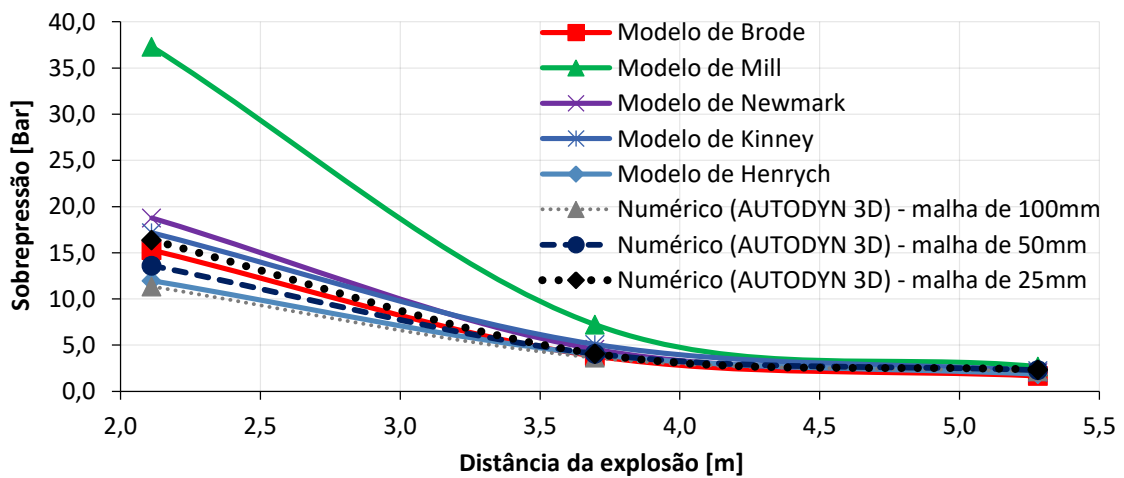


Figura 4.22 – Picos de sobrepessão nos sensores 1, 2 e 3 do modelo 4.

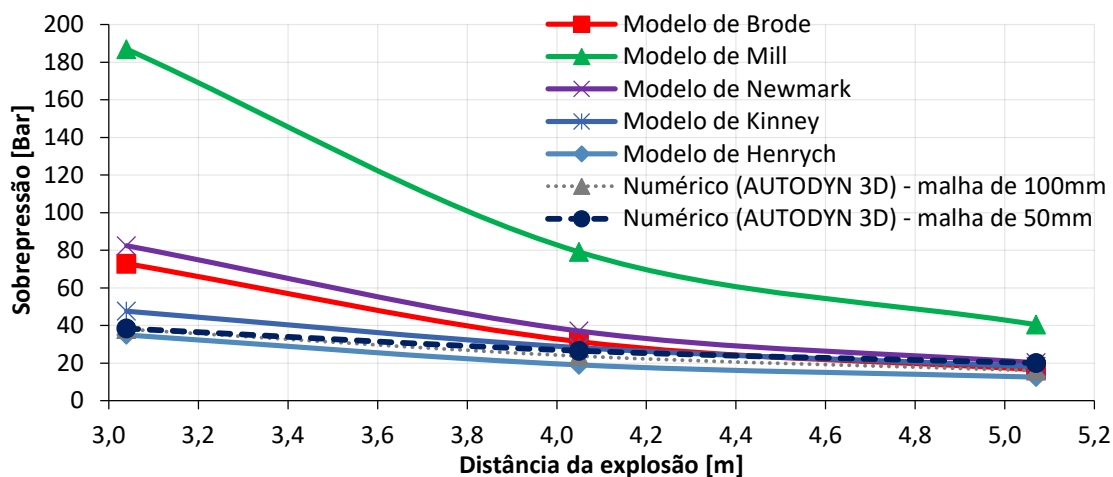


Figura 4.23 – Picos de sobrepressão nos sensores 1, 2 e 3 do modelo 5.

Os resultados apresentados adiante (Figuras 4.24, 4.25, 4.26, 4.27 e 4.28) são referentes aos pontos de interesse dos modelos 1, 2, 3, 4 e 5, nessa ordem. É com base nesses resultados que se pode estabelecer os riscos numa análise preliminar de danos. Nos sensores externos, houve influência da reflexão da onda de choque no solo, já nos sensores internos, as múltiplas reflexões no solo, paredes e lajes alteram substancialmente os níveis de sobrepressão. Nos modelos 1 e 2 por exemplo, esse efeito das múltiplas reflexões pode ser notado no sensor 5 que está no canto do ambiente, esse sensor está mais distante da abertura que o sensor 6, porém, a sobrepressão é superior. Outro efeito verificado nos modelos com corredor foi a canalização da onda de choque e isso pode ser notado pelos níveis de sobrepressão no sensor D.

Com base nestes resultados, verifica-se que o refino da malha não necessariamente proporciona sobrepressões maiores, isso pode ser observado no sensor A dos modelos 3 e 4 e no sensor 4 do modelo 5.

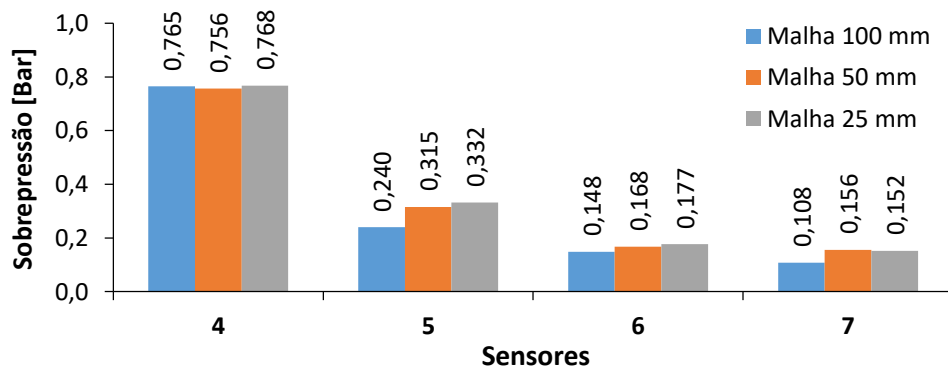


Figura 4.24 – Sobrepressões máximas nos sensores 4 ao 7 do modelo 1 (explosão do tanque de propano com volume de $0,5 \text{ m}^3$).

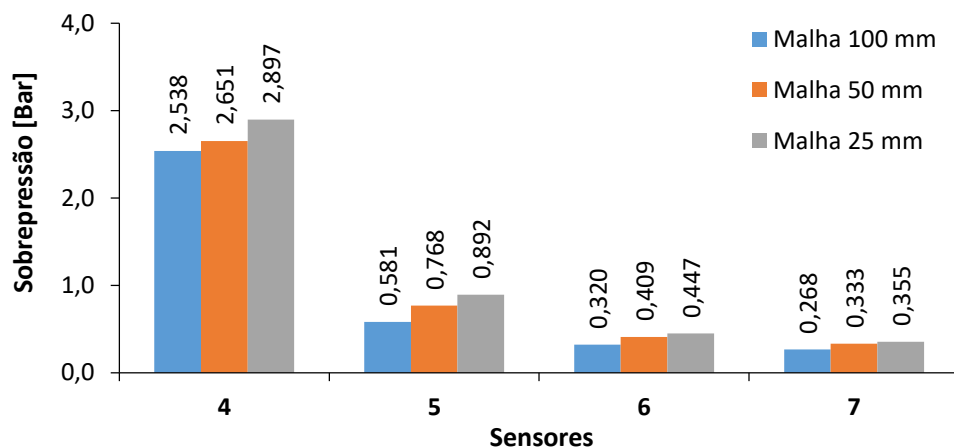


Figura 4.25 – Sobrepressões máximas nos sensores 4 ao 7 do modelo 2 (explosão do tanque de propano com volume de 2,0 m³).

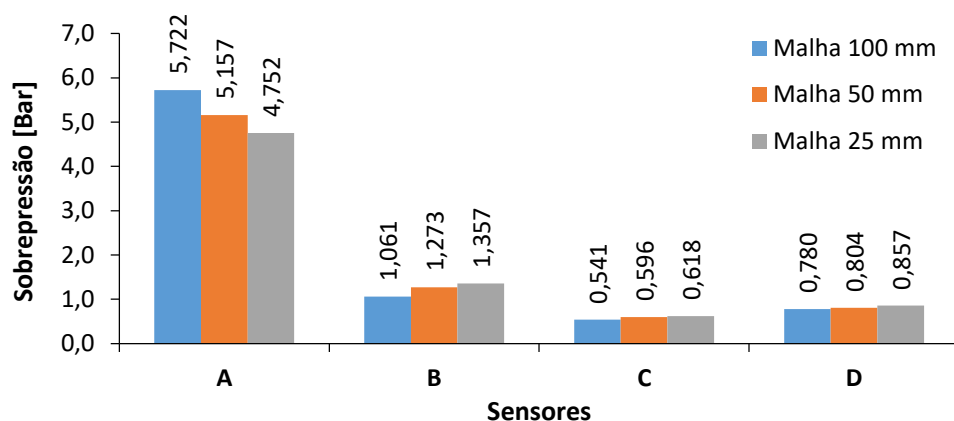


Figura 4.26 – Sobrepressões máximas nos sensores A, B, C e D do modelo 3 (explosão do tanque de propano com volume de 5,5 m³).

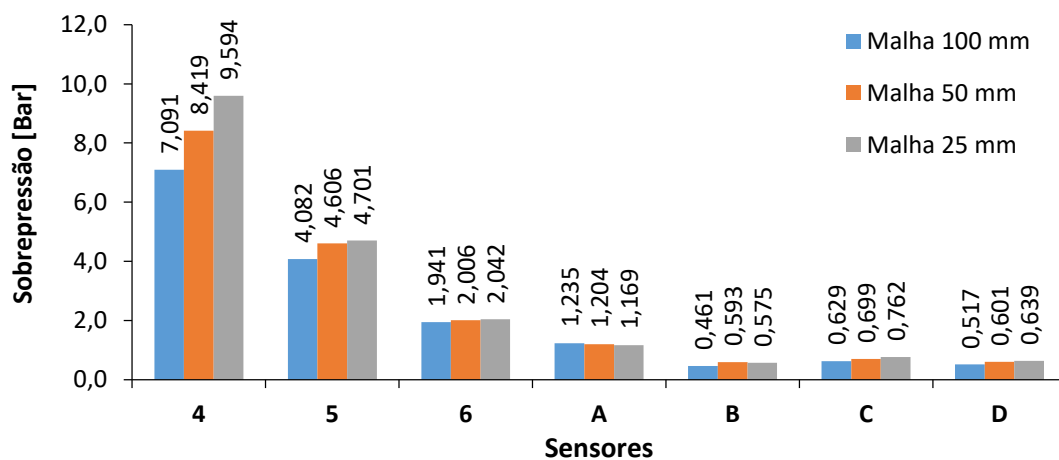


Figura 4.27 – Sobrepressões máximas nos sensores externos 4, 5 e 6 e internos A, B, C e D do modelo 4 (explosão do tanque de propano com volume de 8 m³).

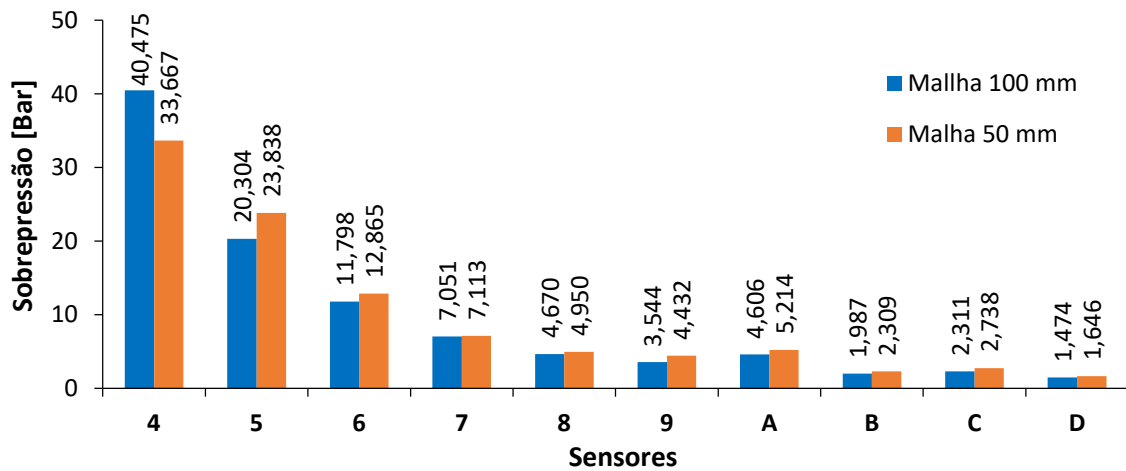


Figura 4.28 – Sobrepressões máximas nos sensores externos 4 ao 9 e internos A, B, C e D do modelo 5 (explosão do tanque de propano com volume de 120 m³).

Vale ressaltar que o tanque estacionário superficial do tipo E dificilmente é aplicável às edificações urbanas em seu limite máximo de volume, visto que possui grandes dimensões, podendo chegar a 25 m de comprimento, porém, pode ser aplicado em parques industriais. O volume máximo para essa categoria é igual a 120 m³ e deve ser instalado a uma distância mínima de 15 m de qualquer edificação ou divisa de terreno, conforme prescrições da NBR 13523 (ABNT, 2019).

4.3.3. Explosão de tanques de gás em abrigo enterrado

As simulações propostas nesta seção referem-se aos tanques enterrados. Na modelagem, os reservatórios de gás foram alocados dentro de abrigos de concreto enterrados, conforme exemplificado na Figura 4.29. Ademais, a vedação da parte superior do abrigo (a tampa) foi desconsiderada visando a análise de uma situação mais crítica e menos custosa computacionalmente.

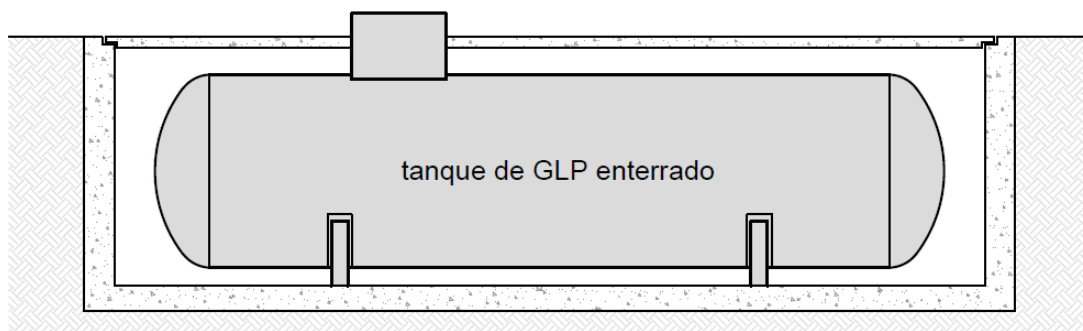


Figura 4.29 – Esquema de tanques de gás em abrigo enterrado.

Segundo a NBR 13523 (ABNT, 2019), os tanques enterrados são do tipo A e B, cujos detalhes estão apresentados na Tabela 4.19. Esses dois tipos de tanques foram inseridos no ambiente 2 de modo a compor os modelos 6 e 7, respectivamente. A distância total de afastamento horizontal (D1) do ponto de explosão em relação à estrutura é igual à soma da distância mínima preconizada na norma supracitada com a metade do diâmetro do tanque. Em relação ao posicionamento vertical, o ponto de explosão foi considerado no centro de cada reservatório. O abrigo enterrado deve ser construído de forma que haja um espaço livre no entorno do tanque. Na modelagem, esse espaço foi considerado igual a 50 cm. Convém mencionar que essa medida também é recomendada por alguns fabricantes de tanques de gás.

Tabela 4.19 – Distâncias de afastamento e identificação dos modelos de análise para os tanques enterrados.

Tipo dos tanques enterrados	Volume do tanque [m ³]	Diâmetro do tanque [mm]	Distâncias de afastamento		Identificação dos modelos para as simulações
			D1 [mm]	D2 [mm]	
A	8,0	2000	4000	2000	Modelo 6
B	120,0	2400	16200	2000	Modelo 7

Os sensores virtuais foram mantidos nas mesmas posições das simulações da seção anterior (tanques sobre o solo), exceto os sensores 1, 2 e 3. Nesse caso, esses três sensores foram realocados em pontos diferentes devido ao posicionamento dos tanques enterrados. As distâncias de afastamento dos sensores externos em relação à explosão estão apresentadas na Tabela 4.20.

Tabela 4.20 – Distância em metros dos sensores externos ao centro da explosão.

Sensor	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Modelo 6	3,000	3,700	4,400	-	-	-	-	-	-
Modelo 7	2,009	3,015	4,020	4,200	6,200	8,200	10,200	12,200	14,200

Nota: as distâncias dos medidores 4 a 9 referem-se às componentes horizontais do modelo 7. O ponto de explosão está abaixo do nível do solo.

Os modelos 6 e 7 discretizados no Autodyn estão apresentados respectivamente nas Figuras 4.30 e 4.31, ambos com malha de 100 mm. De modo semelhante à seção anterior, o modelo 6 foi simulado com malha de 100, 50 e 25 mm e o modelo 7, por ter grandes dimensões geométricas, foi simulado com malha de 100 e 50 mm. Em razão do comprimento elevado do reservatório de 120 m³, aproximadamente 25 m, o abrigo do

modelo 7 foi considerado aberto nas laterais que são ortogonais ao comprimento do tanque.

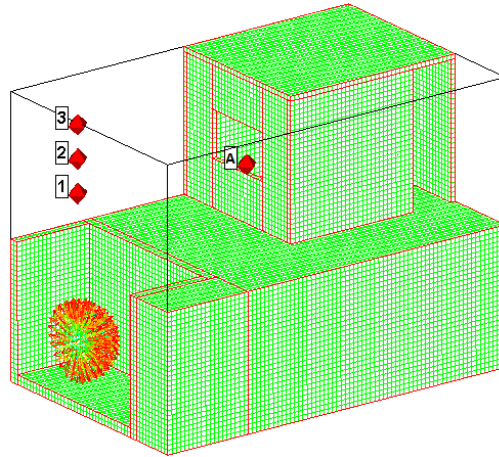


Figura 4.30 – Modelo 6 discretizado no Autodyn com malha de 100 mm (tanque de gás com volume igual a $8,0 \text{ m}^3$ em abrigo enterrado).

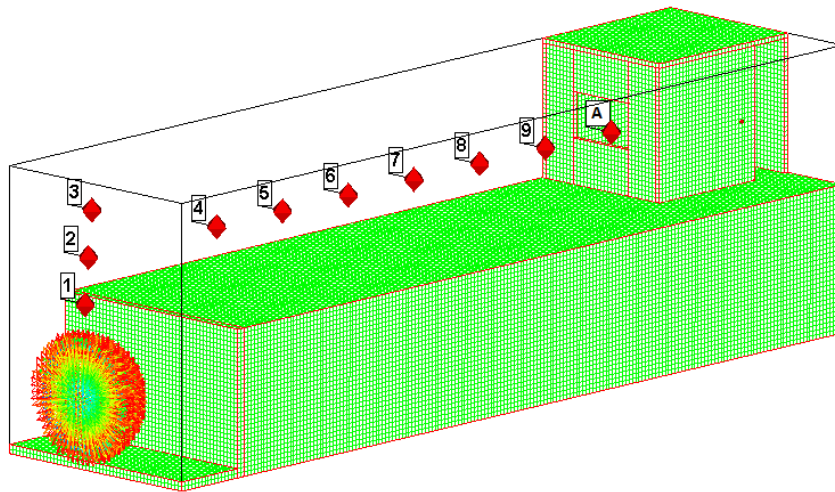


Figura 4.31 – Modelo 7 discretizado no Autodyn com malha de 100 mm (tanque de gás com volume igual a 120 m^3 em abrigo enterrado).

Para fins comparativos entre os resultados das equações semi-empíricas e dos modelos numéricos, os picos de sobrepressão obtidos nos pontos dos sensores 1, 2 e 3 estão apresentados nas Figuras 4.32 e 4.33, respectivamente para os modelos 6 e 7. Os resultados dispostos nessas figuras mostram que há grandes divergências para os pontos próximos às explosões, mostrando que nesses pontos todos os métodos de predição da sobrepressão são imprecisos, no entanto, à medida em que se afasta da explosão, há uma

convergência dos resultados. Com isso, pode-se afirmar que os modelos numéricos apresentam coerência suficiente para simular uma situação real.

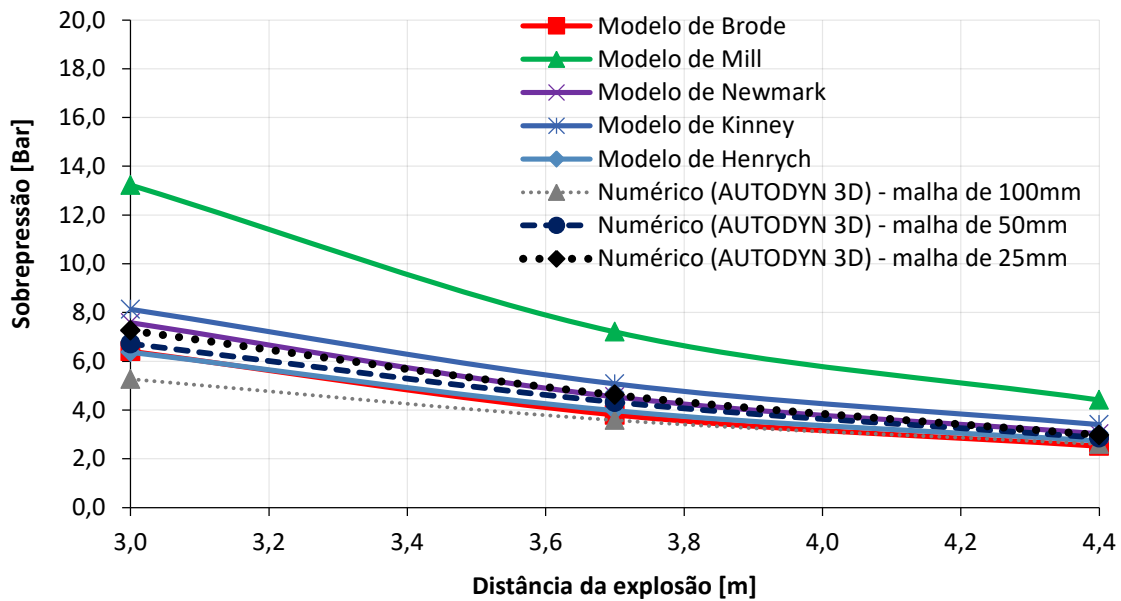


Figura 4.32 – Picos de sobrepressão nos sensores 1, 2 e 3 do modelo 6.

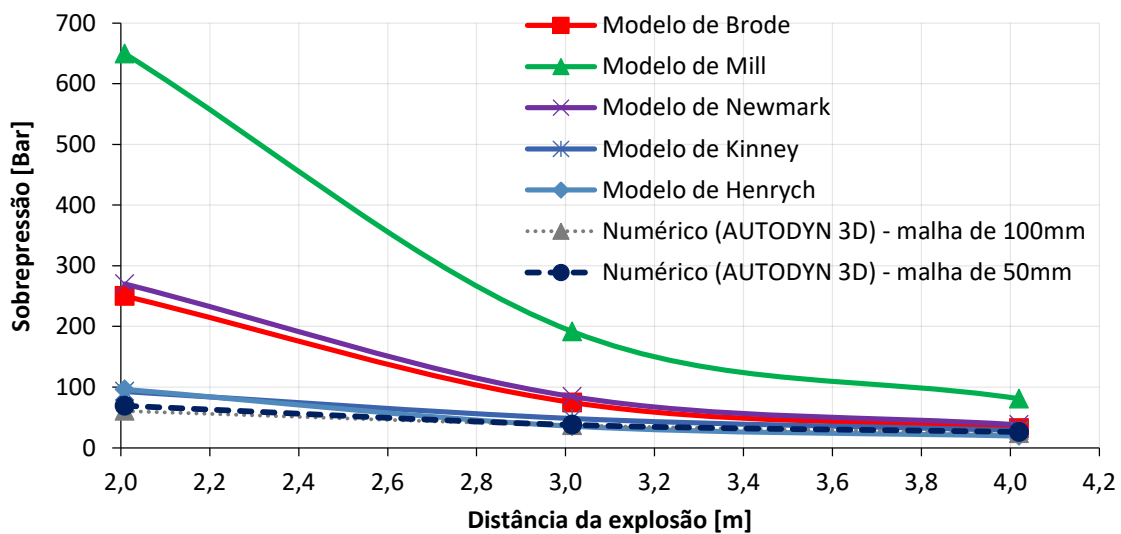


Figura 4.33 – Picos de sobrepressão nos sensores 1, 2 e 3 do modelo 7.

Os picos de sobrepressão nos pontos de interesse dos modelos 6 e 7 estão apresentados nas Figuras 4.34 e 4.35. De modo geral, nota-se que enterrar os tanques de gás reduz substancialmente os níveis de sobrepressão na edificação e entorno da explosão. As paredes do abrigo enterrado absorvem uma parte significativa da energia e redireciona a onda de choque para cima. No modelo 6, por exemplo, onde o tanque está em abrigo enterrado, as sobrepressões máximas aferidas na maioria dos sensores são

inferiores aos valores medidos no modelo 3 (seção anterior), onde o tanque está acima do solo e possui um volume menor. Ao comparar os resultados dos modelos 5 e 7 (mesmo volume e afastamento), nota-se que o uso de tanques enterrados apresenta uma vantagem considerável em termos de segurança em relação aos modelos a céu aberto.

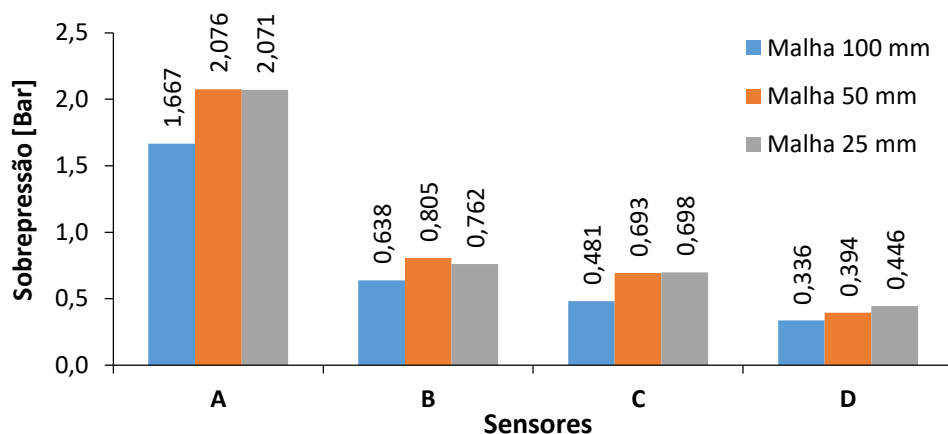


Figura 4.34 – Sobrepressões máximas nos sensores A, B, C e D do modelo 6 (explosão do tanque de propano com volume de 8 m³).

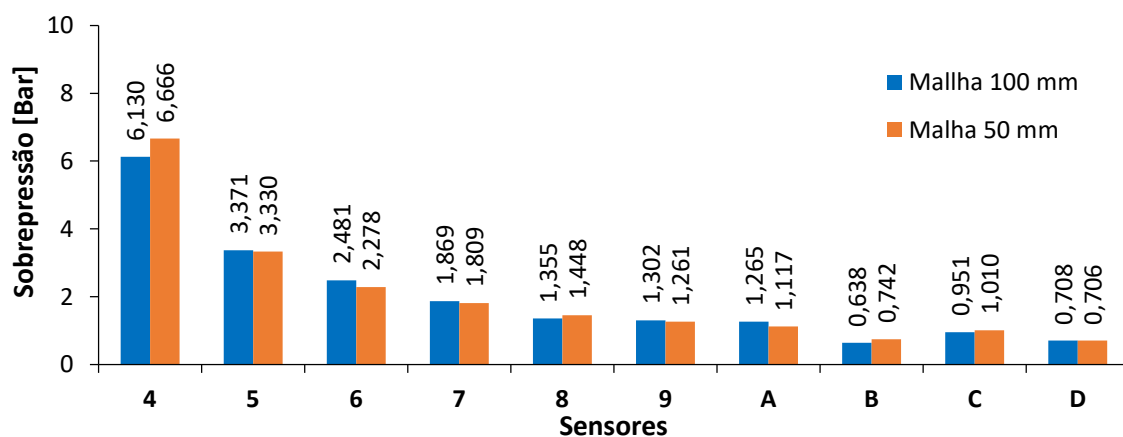


Figura 4.35 – Sobrepressões máximas nos sensores externos 4 ao 9 e internos A, B, C e D do modelo 7 (explosão do tanque de propano com volume de 120 m³).

4.3.4. Explosões de tanques de gás próximos à fachada de um edifício: análise comparativa entre o modelo com tanque sobre o solo e em abrigo enterrado.

Com a finalidade de fazer uma análise comparativa nos níveis de sobrepressão no entorno da explosão e na fachada de um edifício, algumas simulações foram realizadas em duas situações (tanque sobre o solo e em abrigo enterrado) com volume de 8 m³ situados a 7,5 m da edificação. Para isso, um ambiente similar às situações

comuns nos meios urbanos foi proposto, conforme Figura 4.36. A altura total se limitou a quatro pavimentos para não prolongar em demasiado o tempo de processamento das simulações devido às limitações do computador utilizado.

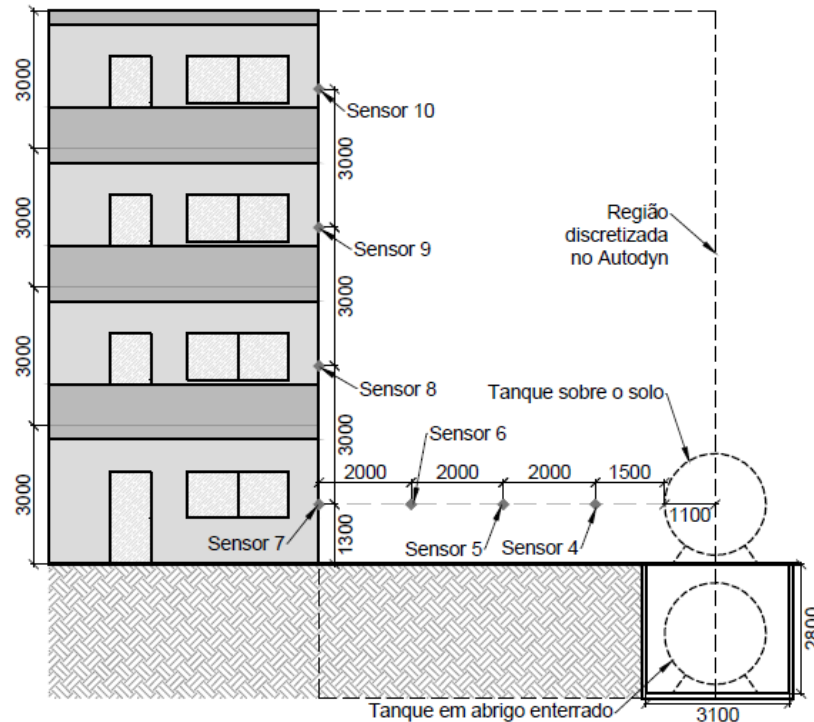


Figura 4.36 – Esquema do edifício para análise das sobrepressões na fachada e entorno.

As duas situações (tanque sobre o solo e enterrado) foram discretizadas no Autodyn conforme Figuras 4.37 e 4.38, ambas com malhas de 100, 50 e 20 mm. A modelagem foi feita de forma bidimensional e, devido a onda de choque de uma explosão ao ar livre se propagar de forma radial, foi adotada a simetria axial, onde o eixo de rotação passa pelo centro da explosão. As partes sólidas (fachada, solo e abrigo enterrado) foram consideradas como rígidas, uma vez que o interesse primário são os picos de sobrepressão da onda de choque.

Os sensores 1, 2 e 3 foram colocados em pontos onde o efeito da reflexão não causou influência antes da incidência direta da onda de choque, com isso, os resultados desses três pontos puderam ser comparados com os resultantes dos métodos semi-empíricos. Os sensores 4, 5 e 6 foram inseridos na região entre o tanque e a construção de modo a captar as sobrepressões no entorno da explosão, já os sensores numerados de 7 a 10 estão alocados na fachada lateral da edificação nos níveis das janelas.

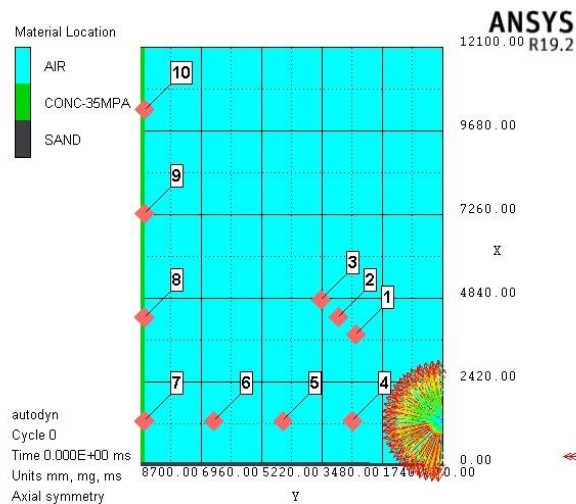


Figura 4.37 – Discretização no Autodyn para explosão do tanque sobre o solo.

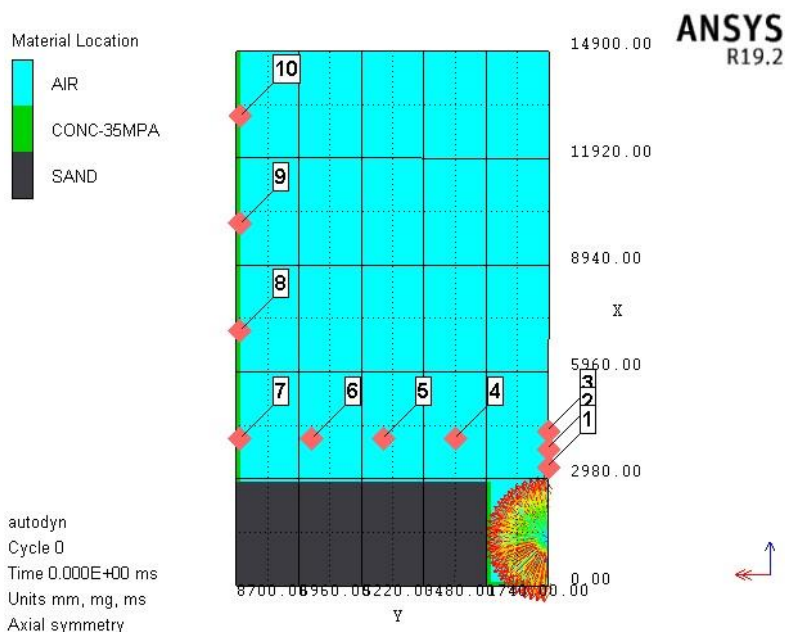


Figura 4.38 – Discretização no Autodyn para explosão do tanque em abrigo enterrado.

Os resultados numéricos e analíticos dos pontos onde estão inseridos os sensores 1, 2 e 3 estão apresentados nas Figuras 4.39 e 4.40. Toy e Sevim (2017) citam que o modelo de Mills não é compatível com distância em escala (Z) muito pequena, com isso, esse modelo foi retirado dos resultados da Figura 4.40, uma vez que, para este problema, esse método apresentou valores superestimados. De modo geral, nota-se que os resultados convergem para os pontos mais afastados da explosão, além disso, fica evidente que a malha mais refinada apresenta resultados mais acurados em relação aos métodos semi-empíricos.

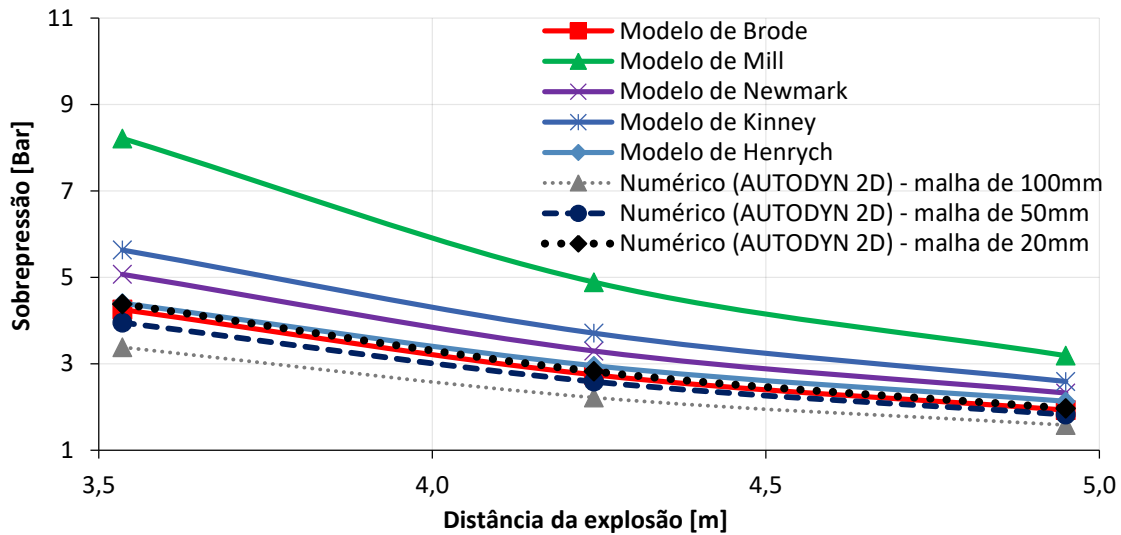


Figura 4.39 – Picos de sobrepressões nos sensores 1, 2 e 3 para a explosão do tanque sobre o solo.

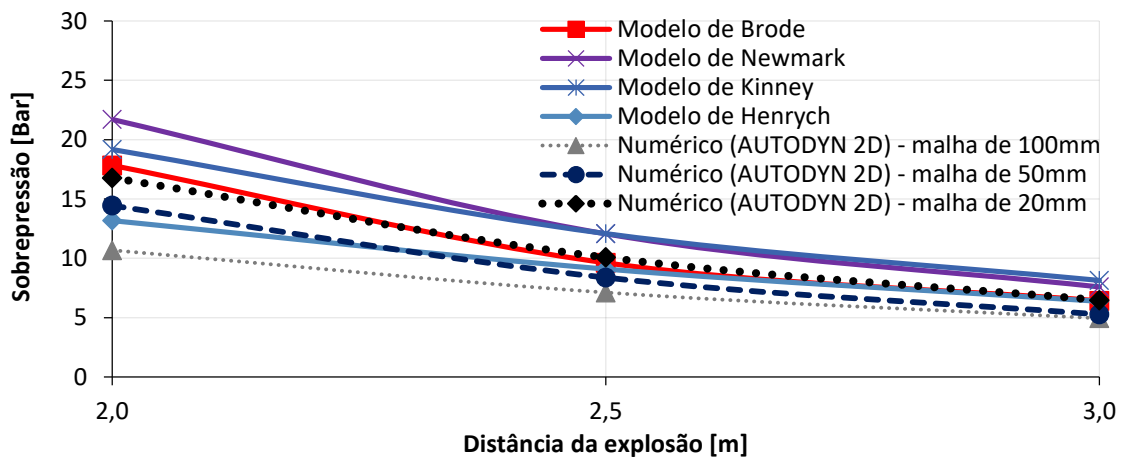


Figura 4.40 – Picos de sobrepressões nos sensores 1, 2 e 3 para a explosão do tanque em abrigo enterrado.

Alguns *frames* de propagação das ondas de choques para ambos os modelos simulados estão apresentados nas Figuras 4.41 e 4.42. Com base nessas imagens, verifica-se que a onda de choque da explosão do tanque em abrigo enterrado chega à estrutura com atraso em relação à explosão sobre o solo. Na Figura 4.43 está demonstrado o comportamento das pressões nos sensores virtuais (*gauges*) 4 a 10 ao longo do tempo. No sensor 4 do modelo com tanque enterrado, nota-se um segundo pico de sobrepressão superior ao primeiro, esse comportamento é consequência das reflexões da onda de choque.

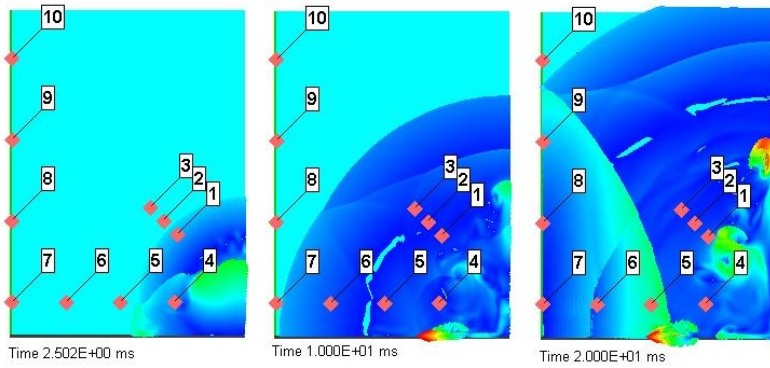


Figura 4.41 – Propagação da onda de choque da explosão do tanque sobre o solo.

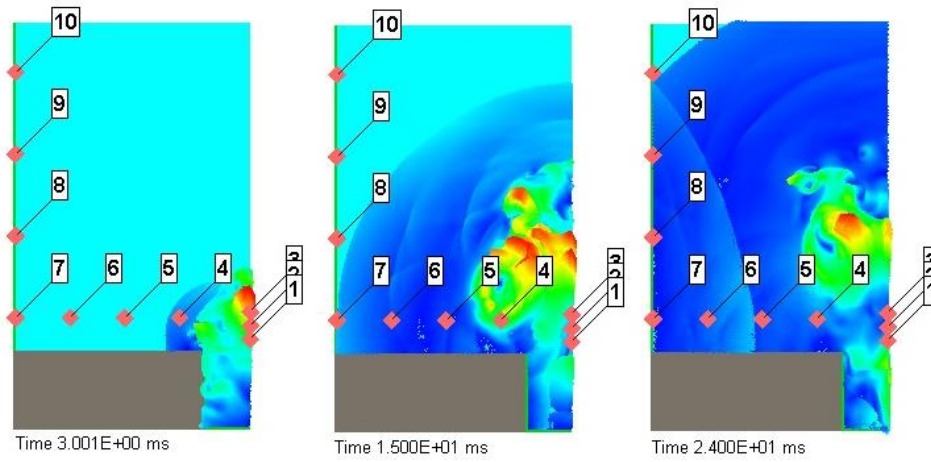


Figura 4.42 – Propagação da onda de choque da explosão do tanque em abrigo enterrado.

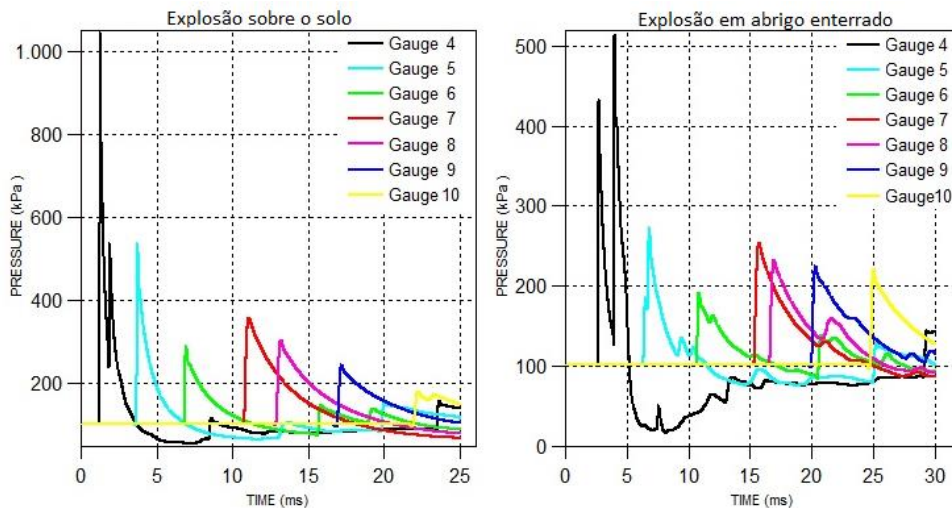


Figura 4.43 – Pressões em cada sensor para os casos de explosões de tanques sobre o solo e em abrigo enterrado.

Um comparativo entre os picos de sobrepressão nas duas situações analisadas está apresentado na Figura 4.44. Ficou evidente que acomodar o tanque de gás em um abrigo enterrado proporciona redução dos níveis de sobrepressão em quase todos os

pontos de medição. Porém, pode ser observado que no sensor 10 (alto da fachada) a onda de choque da explosão em abrigo enterrado teve um pico de sobrepressão 51,08 % superior ao da explosão superficial. Nesse caso, a onda de choque foi contida pelas paredes do fosso e, conseqüentemente, a energia foi redirecionada para cima atingindo o ponto mais alto da edificação com maior intensidade.

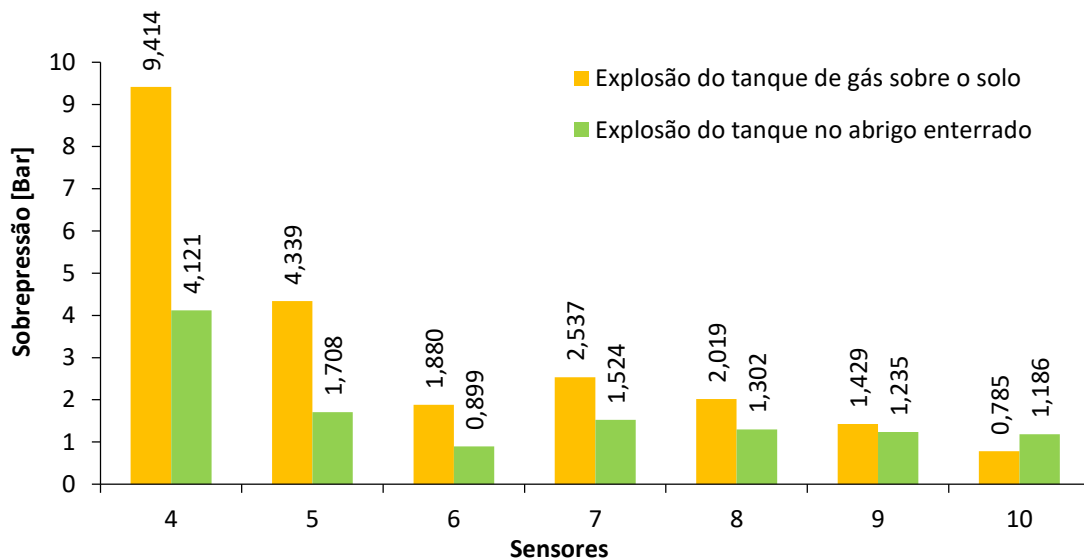


Figura 4.44 – Sobrepressões máximas nos sensores 4 a 10 para as explosões dos tanques de 8 m³ sobre o solo e em abrigo enterrado (malha de 20 mm).

4.4. SEGUNDO GRUPO DE SIMULAÇÕES: ANÁLISE DE BARREIRAS FÍSICAS DE PROTEÇÃO CONTRA OS EFEITOS DAS EXPLOSÕES DE TANQUES DE GÁS

As simulações deste grupo consistiram em analisar a eficiência de barreiras de proteção contra os efeitos das explosões de tanques de gás no que tange a mitigação dos níveis de sobrepressão. Primeiro, uma análise combinada de muro de concreto com tanque enterrado foi realizada e posteriormente a integridade dos muros foi verificada. Ademais, foram feitas algumas análises sobre o posicionamento e geometria de barreiras físicas de proteção, por exemplo, muros, aterro, valas e solo rugoso.

Em todas as simulações deste grupo, foram utilizados os seguintes materiais: ar, TNT, concreto 35 MPa e areia. Todos esses materiais estão previamente cadastrados na biblioteca do Autodyn e suas propriedades estão apresentadas nas Tabelas 4.21, 4.22, 4.23 e 4.24.

Tabela 4.21 – Propriedades do ar

Massa específica	0,001225 g/cm ³
Equação de Estado	Gás ideal
Razão de calores específicos (γ)	1,4
Temperatura de referência	288,2 K
Calor específico	717,599976 J/kg·K
Pressão ambiente (P_0)	101,3 kPa

Tabela 4.22 – Propriedades do TNT

Massa específica	1,63 g/cm ³
Equação de Estado	JWL
Parâmetro A	$3,7377 \cdot 10^8$ kPa
Parâmetro B	$3,7471 \cdot 10^6$ kPa
Parâmetro R_1	4,15
Parâmetro R_2	0,9
Parâmetro ω	0,35
Velocidade de detonação	$6,93 \cdot 10^3$ m/s
Energia/unidade de volume	$6,00 \cdot 10^6$ kJ/m ³

Tabela 4.23 – Propriedades do concreto 35 MPa

Massa específica	2,50 g/cm ³
Equação de Estado	Polinomial
Módulo volumétrico A_1	$35,27 \cdot 10^6$ kPa
Parâmetro A_2	$39,58 \cdot 10^6$ kPa
Parâmetro A_3	$9,04 \cdot 10^6$ kPa
Parâmetro B_0	1,22
Parâmetro B_1	1,22
Parâmetro T_1	$35,27 \cdot 10^6$ kPa
Parâmetro T_2	0 kPa
Temperatura de referência	288,2 K

Tabela 4.24 – Propriedades da areia (*sand*)

Massa específica de referência:		2,641 g/cm ³	
Equação de Estado:		Compaction Linear	
Massa específica x pressão		Massa específica x velocidade do som	
Massa específica [g/cm ³]	Pressão [kPa]	Massa específica [g/cm ³]	Velocidade do som [m/s]
1,6740	0,0	1,6740	265,20
1,7395	4577,0	1,7456	852,10
1,8738	14980,0	2,0863	1721,70
1,9970	29151,0	2,1468	1875,50
2,1438	59175,0	2,3000	2264,80
2,2500	98098,0	2,5720	2956,10
2,3800	179443,0	2,5980	3112,20
2,4850	289443,0	2,6350	4600,00
2,5850	450198,0	2,6410	4634,00
2,6713	650660,0	2,8000	4634,00

4.4.1. Análise da eficiência de muros de concreto em cenários com tanques sobre o solo e enterrados

Nesta seção, as simulações foram destinadas ao estudo da eficiência de muros de concreto usados como medida mitigatória contra os efeitos de uma explosão acidental de tanques de gás. Para isso, adotou-se o ambiente 2 do primeiro grupo de simulações, esse ambiente está apresentado em corte na Figura 4.45, onde os sensores internos A, B, C e D foram mantidos nas mesmas posições. Os sensores externos 1, 2 e 3 estão afastados do centro da explosão, conforme Tabela 4.25. Esses três sensores estão fixados em pontos onde não houve efeito da reflexão antes da incidência direta da onda de choque, dessa forma, seus resultados puderam ser comparados com as equações semi-empíricas apresentadas no capítulo 3.

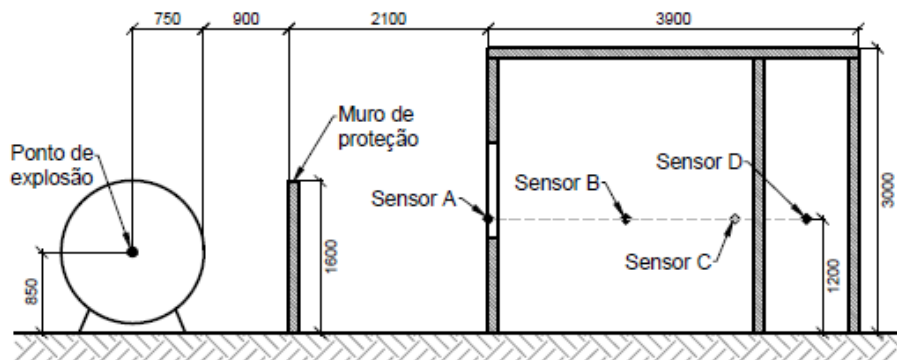


Figura 4.45 – Esquema em corte do ambiente de análise do muro de proteção.

Tabela 4.25 – Distâncias dos sensores 1, 2 e 3 ao ponto da explosão.

Sensor	1	2	3
Distância [mm] (tanque sobre o solo)	1565,4	1888,5	2211,7
Distância [mm] (tanque enterrado)	1507,5	2010,0	2512,5

O reservatório de gás analisado possui volume igual a 4950 L e suas características estão apresentadas na Tabela 4.26. Com base nessas características do tanque e nas propriedades do gás propano (Tabela 4.27), a energia mecânica e massa equivalentes de TNT foram estimadas, conforme apresentado na Tabela 4.28. De modo semelhante às simulações anteriores, o ponto de explosão foi considerado no centro do tanque de gás, com isso, o afastamento mínimo foi acrescido com a metade do diâmetro do reservatório.

Tabela 4.26 – Características do tanque de gás com 4,95 m³.

Volume	4,95 m ³
Diâmetro	1500 mm
Comprimento	3140 mm
Pressão de projeto	2,0 MPa

Tabela 4.27 – Propriedades propano (ÇENGEL; BOLES, 2014) - adaptado.

Temperatura de referência (T)	15° C (288,2 K)
Calor específico a volume constante (C _v)	1,4909 kJ/kg·K
Razão de calores específicos (γ)	1,126
Constante do gás (R)	0,1885 kJ/kg·K
Temperatura no ponto crítico (T _c)	370 K
Pressão no ponto crítico (P _c)	4,26 MPa
Covolume (b) – obtido pela Eq. 3.16: $b = RT_c/8P_c$	0,00205 m ³ /kg

Tabela 4.28 – Energia mecânica e massa equivalente de TNT para o tanque de 4950 L.

Energia mecânica armazenada (E _m) Eq. 3.31: $E_m = \left(\frac{P_g - P_0}{RT + b(P_g - P_0)} \right) V_g C_v T$	69,35 MJ
Massa equivalente de TNT (W _{TNT}) Eq. 3.22: $W_{TNT} = \frac{E_m}{H_{TNT}}$	12,432 kg
Notas: 1) energia específica do TNT (H _{TNT}) é igual a 4184 J/g. 2) perda de energia igual a 25%.	

Para o volume adotado, a NBR 13523, ABNT (2019) preconiza um afastamento de 3 m entre o tanque de gás e a edificação. O muro foi colocado em uma posição de forma a haver um afastamento razoável para manutenções e operação do tanque de gás e também para haver a possibilidade de construção do fosso para abrigar o reservatório. As dimensões do muro foram concebidas de forma a cobrir o tanque de gás, tanto na vertical quanto na horizontal, para isso, o comprimento é igual a 4000 mm e a altura igual a 1600 mm.

As modelagens dos ambientes foram feitas de forma tridimensional, onde os materiais sólidos foram considerados como rígidos. Os cenários foram analisados com o reservatório de gás sobre o solo e enterrado, ambos com e sem muro de proteção, totalizando quatro modelos. Esses modelos discretizados no Autodyn estão apresentados na Figura 4.46. O abrigo enterrado foi construído de forma que o tanque ficasse afastado a uma distância de 500 mm das laterais do fosso, inclusive da parte superior, caso haja. Nos modelos enterrados, a tampa do fosso foi desprezada a fim de representar uma situação mais crítica.

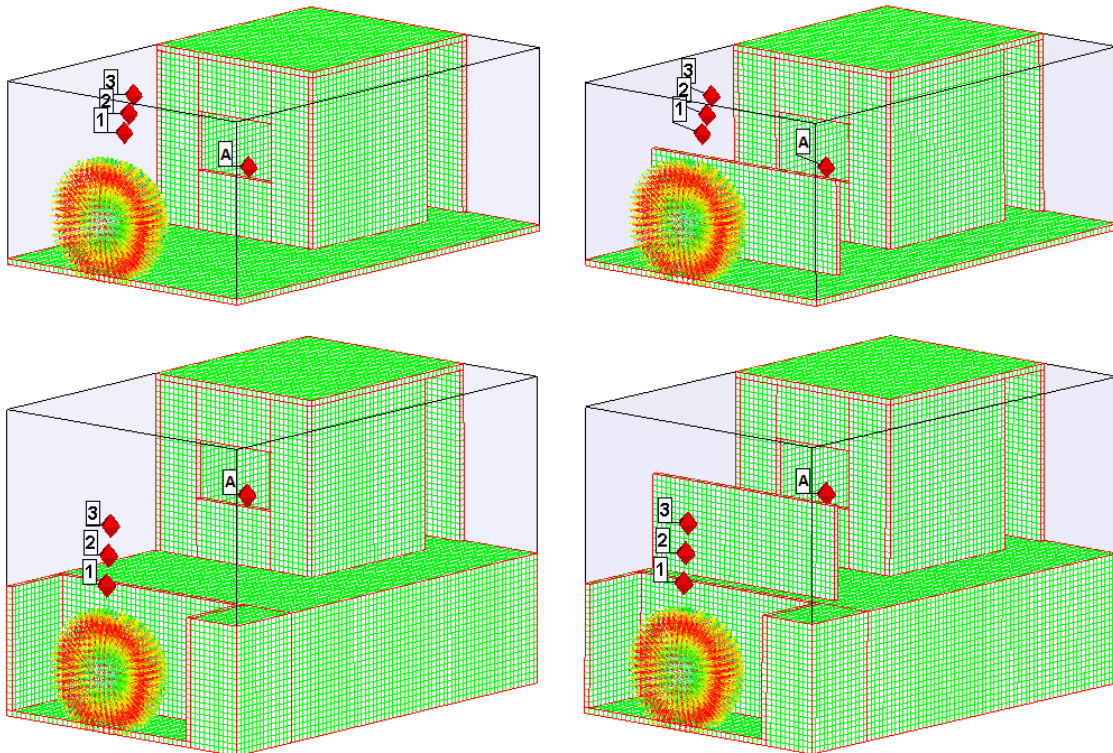


Figura 4.46 – Cenários discretizados no Autodyn.

Nestas análises, a pequena redução do volume de ar em razão da inserção do muro não causou alterações significativas nas pressões, com isso, os resultados aferidos

nos sensores 1, 2 e 3 (Figuras 4.47 e 4.48) são os mesmos para os cenários com e sem muro de proteção. Esses resultados mostram que, ao se comparar os métodos semi-empíricos e as simulações, houve uma convergência nos picos de sobrepressão para pontos mais distantes da região de detonação, desta forma, há um indicativo quanto à coerência das simulações numéricas com o esperado numa situação real.

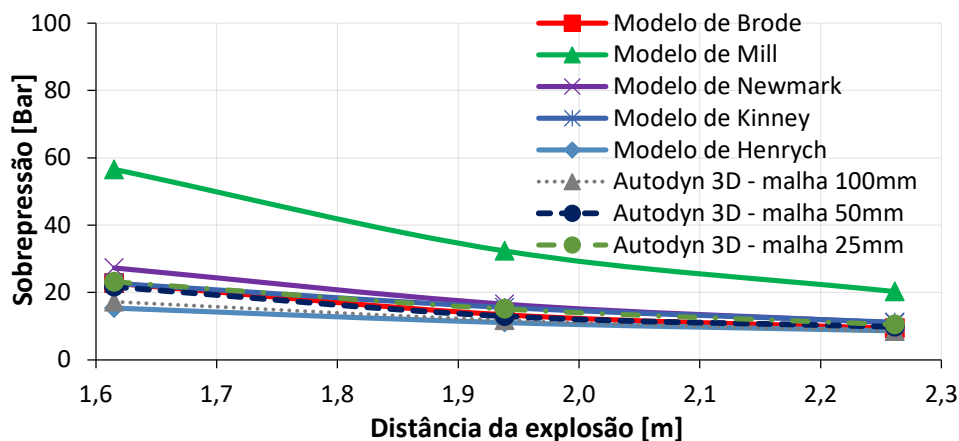


Figura 4.47 – Picos de sobrepressões nos sensores 1, 2 e 3 para o cenário com tanque sobre o solo.

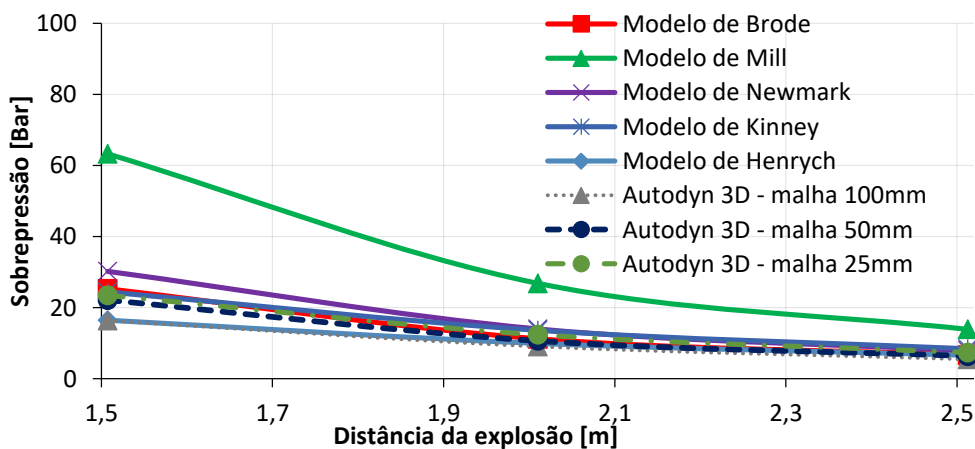


Figura 4.48 – Picos de sobrepressões nos sensores 1, 2 e 3 para o cenário com tanque em abrigo enterrado.

Na Figura 4.49 estão apresentados os resultados nos pontos internos dos quatro cenários simulados com malha de 25 mm, a qual proporciona melhor acurácia nos resultados. Com base nos dados dessa figura é possível verificar que o muro de concreto é eficiente tanto quanto o fosso sem tampa, em alguns casos, podendo ser até mais eficiente como, por exemplo, no que fora observado nos sensores A, B e C. Além disso, verifica-se que a combinação dessas duas medidas – enterrar o tanque e usar muro de proteção – é extremamente eficiente para proteger as edificações. Nesse caso, em

relação ao cenário sem proteção, essa combinação foi capaz de reduzir os picos de sobrepressão em 92,5%, 83,7%, 83,3% e 64,2%, respectivamente, nos sensores A, B, C e D.

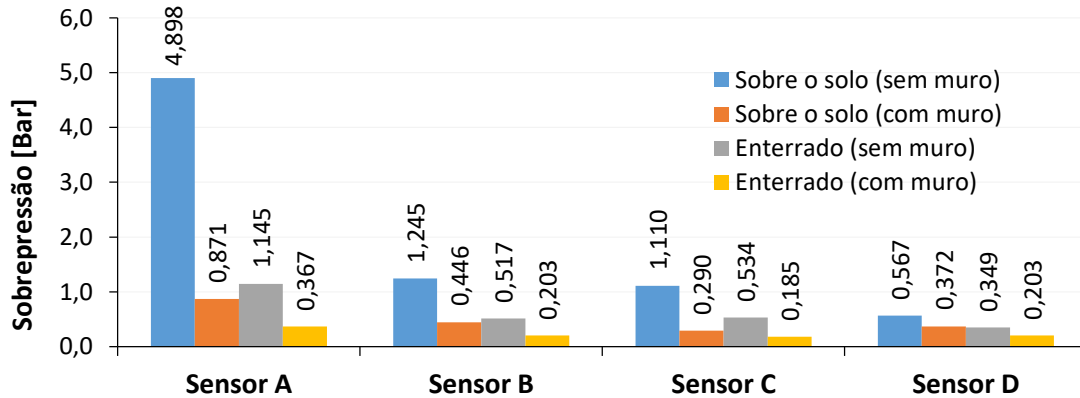


Figura 4.49 – Sobrepressões máximas nos pontos internos de cada cenário.

4.4.2. Análise da integridade dos muros de proteção.

Uma onda de choque pode ter um alto poder de destruição no entorno da explosão, com isso, é essencial que os muros de proteção tenham resistência suficiente para absorver e redirecionar parte da energia da explosão, dessa forma, os efeitos danosos nas edificações sob proteção podem ser mitigados. Nesta seção, as simulações consistiram na verificação da integridade de muros de concretos com várias geometrias e distâncias de afastamento. As análises foram feitas de forma bidimensional e sob o critério de nível de dano, para isso, foi adotado o mesmo cenário simulado na seção anterior com tanque de gás sobre o solo e com muro de proteção.

A distância de afastamento (R) do muro ao ponto de explosão iniciou-se com 1650 mm, em seguida, essa medida passou para 2000, 2500 e 3000 mm. As seções transversais dos muros foram definidas em formato retangular e trapezoidal. Os muros retangulares foram denominados de MR e os trapezoidais de MT. O detalhamento desses anteparos está apresentado na Tabela 4.29. Nos muros MR, a espessura inicial de 120 mm é um critério preconizado pela norma coreana KOSHA (2018). A base de todos os muros foi considerada como engaste.

Nas análises da seção anterior, os picos de sobrepressão no sensor A (janela) para as situações de tanque sobre o solo ocorreram num instante inferior a 5 ms, com isso, o desempenho de todos os muros foi verificado nesse tempo, pois, corresponde à passagem completa da fase positiva da onda de choque nessas barreiras. Os muros

foram discretizados com malha de 10 mm e o material empregado foi concreto de 35 MPa. A armadura de aço ou qualquer outro item que melhore o desempenho do concreto, por exemplo, fibras, não foram considerados nas simulações.

Tabela 4.29 – Detalhamento dos muros retangulares e trapezoidais.

Seção transversal	Nomenclatura	dimensões da seção transversal [mm]		
		borda superior	base	altura
Retangular	MR1	120	120	1600
	MR2	200	200	1600
	MR3	250	250	1600
Trapezoidal	MT1	100	300	1600
	MT2	100	400	1600
	MT3	100	500	1600

Os danos em cada modelo analisado estão apresentados nas Figuras 4.50 e 4.51. A escala de cores que representa o nível de dano varia do azul escuro ao vermelho. O azul escuro indica que o material está íntegro e o vermelho indica falha completa. Vale ressaltar que a falha do material não necessariamente indica que a edificação não fica protegida, os muros com menor espessura podem ser usados com elemento de sacrifício em caso de explosão acidental.

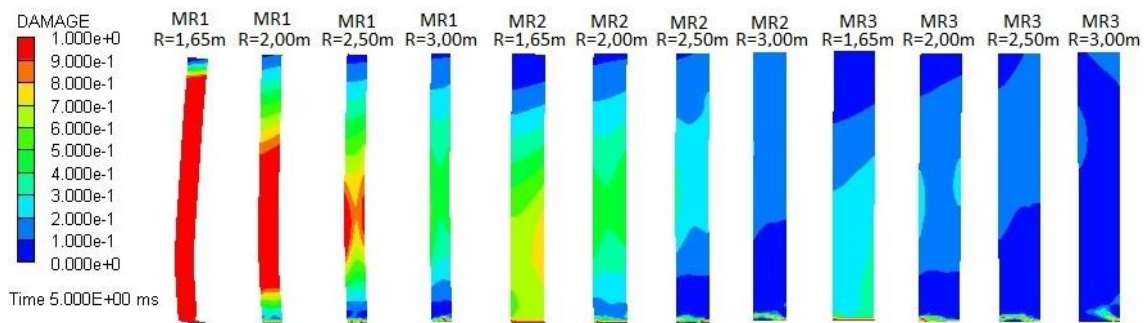


Figura 4.50– Integridade dos muros MR.

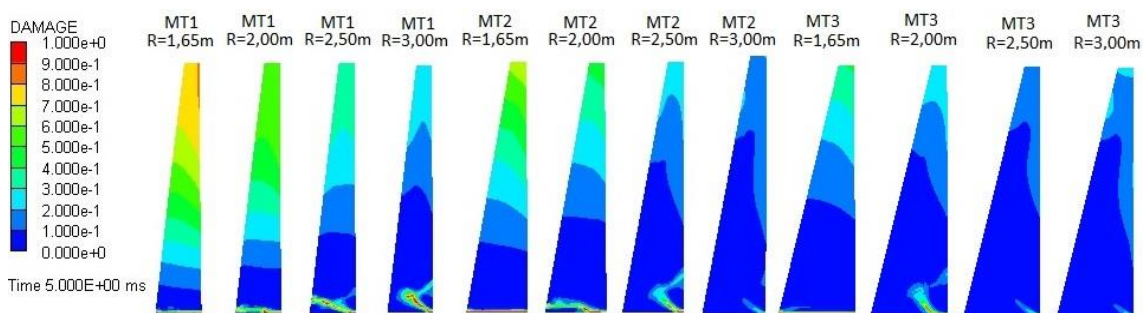


Figura 4.51 – Integridade dos muros MT.

4.4.3. Análise de posicionamento e geometria dos muros de proteção quanto à eficiência em mitigar as sobrepressões nas edificações

Sobre o critério de eficiência em reduzir os níveis de sobrepressão numa edificação, as simulações desta seção foram destinadas à verificação de posicionamento e geometria das barreiras físicas de proteção. Nessas simulações, optou-se pelo modelo bidimensional no Autodyn para reduzir o custo computacional, exceto a análise de validade do modelo 2D.

O cenário proposto (Figura 4.52) para as análises foi adotado de forma a comportar um tanque de gás com volume igual a $8,15 \text{ m}^3$, cujas características estão dispostas na Tabela 4.30. A NBR 13523 (ABNT, 2019) preconiza que, para um volume de até 8 m^3 , o afastamento do tanque à edificação deve ser de 7,5 m, no entanto, devido o tanque escolhido ter volume próximo de 8 m^3 , foi adotado esse mesmo afastamento.

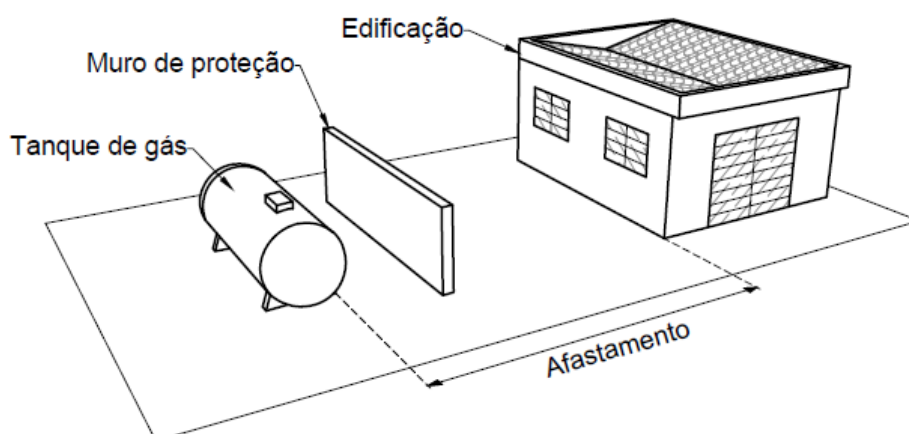


Figura 4.52 – Esquema ilustrativo do ambiente de análise.

Tabela 4.30 – Características do tanque de gás com $8,15 \text{ m}^3$.

Volume	$8,15 \text{ m}^3$
Diâmetro	2200 mm
Comprimento	2580 mm
Pressão de projeto	2,0 MPa

De modo semelhante às análises das seções anteriores, adotou-se aqui as propriedades do propano (Tabela 4.31) para o cálculo da energia mecânica no tanque de gás, bem como a massa equivalente de TNT. Os resultados desses dois parâmetros estão apresentados na Tabela 4.32. A massa equivalente foi considerada como esférica, modela inicialmente em cunha e posteriormente inserida (*remap*) nos modelos 2D e 3D.

Tabela 4.31 – Propriedades propano (ÇENGEL; BOLES, 2014) - adaptado.

Temperatura de referência (T)	15° C (288,2 K)
Calor específico a volume constante (C_v)	1,4909 kJ/kg·K
Razão de calores específicos (γ)	1,126
Constante do gás (R)	0,1885 kJ/kg·K
Temperatura no ponto crítico (T_c)	370 K
Pressão no ponto crítico (P_c)	4,26 MPa
Covolume (b) – obtido pela Eq. 3.16: $b = RT_c/8P_c$	0,00205 m ³ /kg

Tabela 4.32 – Energia mecânica e massa equivalente de TNT para o tanque de 8,15 m³.

<p>Energia mecânica armazenada (E_m)</p> <p>Eq. 3.31: $E_m = \left(\frac{P_g - P_0}{RT + b(P_g - P_0)} \right) V_g C_v T$</p>	114,185 MJ
<p>Massa equivalente de TNT (W_{TNT})</p> <p>Eq. 3.22: $W_{TNT} = \frac{E_m}{H_{TNT}}$</p>	20,468 kg
<p>Notas: 1) energia específica do TNT (H_{TNT}) é igual a 4184 J/g. 2) perda de energia igual a 25%.</p>	

As barreiras físicas propostas foram muros de concreto, muro gabião e aterro. A altura desses obstáculos é igual a 2300 mm, essa medida refere-se à altura total da face superior do tanque de gás, conforme esquematizado na Figura 4.53. O muro de concreto com geometria retangular, por ser mais simples, foi colocado a uma distância D do ponto da explosão e com espessura igual a 200 mm. Essa espessura também foi usada por Song, Jung e Kim (2021) no estudo de muro de concreto para proteção contra explosões de tanques em centrais de gás.

Para verificar a eficiência das barreiras físicas de proteção, foram colocados três sensores na fachada da edificação ao longo da altura. Esses sensores foram numerados de 1 a 3 de baixo a para cima. Adicionalmente, a fim de fazer um comparativo entre os resultados numéricos e analíticos, os sensores 4, 5 e 6 foram inseridos nos modelos nas distâncias de 3130,5, 3913,1 e 4695,7 mm do ponto da explosão, respectivamente.

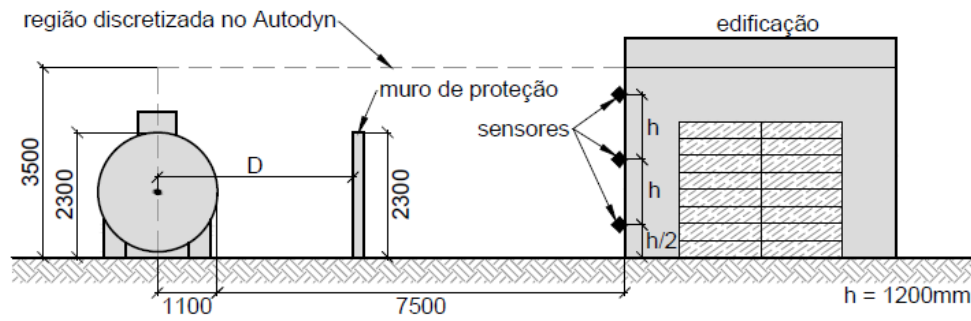


Figura 4.53 – Ambiente 2D de análise.

Antes das análises propriamente ditas para verificação de posicionamento e geometria das barreiras de proteção no que tange a mitigação das sobrepessões, uma análise da validade dos modelos 2D foi realizada, pois, esses modelos possuem limitações que precisam ser ponderadas, por exemplo, seus resultados não podem depender totalmente de quantidades ou efeitos relacionados à terceira dimensão espacial. No caso de muros de proteção com comprimento reduzido, a onda de choque pode contornar pelas laterais, conseqüentemente, pelo efeito da difração e múltiplas reflexões, os picos de pressão atrás no muro podem ser amplificados. Sobre este quesito, destaca-se aqui o estudo feito por Xiao, Andrae e Gebbeken (2019), os quais simularam a propagação da onda de choque num modelo 3D, onde o comprimento do muro foi verificado de 1 a 10 m e chegaram a conclusão que, para o cenário analisado, a partir de 7 m, as pressões máximas atrás do muro não são influenciadas pelas frentes de ondas provenientes das laterais.

Nesta seção, em razão das diversas análises bidimensionais, uma análise de convergência das sobrepessões foi realizada em função do comprimento do muro. Esse comprimento também foi analisado de 1 a 10 m com incremento de 1 m. Para isso, foi proposto um modelo 3D discretizado com malha de 100 mm, onde, para eixo x e y, o domínio do ar possui as mesmas dimensões expostas na Figura 4.53 e, para o eixo z, foi adotada uma medida igual a 12000 mm. Essa largura do eixo z foi concebida de forma a abranger o muro com 10 m de comprimento e ainda haver espaço nas laterais para propagação da onda de choque.

Os picos de sobrepessão nos sensores 1, 2 e 3 em função do comprimento (L) do muro estão apresentados na Figura 4.54. Esses resultados mostram que o comprimento da barreira física de proteção influencia diretamente nas pressões da região protegida, além disso, verifica-se que os valores de sobrepessão convergem à medida em que a variável L aumenta. Essa convergência ficou próxima dos 7 m, mesmo

valor encontrado por Xiao, Andrae e Gebbeken (2019). Com isso, nota-se que as simulações 2D deste item só são válidas se o comprimento do muro foi igual ou superior a 7 m.

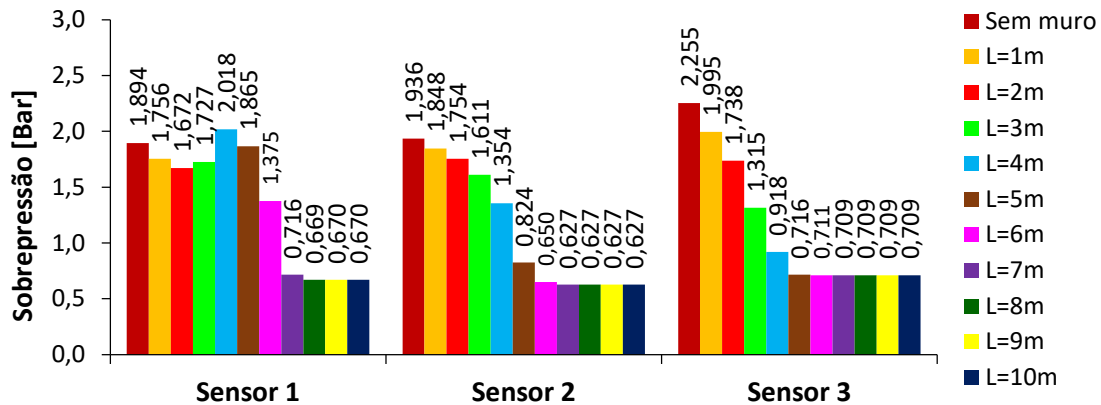


Figura 4.54 – Sobrepressão na edificação em função do comprimento (L) do muro.

Para verificação do posicionamento mais eficiente do muro de proteção, a distância D foi variada em três medidas identificadas como P1, P2 e P3, conforme Tabela 4.33. Essas medidas foram adotadas de forma a haver um espaço razoável de circulação entre o muro e o tanque e também entre o muro e a construção.

Tabela 4.33 – Distâncias do muro de proteção à explosão.

Posição do muro	D [mm]
P1	3600
P2	4850
P3	6100

A modelagem 2D foi discretizada com malha de 25 mm e em escala real de forma a abranger o tanque de gás, muro e fachada da edificação. As partes sólidas foram consideradas como rígidas, uma vez que o objetivo principal é analisar as sobrepressões da onda de choque em razão de suas múltiplas reflexões. O modelo de análise e a discretização no Autodyn estão apresentados na Figura 4.55.

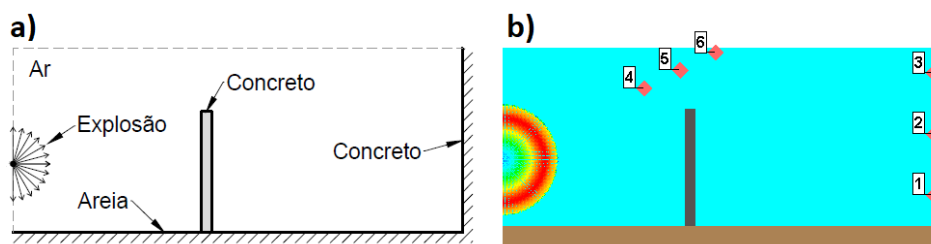


Figura 4.55 – a) modelo de análise. b) modelo discretizado no Autodyn.

Os picos de sobrepressão de todos os pontos de aferição do modelo estão apresentados nas Figuras 4.56 e 4.57. Os resultados numéricos dos sensores 4, 5 e 6 foram usados para comparar com os valores obtidos por meio das equações semi-empíricas. Nessa comparação, é possível verificar uma boa aproximação e convergência entre os valores obtidos por todos os métodos (analíticos e numéricos). Os resultados dos sensores 1, 2 e 3 (fachada da edificação) mostraram a eficiência do muro alocado nas três posições propostas (P1, P2 e P3). Com base nesses resultados, nota-se que a posição P1 é mais eficaz, cujas reduções dos picos de sobrepressão em relação ao cenário sem parede de proteção foram iguais a 71,5%, 67,6% e 72,1%, respectivamente para os sensores 1, 2 e 3. A melhor eficiência desse posicionamento pode estar relacionada à redução da área de incidência direta da onda de choque sobre a fachada.

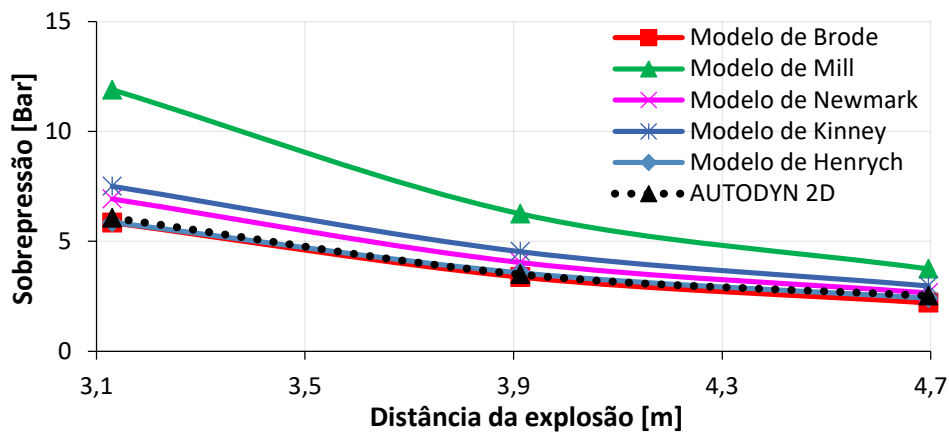


Figura 4.56 – Sobrepressão nos sensores 4, 5 e 6.

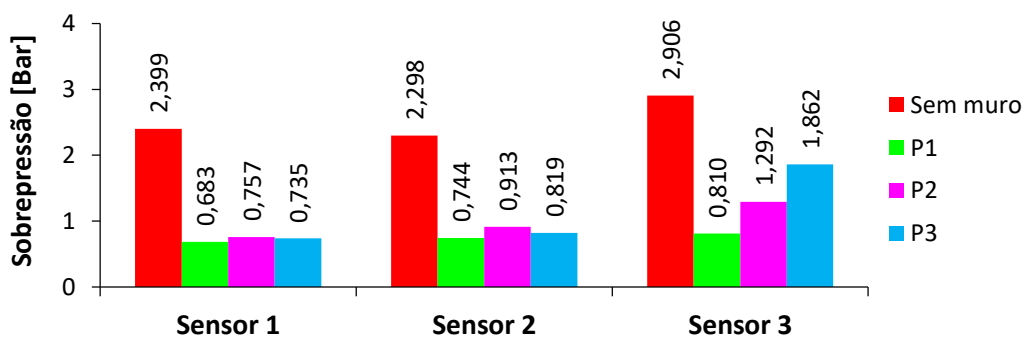


Figura 4.57 – Sobrepressão nos sensores 1, 2 e 3 para as situações sem muro e com muro nas posições P1, P2 e P3.

A geometria da seção transversal das barreiras físicas pode influenciar na distribuição de pressões no ambiente posterior a essas barreiras. Nesse sentido, após definida a posição mais eficiente, foi realizada a análise de algumas geometrias de muro, as quais estão apresentadas na Figura 4.58 e detalhadas na Tabela 4.34. Essas

geometrias propostas são adequadas em projetos de engenharia e foram modeladas em escala real. A incidência da onda de choque nessas barreiras ocorreu da esquerda para a direita no mesmo cenário onde se verificou o posicionamento mais eficiente.

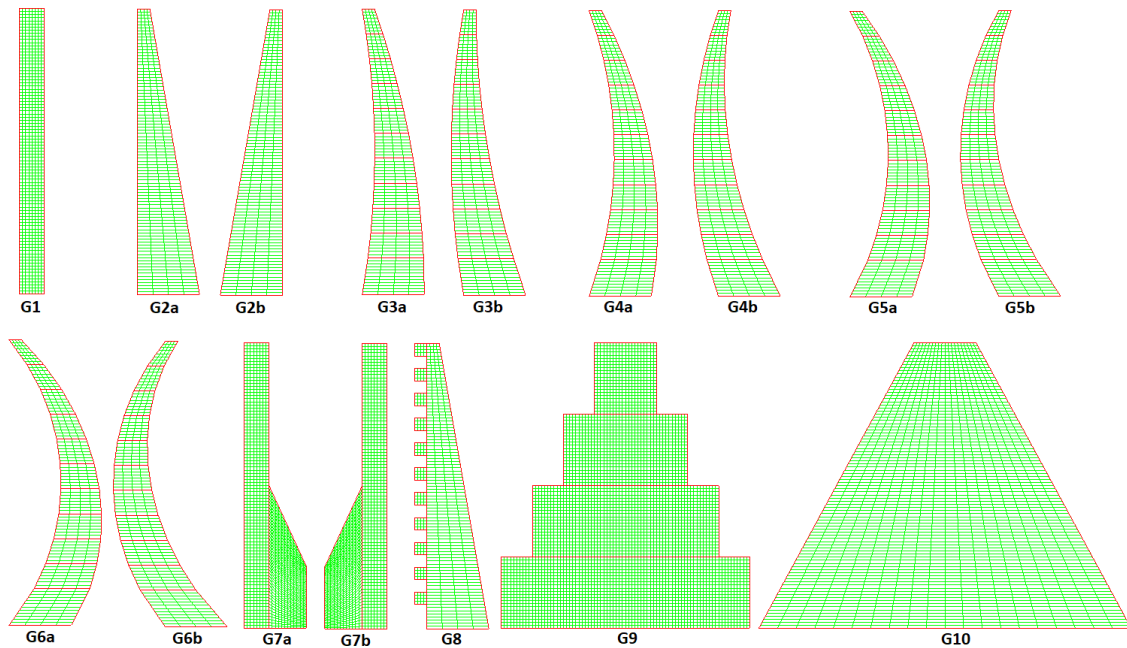


Figura 4.58 – Geometria da seção transversal das barreiras físicas de proteção.

Tabela 4.34 – Detalhamento das seções transversais das barreiras físicas.

Geometria	Superfície ¹	Curvatura ²	Largura [mm]		Material
			Topo	Base	
G1	Plana	-	200	200	concreto
G2a	Plana	-	100	500	concreto
G2b	Inclinada	-	100	500	concreto
G3a	Côncava	20°	100	500	concreto
G3b	Convexa	20°	100	500	concreto
G4a	Côncava	40°	100	500	concreto
G4b	Convexa	40°	100	500	concreto
G5a	Côncava	60°	100	500	concreto
G5b	Convexa	60°	100	500	concreto
G6a	Côncava	80°	100	500	concreto
G6b	Convexa	80°	100	500	concreto
G7a	Plana	-	200	500	concreto
G7b	Irregular	-	200	500	concreto
G8	Rugosa	-	100	500	concreto
G9	Degraus	-	500	2000	concreto
G10	Inclinada	-	500	3000	Areia

¹ Tipo de superfície em frente à explosão.

² Curvatura da superfície em frente à explosão.

A geometria G1 refere-se à seção retangular e é a mesma usada na verificação de posicionamento. No caso dos muros trapezoidais (G2a e G2b), foi adotada uma das espessuras analisada nas simulações da seção 4.4.2, onde a base inferior é igual a 500 mm e topo igual 100 mm, a seção transversal com essas medidas mostrou ser bastante resistente nas verificações de integridade.

Taha et al. (2019) e Attia, Elwan e Kotb (2021) conduziram pesquisas numéricas sobre geometrias côncavas e convexas e concluíram que a superfície côncava com curvatura de 60° foi mais eficiente para reduzir as pressões atrás do muro. Vale ressaltar que as conclusões desses pesquisadores são válidas para os cenários estudados por eles. No caso de geometria convexa, Taha et al. (2019) explica que a onda incidente se afasta do muro na direção superior e inferior, com isso, a frente de onda que foi direcionada para cima contorna mais facilmente a parte superior do muro e, conseqüentemente, eleva os níveis de pressão nos pontos de medição. Nesta seção, as geometrias côncavas e convexas também foram investigadas com curvaturas iguais a 20°, 40°, 60° e 80°. Essas curvaturas referem-se à face voltada para explosão e a espessura da seção transversal foi a mesma dos muros trapezoidais.

A geometria G7 é a combinação do muro retangular com um reforço adicional na parte inferior onde se tem grandes concentrações de tensões quando há incidência da onda de choque. A espessura total a base dessa geometria e a face vertical livre do reforço são iguais a 500 mm e a superfície inclinada possui um ângulo de 25° em relação à vertical.

Uma rugosidade composta por pequenos quadrados de lados iguais a 100 mm foi inserida no muro trapezoidal resultando na geometria G8. Essa rugosidade está na face vertical em frente ao ponto de explosão.

No aspecto de proteção das estruturas contra os efeitos das explosões, muros de gabião foram estudados por Xiao, Andrae e Gebbeken (2019). Esses pesquisadores relataram que a influência da porosidade na distribuição da energia da explosão é difícil de especificar, com isso, é conveniente usar superfícies planas e rígidas numa simulação numérica quando o interesse primário é apenas o estudo da onda de choque. Nesse sentido, a geometria G9 foi modelada de forma a representar um muro gabião com base, topo e altura dos degraus iguais a 2000, 500 e 575 mm, respectivamente. O material adotado foi concreto 35 MPa por ser semelhante às rochas no que tange a reflexão das ondas de choque.

O modelo G10 foi proposto de tal forma a representar um aterro e, para isso, o material empregado foi areia. Dentre os materiais constantes na biblioteca do Autodyn, a areia é o mais adequado para representar o solo. A seção transversal do aterro possui base igual a 3000 mm e o topo igual a 500 mm.

Os resultados de sobrepressão em razão de cada tipo de barreira analisado na posição mais eficiente (P1) estão apresentados na Figura 4.59. As verificações desses anteparos foram feitas sob o critério da eficiência em mitigar as sobrepressões na edificação. Os resultados mostram que todas as geometrias analisadas são capazes de cumprir com a finalidade proposta de forma bastante eficiente. Conforme exposto na Tabela 4.35, nota-se que as barreiras simuladas foram capazes de reduzir os picos de sobrepressão entre 59,4% e 74,4% em relação ao ambiente sem proteção. De modo geral, verifica-se que não há grandes variações dos resultados em razão da geometria, no entanto, o muro G7a foi o mais eficiente. Para o cenário simulado, os muros curvos semelhante aos analisados por Taha et al. (2019) e Attia, Elwan e Kotb (2021) não mostraram ser opções vantajosas se comparadas ao modelos mais simples, por exemplo, a G1, G2a e G7a.

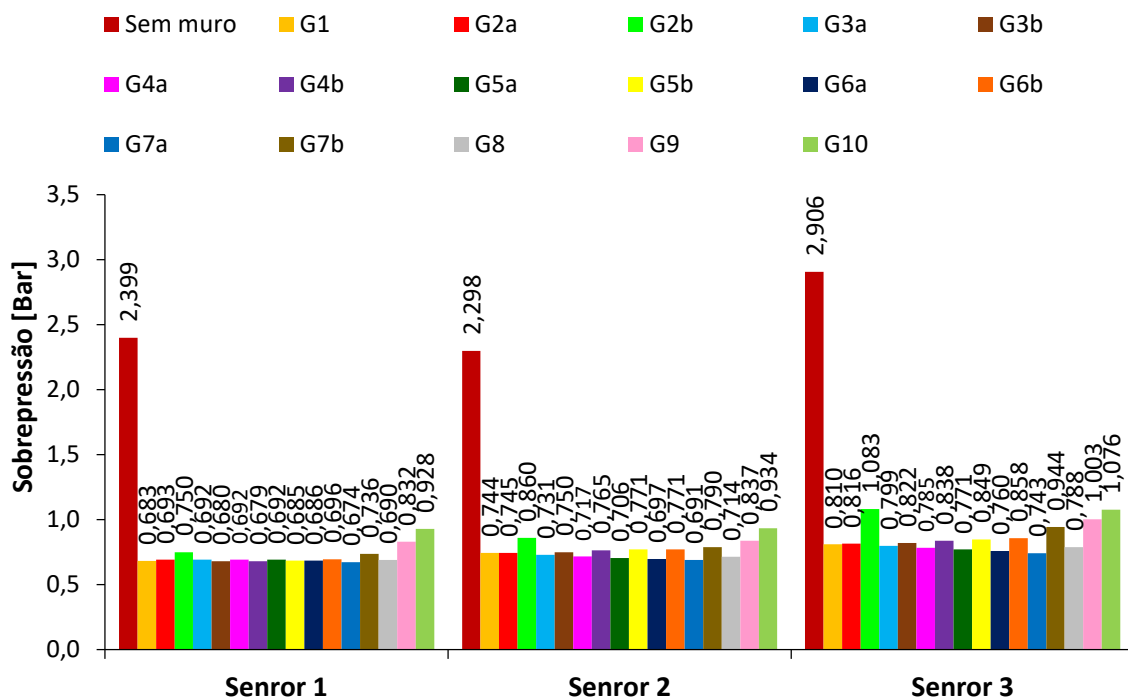


Figura 4.59 – Sobrepressão nos sensores 1, 2 e 3 para cada tipo de barreira.

Tabela 4.35 – Porcentagem de redução dos picos de sobrepressão para cada tipo de barreira em relação ao modelo sem proteção.

Sensor	G1	G2a	G2b	G3a	G3b	G4a	G4b	G5a
1	71,5%	71,1%	68,7%	71,2%	71,7%	71,1%	71,7%	71,2%
2	67,6%	67,6%	62,6%	68,2%	67,4%	68,8%	66,7%	69,3%
3	72,1%	71,9%	62,7%	72,5%	71,7%	73,0%	71,2%	73,5%
Sensor	G5b	G6a	G6b	G7a	G7b	G8	G9	G10
1	71,5%	71,4%	71,0%	71,9%	69,3%	71,2%	65,3%	61,3%
2	66,5%	69,7%	66,5%	69,9%	65,6%	68,9%	63,6%	59,4%
3	70,8%	73,9%	70,5%	74,4%	67,5%	72,9%	65,5%	63,0%

Adicionalmente às geometrias analisadas, o muro G1 foi verificado na posição P1 com diferentes bordas no topo. Essas bordas foram denominadas de B1, B2, B3, B4 e B5, conforme detalhadas na Figura 4.60. A borda B1 refere-se ao muro retangular sem qualquer modificação. As demais geometrias de bordas são variações do muro G1, onde a B2 é semicircular e as B3 e B4 são inclinadas a 45°. A B3 tem inclinação voltada para o ponto da explosão e a B4 ao contrário. Na borda B5, o vértice do triângulo formado no topo foi alocado no centro do muro. Independente do tipo de geometria considerada, a altura total dos muros foi mantida constante.

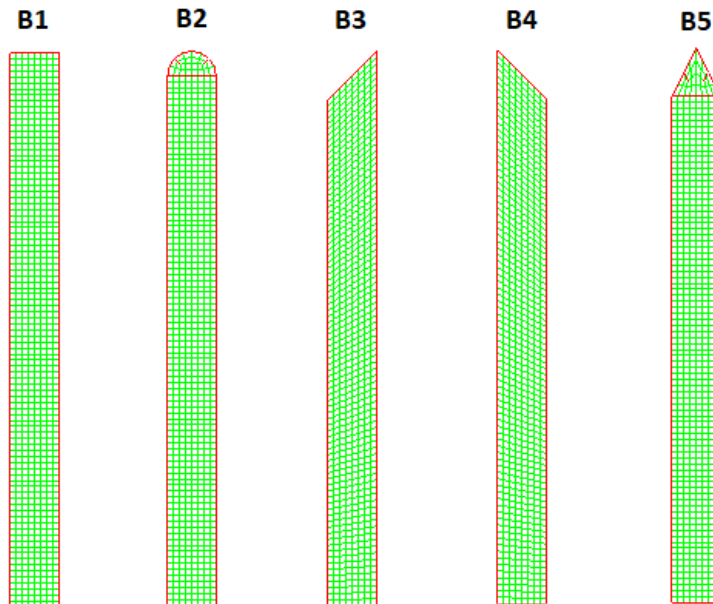


Figura 4.60 – Bordas de topo do muro de proteção G1.

Os resultados correspondentes a cada tipo de borda proposta estão apresentados na Figura 4.61. Nessa figura, pode-se notar variações entre os picos de sobrepressão

para cada tipo de geometria. De modo geral, apesar dessas variações não serem tão significantes, o modelo B1 teve melhor desempenho.

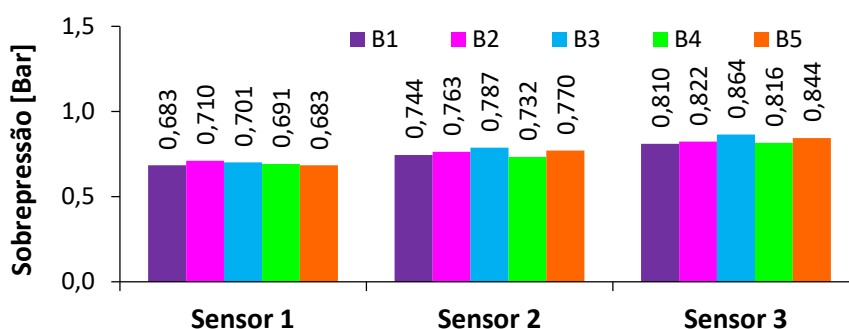


Figura 4.61 – Sobrepressão nos sensores 1, 2 e 3 (fachada) para cada tipo de borda.

No caso das bordas B1 e B4, a difração da onda de choque ocorre com maior dificuldade em relação aos demais, além disso, os vórtices gerados pelos cantos dissipam parte da energia, em consequência, as sobrepressões atrás do muro reduzem-se.

Needham (2010) compilou estudos que mostram o início de formação de reflexão Mach em superfície curva e isso pode ter ocorrido no modelo B2. Para as bordas triangulares, a onda move-se mais facilmente na borda inclinada facilitando o fenômeno da difração. Tais fenômenos podem contribuir para o aumento das pressões atrás do muro de proteção.

4.4.4. Análise de valetas e solo rugoso implementados como medidas para mitigação das sobrepressões na face frontal do muro

Na seção 4.4.2, onde se analisou a integridades de muros de proteção, ficou notório que esses aparatos são duramente afetados pela incidência da onda de choque. Nesse sentido, utilizar-se de medidas para mitigação dos efeitos da explosão no próprio muro pode ser apropriado para reduzir os danos à integridade do material. Nesse sentido, valetas no solo foram implementadas entre a de proteção e explosão visando aliviar as pressões na face frontal do muro, conforme Figura 4.62. Como critério de início das simulações, foi adotada uma valeta com 0,5 m de largura e 1,0 m de profundidade formando uma área de seção transversal igual a 0,5 m². Essa área foi mantida em todas as outras valetas analisadas as quais estão apresentadas na Figura 4.63 e detalhadas na Tabela 4.36. O afastamento da valeta ao muro foi de 750 mm, esse valor foi adotado de forma a haver espaço suficiente para implantação de fundação do muro, caso haja. Além das valetas, um solo rugoso foi verificado entre a explosão e o muro. A

rugosidade arbitrada é semelhante à estudada por Reichenbach (1985), contudo, adotou-se aqui uma medida de 100 mm para os lados dos pequenos quadrados que a compõem. Para estas simulações, os sensores 1, 2 e 3 foram inseridos ao longo da dimensão vertical da superfície frontal do muro de proteção. As alturas desses três sensores são iguais a 300, 1300 e 2300 mm, respectivamente. Estas simulações foram feitas com muro na posição P1 e geometria G1 definidas na seção anterior.

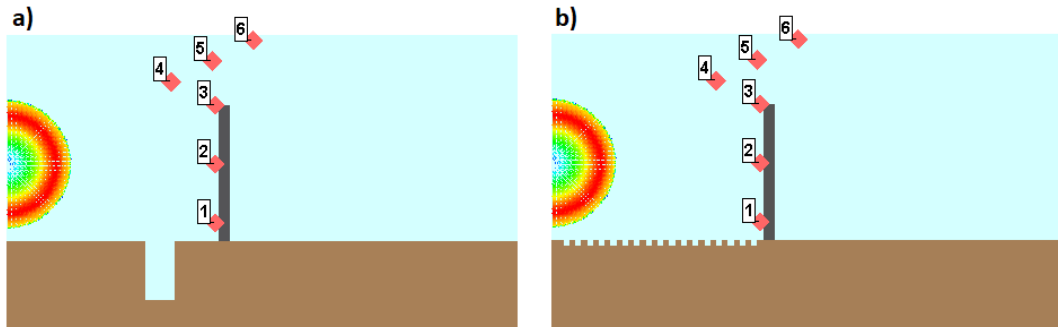


Figura 4.62 – Discretização no Autodyn. a) valeta V1. b) solo rugoso.

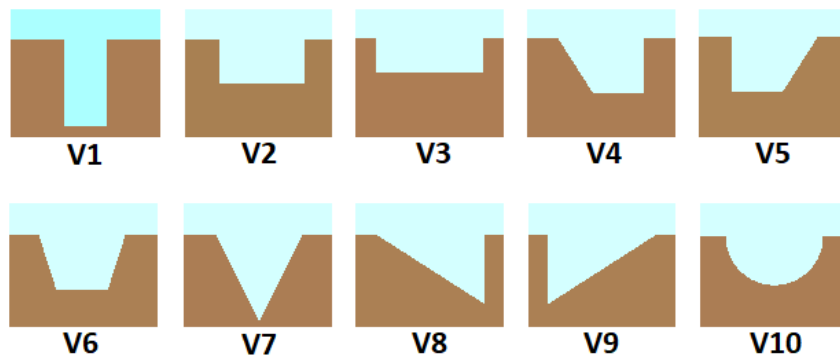


Figura 4.63 – Geometria da seção transversal das valetas.

Tabela 4.36 – Detalhamento das seções transversais das valetas.

Vala	Profundidade [mm]	Largura [mm]		Formato
		superior	inferior	
V1	1000	500	500	retangular
V2	500	1000	1000	retangular
V3	400	1250	1250	retangular
V4	625	1000	600	trapezoidal
V5	625	1000	600	trapezoidal
V6	625	1000	600	trapezoidal
V7	1000	1000	0	triangular
V8	800	1250	0	triangular
V9	800	1250	0	triangular
V10	562,5	1125	0	semicircular

Os picos de sobrepressão sensores 1, 2 e 3 em função dos tipos de valeta e rugosidade estão apresentados na Figura 4.64. As análises dos sensores 4, 5 e 6 foram apresentadas na seção anterior. Na ausência de valetas, as regiões mais próximas ao solo são duramente afetadas pelo efeito da reflexão da onda de choque. Para o cenário analisado, os resultados mostram que o uso dessas valetas proporciona uma redução substancial nas pressões sobre a face frontal do muro, principalmente nos pontos mais próximos ao solo, porém, no ponto mais alto, não há influência. Soukup et al (2019) explica que a onda de choque próxima ao solo se dobra e vaza para a vala. Esse vazamento da onda para dentro da vala alivia as pressões e impedem a formação da reflexão Mach, a qual tende a originar-se na superfície do solo quando a onda de choque refletida no solo alcança a incidente.

Além das valetas, o solo rugoso também desempenhou uma eficiência bastante significativa. Nesse caso, o estudo conduzido por Lechat et al (2021) mostra que a rugosidade ocasiona uma redução na amplitude do choque refletido e induz um atraso na reflexão da onda de choque e, conseqüentemente, acarretando atraso na formação da frente de reflexão Mach. Esses fenômenos explicam a redução das sobrepressões observadas em razão da rugosidade analisada.

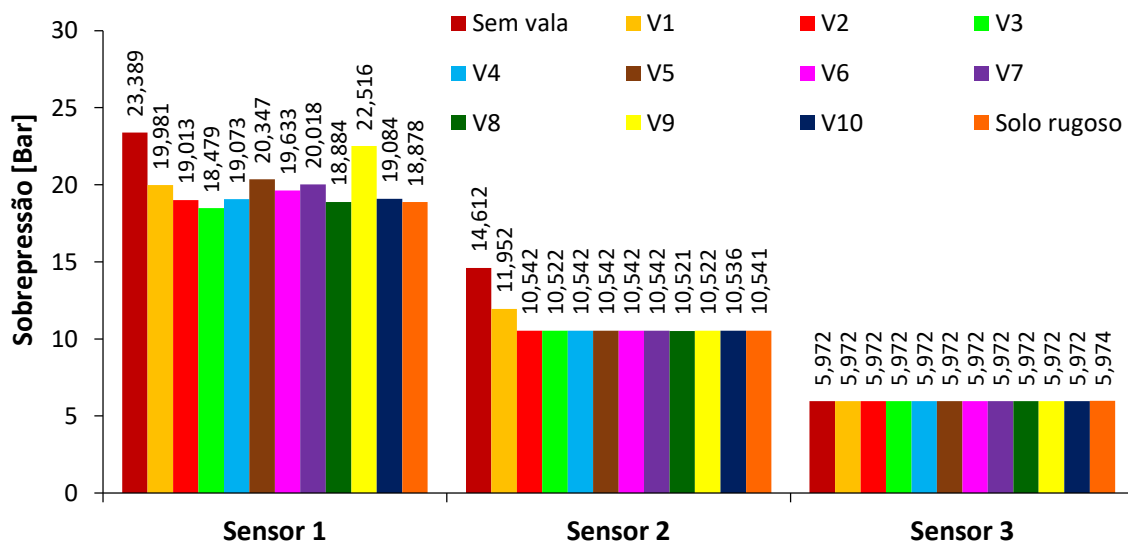


Figura 4.64 – Sobrepressão nos sensores 1, 2 e 3 (face do muro) para cada tipo de valeta.

Com base nos resultados da figura acima, nota-se que a valeta V3 foi a mais eficiente no que tange à redução da sobrepressões no muro. Essa redução chegou a 21% e 28% nos sensores 1 e 2, respectivamente. Usando essa valeta como parâmetro, outra

verificação foi realizada, dessa vez, manteve-se a largura em 1250 mm e a profundidade (h) variando em 100, 200, 300, 400 e 500 mm. Os resultados desta análise estão apresentados na Figura 4.65. Ficou notório que há um valor de convergência, ou seja, não há necessidade de grande profundidade para atingir o objetivo dessa barreira física não sólida. Outro fenômeno observado foi o acréscimo de sobrepressão no sensor 1 para uma profundidade pequena, nesse caso, a valeta piorou a situação das pressões no muro. Com base nisso, verifica-se que há uma profundidade ideal para a valeta quando se quer reduzir as sobrepressões da onda de choque incidentes no muro e que esta profundidade também está relacionada com a magnitude da explosão considerada.

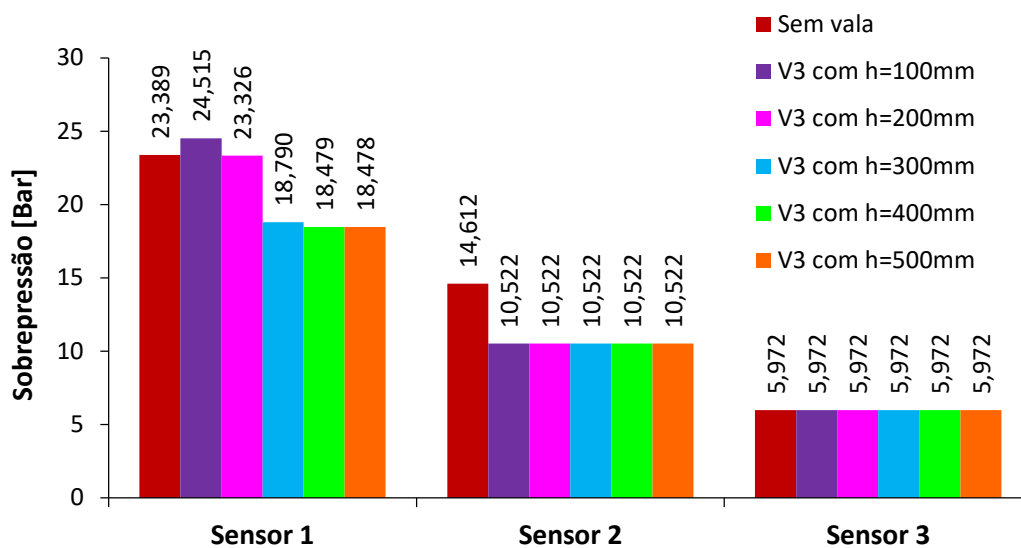


Figura 4.65 – Sobrepressão nos sensores 1, 2 e 3 (face do muro) para a valeta V3 com diferentes profundidades.

No decorrer deste capítulo, foi visto que as explosões de tanques de gás são eventos extremamente perigosos e potencialmente fatais. Embora existam várias medidas de segurança que possam ser tomadas para minimizar o risco de explosão, como a manutenção adequada dos tanques. Ademais, alocar os tanques em abrigos enterrados e instalar barreiras físicas de proteção podem ser medidas essenciais para mitigar os efeitos danosos da onda de choque, em caso de explosão acidental. É crucial que os profissionais de engenharia entendam os perigos associados ao uso de tanques de gás e tomem todas as precauções necessárias para evitar acidentes. A educação sobre segurança e a conscientização do público são fundamentais para garantir a segurança em torno das centrais de gás.

5. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

5.1. CONCLUSÕES

O presente trabalho foi desenvolvido com a finalidade de analisar o comportamento e os efeitos das ondas de choque em edificação em razão da explosão de tanques de gás. Em adição, barreiras físicas usadas como medidas de mitigação das sobrepressões nas estruturas foram verificadas. Todas as simulações numéricas foram feitas por meio do programa Autodyn, uma ferramenta baseada na fluidodinâmica computacional. Os resultados proporcionaram uma compreensão mais ampla sobre as diversas situações analisadas, sobretudo no quesito da estimativa das sobrepressões e da previsão de danos.

Em primeira análise, a energia mecânica armazenada nos tanques de gás foi estimada por meio de métodos analíticos, conseqüentemente, uma massa equivalente de TNT foi estabelecida para cada tipo de tanque. Posteriormente, numa análise de validação da ferramenta numérica, explosões foram simuladas no Autodyn, onde as sobrepressões obtidas foram comparadas com dados experimentais e analíticos, com isso, validando a modelagem numérica. Os resultados mostraram que o Autodyn é uma ferramenta numérica versátil para simular uma situação real envolvendo a explosão de tanque de gás.

A explosão de tanques estacionários de superfície espalha a energia radialmente no entorno, na ausência de obstáculos, a onda de choque incide diretamente nas estruturas. De forma geral, para os cinco modelos simulados (seção 4.3.2), as sobrepressões máximas vão diminuindo à medida que se afasta da explosão, contudo, há o efeito da reflexão em vários pontos do ambiente que ocasiona aumento de pressão. Outro efeito verificado nos modelos com corredor foi a canalização da onda de choque e isso pode ser notado pelos níveis de sobrepressão nesse local.

No caso de reservatórios dispostos em abrigos enterrados, a energia liberada na explosão tende a ser contida pelo fosso e, conseqüentemente, redirecionada para cima. Portanto, essa fração redirecionada é apenas uma parcela da energia total liberada, pois, as laterais do abrigo de concreto absorvem uma parte significativa de energia. Por outro lado, deve ter cuidado com as reflexões, pois, podem acrescentar valores substanciais nos níveis de sobrepressão, por exemplo, no alto de fachadas de prédios. Todavia, em geral, a técnica de enterrar os tanques de gás é bastante eficiente para reduzir os níveis

de sobrepressão no entorno da explosão e nas edificações, à vista disso, o uso dessa técnica em meios urbanos é justificado.

A partir das simulações feitas com tanques sobre o solo e em abrigo enterrado foi possível identificar os prováveis efeitos danosos. Esses efeitos são identificados pela correlação dos picos de sobrepressão aferidos em pontos relevantes (porta, janela, cantos, centro do ambiente e corredores) com as tabelas de danos. Nos cenários analisados, todas as sobrepressões obtidas representam algum nível de dano tanto nas edificações quanto em seus usuários. Nas construções, as sobrepressões medidas podem causar quebra de vidraças e até mesmo algum dano em elementos estruturais mais frágeis, por exemplo. Em relação aos seres humanos, em nenhum dos ambientes internos simulados há risco de morte, porém, pode ocorrer diversos tipos de lesões, tais como danos aos pulmões e ruptura de tímpano. Vale ressaltar que essas análises de danos levaram em consideração apenas a sobrepressão, no entanto, em alguns casos, os fragmentos lançados em alta velocidade podem ser extremamente perigosos, contudo, não foi foco deste estudo.

Nas simulações com tanque de 4950 L com gás propano (seção 4.4.1), foi possível observar a eficiência dos muros de proteção com vistas a mitigar os efeitos da onda de choque nas edificações. No sensor disposto na janela por exemplo, o muro de concreto reduziu em mais de 82% o nível de sobrepressão em relação ao modelo sem muro. Além disso, nesse mesmo sensor, verificou-se que a combinação do muro com o fosso proporcionou redução em mais de 92%. Dessa maneira, nota-se que essas medidas de proteção são bastante eficientes para esse fim. O muro pode ser amplamente usado para proteger as estruturas, principalmente nos locais onde não é possível a instalação de fosso.

No quesito integridade dos muros, verificou-se que o concreto falhou para todos os modelos retangulares (MR). Isso ocorreu devido às sobrepressões elevadas que incidiram da face frontal dessas barreiras. Os muros menos espessos falharam integralmente, pois, o volume de concreto era pequeno e insuficiente para dissipar a energia da onda de choque. Foi verificado que a base do muro é o local mais afetado, isso se deve à elevada concentração de tensões nessa região. A fim de aliviar essas tensões na base inferior, os muros trapezoidais (MT) mostraram ser mais resistentes, com isso, a geometria trapezoidal pode ser mais adequada para proteção das estruturas com centrais de gás. É importante ressaltar que todos os muros foram verificados sem a

armadura de aço, contudo, o emprego delas e também de fibras no concreto poderiam melhorar o desempenho dessas barreiras quanto aos esforços solicitantes.

Nas análises do posicionamento do muro entre o tanque e a edificação, verificou-se que quanto mais próxima a barreira de proteção está do tanque de gás, menor são as sobrepressões na fachada da edificação. Tal fenômeno pode estar relacionado com a redução da área de incidência direta da onda de choque na fachada ao aproximar o muro do reservatório. Outrossim, o muro impede a formação da frente de reflexão Mach próxima ao solo.

No que tange à geometria da seção transversal, os resultados mostraram que todas as barreiras propostas foram capazes de reduzir substancialmente as pressões na construção se comparado ao cenário sem proteção. Todavia, comparando entre si os resultados de cada barreira, não houve variações significativas que justifique o uso de geometrias mais complexas de serem executadas numa situação real. De modo geral, os muros retangulares, trapezoidais ou com reforço na base (G1, G2a e G7a, por exemplo) são mais apropriados para proteção das estruturas próximas às centrais de gás. Uma vez que as simulações dessas barreiras foram feitas de forma bidimensional, foi necessária a verificação da validade da modelagem 2D, nesse caso, essas simulações são válidas se o comprimento do muro for igual ou superior a 7 m, pois, para uma medida inferior a essa, a onda de choque que contorna pelas laterais pode influenciar nos resultados.

Por fim, nas simulações com valetas no solo alocadas entre o muro e a explosão, verificou-se que há alívio nas sobrepressões na face frontal do muro. No caso de muros retangulares com pouca espessura, onde a integridade da base é duramente afetada, a implementação de valetas pode ser uma solução relevante para reduzir as pressões principalmente na região mais próxima ao solo. Os resultados mostraram que essas barreiras não sólidas devem ser projetadas com geometria e posicionamento adequado para cumprir com a finalidade desejada.

Com base no exposto, os objetivos deste trabalho foram alcançados, pois, as simulações permitiram um entendimento mais aprofundado sobre essa temática das explosões de tanques de gás próximos às edificações. Isto posto, ficou evidente que as simulações numéricas em conjunto com dados experimentais são essenciais para análises envolvendo explosões de tanques pressurizados, uma vez que o projetista necessita dos resultados dessas técnicas para implementar uma disposição mais segura dos reservatórios em relação às estruturas e vias públicas.

5.2. RECOMENDAÇÕES PARA ESTUDOS FUTUROS

A temática das explosões de tanque de gás é ampla e carece de mais estudos, com isso, sugere-se:

- Realizar experimentos com a explosão de tanques de gás com grandes volumes próximos à edificação de sacrifício, dessa forma, além de analisar as sobrepressões, verificar o lançamento de fragmentos e avaliar os efeitos danosos nas estruturas.
- Analisar explosões de reservatório de gás por meio de modelagem de ambientes mais complexos e amplos envolvendo mais edificações de forma a avaliar melhor os ambientes urbanos.
- Simular a explosão de tanques em abrigo enterrado com a respectiva parte superior (tampa), com isso, verificar os níveis de sobrepressão no entorno e o lançamento do material dessa tampa.
- Simular a fragmentação dos muros de concreto submetidos à explosão de tanque de gás, conseqüentemente, avaliar o lançamento dos fragmentos.
- Verificar por meio de simulações numérica a integridade dos muros de proteção com as devidas armaduras de aço e também com o uso de concreto reforçado com fibras.
- Simular a explosão de tanques de gás sobre lajes de forma a verificar a distribuição das sobrepressões máximas e integridade do material.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABDELALIM, O. **Blast hazard mitigation through vented suppressive shields**. 2013. Tese (Doctor of Philosophy) - Civil and Environmental Engineering Department, Carleton University, Ottawa, 2013.

ANSYS. **ANSYS Autodyn user's manual**. USA, 2013.

AOUDE, H.; DAGENAIS, F. P.; BURRELL, R. P.; SAATCIOGLU M. Behavior of ultra-high performance fiber reinforced concrete columns under blast loading. **International Journal of Impact Engineering**, v. 80, p. 185–202, 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13523: Central de gás liquefeito de petróleo - GLP**. Rio de Janeiro, 2019.

ATTIA, W.; ELWAN, S.; KOTB, I. Investigating the effect of the geometry of RC barrier walls on the blast wave propagation. **International Journal of Safety and Security Engineering**, v. 11, n. 3, p. 255–268, 2021.

AZIZ, E.; CHASSAPIS, C.; ESCHE, S.; DAI, S.; XU, S.; JIA, R. Online wind tunnel laboratory. *In*: ANNUAL CONFERENCE & EXPOSITION. 2008, Pittsburgh. **Anais eletrônico** [...]. Pittsburgh, 2008. Disponível em: <https://peer.asee.org/3402>. Acesso em: 9 set. 2021.

BAI, C.; ZHAO, X.; YAO, J.; SUN, B. Numerical investigation of the shockwave overpressure fields of multi-sources FAE explosions. **Defence Technology**, v. 17, n. 4, p. 1168–1177, 2021.

BAKER, W. E.; COX, P. A.; WESTINE, P. S.; KULESZ, J. J.; STREHLOW, R. A. **Explosion hazards and evaluation**. Amsterdam: Elsevier Science, 1983.

BEYER, M. E. Blast loads behind vertical walls. *In*: EXPLOSIVES SAFETY SEMINAR, 22. 1986. Anaheim. **Proceedings** [...]. Anaheim, 1986. Disponível em: <https://apps.dtic.mil/sti/pdfs/ADP005331.pdf>. Acesso em: 9 set. 2021.

BOLONKIN, A. Cumulative thermonuclear inertial reactor. **Energy, Sustainability and Society**, v. 6, n. 1, p. 8, 2016.

BORG, A.; PAULSEN HUSTED, B.; NJÅ, O. The concept of validation of numerical models for consequence analysis. **Reliability Engineering & System Safety**, v. 125, p. 36–45, 2014.

CAIN, M. R. **Pressure vessel burst test study**. Titusville: General Physics Corporation, 1996.

CEN, K.; SONG, B.; SHEN, R.; ZHANG, Y.; YU, W.; WANG, Q. Dynamic characteristics of gas explosion and its mitigation measures inside residential buildings. **Mathematical Problems in Engineering**, v. 2019, p. 1–15, 2019.

ÇENGEL, Y. A.; BOLES, M. A. **Thermodynamics: an engineering approach**. 8. ed. New York: McGraw-Hill, 2014.

CERNAK, I. Animal models for concussion: Molecular and cognitive assessment - Relevance to sport and military concussions. *In*: KOBEISSY, F. H. **Brain neurotrauma**. Gainesville: CRC Press, 2015. p. 674–687.

CHEN, L.; XU, R.; FANG, Q.; ZHENG, Y.; LI, Z.; CAO, M. Response characteristics of gabion wall under large TNT-equivalent explosives. **Journal of Structural Engineering**, v. 148, n. 8, ago. 2022.

CHOI, M.; LEE, J.; KONG, C. Development of a numerical model for an expanding tube with linear explosive using AUTODYN. **Shock and Vibration**, v. 2014, p. 1–10, 2014.

CORPO DE BOMBEIROS DA POLÍCIA MILITAR DO ESTADO DE SÃO PAULO. **Instrução Técnica 28/2018: Manipulação, armazenamento, comercialização e utilização de gás liquefeito de petróleo (GLP)**. São Paulo, 2018.

CORPO DE BOMBEIROS MILITAR DA BAHIA. **Instrução técnica N° 28/2021: Manipulação, armazenamento, comercialização e utilização de gás liquefeito de petróleo (GLP)**. Salvador, 2021.

CORPO DE BOMBEIROS MILITAR DA PARAÍBA. **Norma Técnica 007/2019: Diretrizes de integração do CBMPB à REDESIM**. João Pessoa, 2019.

CORPO DE BOMBEIROS MILITAR DE ALAGOAS. **Instrução técnica N° 28/2021: Manipulação, armazenamento, comercialização e utilização de gás liquefeito de petróleo (GLP)**. Maceió, 2021.

CORPO DE BOMBEIROS MILITAR DO ESTADO DE MATO GROSSO. **Norma Técnica 26/2020: Manipulação, Armazenamento, Comercialização e Utilização de Gás Liquefeito de Petróleo (GLP)**. Cuiabá, 2020.

CORPO DE BOMBEIROS MILITAR DE MATO GROSSO DO SUL. **Norma Técnica n° 28/2013: Manipulação, armazenamento, comercialização e utilização de gás liquefeito de petróleo (GLP)**. Campo Grande, 2013.

CORPO DE BOMBEIROS MILITAR DE MINAS GERAIS. **Instrução Técnica N° 23: Manipulação, armazenamento, comercialização e utilização de GLP**. Belo Horizonte, 2022.

CORPO DE BOMBEIROS MILITAR DE PERNAMBUCO. **Enunciado Técnico 006: Dimensionamento da central de GLP**. Recife, 2021.

CORPO DE BOMBEIROS MILITAR DE RORAIMA. **Norma Técnica N° 40/2019: Projeto Técnico Simplificado**. Boa Vista, 2019.

CORPO DE BOMBEIROS MILITAR DE SANTA CATARINA. **Instrução Normativa 008: Instalação de gás combustível (GLP E GN)**. Florianópolis, 2018.

CORPO DE BOMBEIROS MILITAR DE SERGIPE. **Portaria no 049/2014-GCG, de 3 de abril de 2014**. Aracaju, 2014.

CORPO DE BOMBEIROS MILITAR DO AMAPÁ. **Norma técnica N° 008/2020: Gás liquefeito de petróleo (GLP) – Manipulação, utilização e central de GLP**. Macapá, 2020.

CORPO DE BOMBEIROS MILITAR DO AMAZONAS. **Instrução técnica N° 28/2019: Manipulação, armazenamento, comercialização e utilização de gás liquefeito de petróleo (GLP)**. Manaus, 2019.

CORPO DE BOMBEIROS MILITAR DO ESTADO DE GOIÁS. Norma Técnica 28/2014: Gás liquefeito de petróleo (GLP) - Parte 1 - Manipulação, utilização e central de GLP. Goiânia, 2014.

CORPO DE BOMBEIROS MILITAR DO ESTADO DO ACRE. Norma técnica 28/2022: Gás liquefeito de petróleo (GLP) - Parte II - Área de armazenamento de recipientes transportáveis de GLP destinados ou não à comercialização – Critérios de Segurança. Rio Branco, 2022.

CORPO DE BOMBEIROS MILITAR DO ESTADO DO CEARÁ. Norma técnica N° 007/2008: Manipulação, armazenamento, comercialização e utilização de gás liquefeito de petróleo. Fortaleza, 2008.

CORPO DE BOMBEIROS MILITAR DO ESTADO DO ESPÍRITO SANTO. Norma Técnica 18/2015: Líquidos e gases combustíveis e inflamáveis - Parte 1 - Regras no uso do gás liquefeito de petróleo (GLP) em edificações e áreas de risco. Vitória, 2015.

CORPO DE BOMBEIROS MILITAR DO ESTADO DO RIO DE JANEIRO. Nota Técnica n° 3-02: Gás (GLP/GN) - Uso predial. Rio de Janeiro, 2019.

CORPO DE BOMBEIROS MILITAR DO ESTADO DO MARANHÃO. Norma Técnica 28/2021: Manipulação, armazenamento, comercialização e utilização de gás liquefeito de petróleo (GLP). São Luiz, 2021.

CORPO DE BOMBEIROS MILITAR DO ESTADO DO PIAUÍ. Instrução Técnica 28/2019: Manipulação, armazenamento, comercialização e utilização de gás liquefeito de petróleo (GLP). Teresina, 2019.

CORPO DE BOMBEIROS MILITAR DO ESTADO DO RIO GRANDE DO NORTE. Instrução Técnica 28/2022: Manipulação, armazenamento, comercialização e utilização de gás liquefeito de petróleo (GLP). Natal, 2022.

CORPO DE BOMBEIROS MILITAR DO ESTADO DO RIO GRANDE DO SUL. Instrução Normativa 001/2014: Anexo A - Requisitos e procedimentos técnicos de prevenção e proteção contra incêndio. Porto Alegre, 2014.

CORPO DE BOMBEIROS MILITAR DO ESTADO DE RONDÔNIA. Instrução Técnica N° 28/2017: Manipulação, utilização e central de GLP. Porto Velho, 2017.

CORPO DE BOMBEIROS MILITAR DO ESTADO DO TOCANTINS. Norma Técnica N° 23: Manipulação, armazenamento, comercialização e utilização de gás liquefeito de petróleo - GLP. Palmas, 2022.

CORPO DE BOMBEIROS MILITAR DO DISTRITO FEDERAL. Norma técnica N° 05/2021-CBMDF - Segurança contra incêndio para gás liquefeito de petróleo (GLP). Brasília, 2021.

CORPO DE BOMBEIROS MILITAR DO PARÁ. Instrução Técnica 12 - Instruções técnicas específicas: Parte II - Gás liquefeito de petróleo: armazenamento, comercialização e utilização. Belém, 2019.

CORPO DE BOMBEIROS MILITAR DO PARANÁ. Norma de Procedimento Técnico 028: Manipulação, armazenamento, comercialização e utilização de gás liquefeito de petróleo (GLP). Curitiba, 2014.

COSTA NETO, M. L. **Um estudo do fenômeno explosão e das ondas de choque utilizando a fluidodinâmica computacional**. 2015. Dissertação (Mestrado em Estruturas e Construção Civil) - Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, 2015.

COSTA NETO, M. L. **Análise da perfuração de elementos de concreto por explosivos utilizando a fluidodinâmica computacional**. 2019. Tese (Doutorado em Estruturas e Construção Civil) - Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, 2019.

COSTA NETO, M. L.; DOZ, G. Análise computacional da perfuração de placas de concreto por explosivos. **Revista Sul-americana de Engenharia Estrutural**, v. 16, n. 2, p. 39–55. 2019.

COSTA NETO, M. L.; DOZ, G. N. Estudo numérico das pressões de onda de choque em diferentes meios e sua transmissão. **Revista Sul-americana de Engenharia Estrutural**, 2017a.

COSTA NETO, M. L.; DOZ, G. N. Study of blast wave overpressures using the computational fluid dynamics. **Revista IBRACON de Estruturas e Materiais**, 2017b.

FERRADÁS, E. G.; ALONSO, F. D.; PÉREZ, J. F. S.; MIÑARRO, M. D.; AZNAR, A. M.; GIMENO, J. R. Consequence analysis to buildings from bursting cylindrical vessels. **Process Safety Progress**, v. 28, n. 2, p. 179–189, 2009.

FITZ-GIBBON, J. **Before and after satellite images show devastation of Beirut explosion**. Disponível em: <<https://nypost.com/2020/08/05/before-and-after-satellite-images-of-the-beirut-explosion/>>. Acesso em: 14 jan. 2023.

GAN, E. C. J.; REMENNIKOV, A.; RITZEL, D. Investigation of trees as natural protective barriers using simulated blast environment. **International Journal of Impact Engineering**, v. 158, p. 104004, 2021.

GEBBEKEN, N.; WARNSTEDT, P.; RÜDIGER, L. Blast protection in urban areas using protective plants. **International Journal of Protective Structures**, v. 9, n. 2, p. 226–247, 2018.

INTERNATIONAL AMMUNITION TECHNICAL GUIDELINE. **IATG 02.10:2015 - Introduction to risk management principles and processes**. New York, UNODA, 2015.

JIN, M.; HAO, Y.; HAO, H. Numerical study of fence type blast walls for blast load mitigation. **International Journal of Impact Engineering**, v. 131, p. 238–255, 2019.

KANG, K.; CHOI, K.; CHOI, J. W.; RYU, Y. H.; LEE, J. An influence of gas explosions on dynamic responses of a single degree of freedom model. **Shock and Vibration**, v. 2016, p. 1–13, 2016.

KIM, D. Improvement for construction of concrete-wall with resistance to gas-explosion. **Advances in Materials Science and Engineering**, v. 2018, p. 1–9, 2018.

KINNEY, G. F.; GRAHAM, K. J. **Explosive shocks in air**. 2. ed. New York: Springer Science+Business Media, 1985.

KOBEISSY, F. H. **Brain neurotrauma: molecular neuropsychological and rehabilitation aspects**. Gainesville: CRC Press, 2015.

KOREA OCCUPATIONAL SAFETY & HEALTH AGENCY. **KOSHA GUIDE D-65-2018: Technical guidance on the design and installation of protective structures.** Republic of Korea, 2018.

LAPESA. **Tanks and equipment for liquefied petroleum gases.** 2022. Disponível em: <https://lapesa.es/sites/default/files/catg1p-e-11.pdf>. Acesso em: 14 jan. 2023.

LECHAT, T.; EMMANUELLI, A.; DRAGNA, D.; OLLIVIER, S. Propagation of spherical weak blast waves over rough periodic surfaces. **Shock Waves**, v. 31, n. 4, p. 379–398, 2021.

LEES, F. P. **Loss Prevention in the process industries: hazard identification, assessment and control.** 2. ed. Oxford: Butterworth-Heinemann, 1996.

LI, J.; HERNANDEZ, F.; HAO, H.; FANG, Q.; XIANG, H.; LI, Z.; ZHANG, X.; CHEN, L. Vented Methane-air explosion overpressure calculation - a simplified approach based on CFD. **Process Safety and Environmental Protection**, v. 109, p. 489–508, 2017.

LI, J. D.; HAO, H. Investigation of safety distance effect on gas storage tanks subjected to vapor cloud fast deflagration by using flacs. *In*: **EASEC16, Lecture notes in civil engineering 101.** Singapore: Springer Nature Singapore Pte Ltd., 2021. p. 667–676.

LI, Z.; WU, J.; LIU, M.; LI, Y.; MA, Q. Numerical analysis of the characteristics of gas explosion process in natural gas compartment of utility tunnel using FLACS. **Sustainability**, v. 12, n. 1, p. 153, 2019.

LUCCIONI, B.; AMBROSINI, D.; DANESI, R. Blast load assessment using hydrocodes. **Engineering Structures**, v. 28, n. 12, p. 1736–1744, 2006.

MOLKOV, V.; KASHKAROV, S. Blast wave from a high-pressure gas tank rupture in a fire: stand-alone and under-vehicle hydrogen tanks. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 40, n. 36, p. 12581–12603, 2015.

NEEDHAM, C. E. **Blast Waves.** 2. ed. Berlin: Springer, 2010.

NIEMANN-DELIUS, C.; BUHROW, C.; OKAFOR, E. Gas explosion prediction using CFD models. **Erdoel Erdgas Kohle**, v. 122, n. 7–8, p. 287–290, 2006.

ORAN, E. S.; CHAMBERLAIN, G.; PEKALSKI, A. Mechanisms and occurrence of detonations in vapor cloud explosions. **Progress in Energy and Combustion Science**, v. 77, p. 37, 2020.

PANG, L.; HU, Q.; JIN, M.; YANG, K. Effect of congestion on flow field of vented natural gas explosion in a kitchen. **Advances in Civil Engineering**, v. 2021, p. 1–22, 2021.

PARK, S.; BEAK, J.; KIM, K.; PARK, Y. Study on reduction effect of vibration propagation due to internal explosion using composite materials. **International Journal of Concrete Structures and Materials**, v. 15, n. 1, 2021.

PEGORARO. **Aboveground LPG tanks.** Disponível em: <https://www.pegorarogas.com/en/products-and-services/aboveground-lpg-tanks/>. Acesso em: 9 set. 2021.

QIUHONG, W.; YILIN, S.; XIN, L.; JUNCHENG, J.; MINGGUANG, Z.; LIUBING, W. Numerical simulation on gas dispersions and vapor cloud explosions induced by gas

released from an ethylene storage tank. **Explosion and Shock Waves**, v. 40, n. 12, p. 1–13, 2020.

REICHENBACH, H. **Roughness and heated layer effects on shock wave propagation and reflection - Experimental results**. Ernst Mach Inst. Rep. E24/85. Freiburg, 1985.

RODRIGUEZ, E. A.; SCHOFIELD, W. **Comparison of blast pressures and effects methodologies with application to south Texas units 3 & 4**. Rockville: Energy Research Inc., 2009.

RULIN, Z.; JUANJUAN, J.; HUAI FENG, W.; YOUHAI, GUAN. Shock response analysis of a large LNG storage tank under blast loads. **KSCE Journal of Civil Engineering**, v. 22, n. 9, p. 3419–3429, 2018.

SALZANO, E.; PICOZZI, B.; VACCARO, S.; CIAMBELLI, P. Hazard of pressurized tanks involved in fires. **Industrial & Engineering Chemistry Research**, v. 42, n. 8, p. 1804–1812, 2003.

SCHLEYER, G. K. Predicting the effects of blast loading arising from a pressure vessel failure: a review. **Journal of Process Mechanical Engineering**, v. 218, n. 4, p. 181–190, 2004.

SHARMA, R. K. A violent, episodic vapour cloud explosion assessment: deflagration-to-detonation transition. **Journal of Loss Prevention in the Process Industries**, v. 65, p. 104086, 2020.

SHIRBHATE, P. A.; GOEL, M. D. A Critical review of blast wave parameters and approaches for blast load mitigation. **Archives of Computational Methods in Engineering**, v. 28, n. 3, p. 1713–1730, 2020.

SILVA, W. C. L. **Blast - Efeitos da onda de choque no ser humano e nas estruturas**. 2007. Dissertação (Mestrado em Ciências), Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos, 2007.

SINGH, G. P.; SHARMA, J. D.; ARORA, R.; SANDHU, I. S. CFD analysis of shock tube for blast impact testing. **Materials Today: Proceedings**, v. 28, p. 1872–1878, 2020.

SKOB, Y.; UGRYUMOV, M.; DREVAL, Y. Numerical Modelling of gas explosion overpressure mitigation effects. **Materials Science Forum**, v. 1006, p. 117–122, 2020.

SONG, D. G.; JUNG, S. H.; KIM, E. S. Structure integrity evaluation of gas protective wall for new construction method using strength test and numerical analysis. **Journal of Mechanical Science and Technology**, v. 35, n. 3, p. 1143–1151, 2021.

SOUKUP, J.; KLIMENDA, F.; SKOČILAS, J.; ŽMINDÁK, M. Finite element modelling of shock wave propagation over obstacles. **Manufacturing Technology**, v. 19, n. 3, p. 499–507, 2019.

TAHA, A. K.; GAO, Z.; HUANG, D.; ZAHARAN, M. S. Numerical investigation of a new structural configuration of a concrete barrier wall under the effect of blast loads. **International Journal of Advanced Structural Engineering**, v. 11, n. S1, p. 19–34, 2019.

TOY, A. T.; SEVIM, B. Numerically and empirically determination of blasting response of a RC retaining wall under TNT explosive. **Advances in Concrete Construction**, v. 5, p. 493–512, 2017.

TSCHIRSCHWITZ, R.; KRENTEL, D.; KLUGE, M.; ASKAR, E.; HABIB, K.; KOHLHOFF, H.; NEUMANN, P. P.; STORM, S.; RUDOLPH, M.; SCHOPPA, A.; SZCZEPANIAK, M. Mobile gas cylinders in fire: Consequences in case of failure. **Fire Safety Journal**, v. 91, p. 989–996, 2017.

VAIDOGAS, E. R. Predicting the ejection velocities of fragments from explosions cylindrical pressure vessels: uncertainty and sensitivity analysis. **Journal of Loss Prevention in the Process Industries**, v. 71, n. February, p. 104450, 2021.

VYAZMINA, E.; JALLAIS, S.; BECCANTINI, A.; TRÉLAT, S. Protective walls against effects of vapor cloud fast deflagration: CFD recommendations for design. **Process Safety Progress**, v. 37, n. 1, p. 56–66, 2018.

WANG, D.; QIAN, X.; YUAN, M.; JI, T.; XU, W.; LIU, S. Numerical simulation analysis of explosion process and destructive effect by gas explosion accident in buildings. **Journal of Loss Prevention in the Process Industries**, v. 49, p. 215–227, 2017.

WANG, K.; SHI, T.; HE, Y.; LI, M.; QIAN, X. Case analysis and CFD numerical study on gas explosion and damage processing caused by aging urban subsurface pipeline failures. **Engineering Failure Analysis**, v. 97, n. 1550, p. 201–219, 2019.

WANG, S. **Shock tube / laser absorption study of aldehydes kinetics shock tube**. 2016. Tese (Doctor of Philosophy), Department of mechanical engineering, Stanford university, California, 2016.

WU, J.; LIU, J.; YAN, Q. Effect of shock wave on fabricated anti-blast wall and distribution law around the wall under near surface explosion. **Transactions of Tianjin University**, v. 14, n. S1, p. 514–518, 2008.

XIAO, W.; ANDRAE, M.; GEBBEKEN, N. Experimental and numerical investigations on the shock wave attenuation performance of blast walls with a canopy on top. **International Journal of Impact Engineering**, v. 131, p. 123–139, 2019.

YU, Q.; ZENG, D.; XU, X.; LI, S.; DONG, W.; DAI, L. Experimental and numerical investigation of polymer-reinforced and normal autoclaved aerated concrete masonry walls under large TNT explosive loads. **International Journal of Impact Engineering**, v. 164, p. 104188, 2022.

ZEL'DOVICH, Y. B.; RAIZER, Y. P. **Physics of shock waves and high-temperature hydrodynamic phenomena**. New York: Academic Press, 1966.

ZHOU, X. Q.; HAO, H. Prediction of airblast loads on structures behind a protective barrier. **International Journal of Impact Engineering**, v. 35, n. 5, p. 363–375, 2008.

ZIMBELMANN, J.; BOLEY, C. Underground explosions: estimating the safe distance. **Geotechnical Research**, v. 3, n. 3, p. 67–89, 2016.

ANEXO

ANEXO 01 – PROPRIEDADES DE ALGUNS GASES (ÇENGEL; BOLES, 2014)

Molar mass, gas constant, and critical–point properties						
Substance	Formula	Molar mass, <i>M</i> kg/kmol	Gas constant, <i>R</i> kJ/kg·K*	Critical-point properties		
				Temperature, K	Pressure, MPa	Volume, m ³ /kmol
Air	—	28.97	0.2870	132.5	3.77	0.0883
Ammonia	NH ₃	17.03	0.4882	405.5	11.28	0.0724
Argon	Ar	39.948	0.2081	151	4.86	0.0749
Benzene	C ₆ H ₆	78.115	0.1064	562	4.92	0.2603
Bromine	Br ₂	159.808	0.0520	584	10.34	0.1355
<i>n</i> -Butane	C ₄ H ₁₀	58.124	0.1430	425.2	3.80	0.2547
Carbon dioxide	CO ₂	44.01	0.1889	304.2	7.39	0.0943
Carbon monoxide	CO	28.011	0.2968	133	3.50	0.0930
Carbon tetrachloride	CCl ₄	153.82	0.05405	556.4	4.56	0.2759
Chlorine	Cl ₂	70.906	0.1173	417	7.71	0.1242
Chloroform	CHCl ₃	119.38	0.06964	536.6	5.47	0.2403
Dichlorodifluoromethane (R–12)	CCl ₂ F ₂	120.91	0.06876	384.7	4.01	0.2179
Dichlorofluoromethane (R–21)	CHCl ₂ F	102.92	0.08078	451.7	5.17	0.1973
Ethane	C ₂ H ₆	30.070	0.2765	305.5	4.48	0.1480
Ethyl alcohol	C ₂ H ₅ OH	46.07	0.1805	516	6.38	0.1673
Ethylene	C ₂ H ₄	28.054	0.2964	282.4	5.12	0.1242
Helium	He	4.003	2.0769	5.3	0.23	0.0578
<i>n</i> -Hexane	C ₆ H ₁₄	86.179	0.09647	507.9	3.03	0.3677
Hydrogen (normal)	H ₂	2.016	4.1240	33.3	1.30	0.0649
Krypton	Kr	83.80	0.09921	209.4	5.50	0.0924
Methane	CH ₄	16.043	0.5182	191.1	4.64	0.0993
Methyl alcohol	CH ₃ OH	32.042	0.2595	513.2	7.95	0.1180
Methyl chloride	CH ₃ Cl	50.488	0.1647	416.3	6.68	0.1430
Neon	Ne	20.183	0.4119	44.5	2.73	0.0417
Nitrogen	N ₂	28.013	0.2968	126.2	3.39	0.0899
Nitrous oxide	N ₂ O	44.013	0.1889	309.7	7.27	0.0961
Oxygen	O ₂	31.999	0.2598	154.8	5.08	0.0780
Propane	C ₃ H ₈	44.097	0.1885	370	4.26	0.1998
Propylene	C ₃ H ₆	42.081	0.1976	365	4.62	0.1810
Sulfur dioxide	SO ₂	64.063	0.1298	430.7	7.88	0.1217
Tetrafluoroethane (R–134a)	CF ₃ CH ₂ F	102.03	0.08149	374.2	4.059	0.1993
Trichlorofluoromethane (R–11)	CCl ₃ F	137.37	0.06052	471.2	4.38	0.2478
Water	H ₂ O	18.015	0.4615	647.1	22.06	0.0560
Xenon	Xe	131.30	0.06332	289.8	5.88	0.1186

*The unit kJ/kg·K is equivalent to kPa·m³/kg·K. The gas constant is calculated from $R = R_u/M$, where $R_u = 8.31447$ kJ/kmol·K and M is the molar mass.

Ideal–gas specific heats of various common gases					
(a) At 300 K					
Gas	Formula	Gas constant, <i>R</i> kJ/kg·K	<i>c_p</i> kJ/kg·K	<i>c_v</i> kJ/kg·K	<i>k</i>
Air	—	0.2870	1.005	0.718	1.400
Argon	Ar	0.2081	0.5203	0.3122	1.667
Butane	C ₄ H ₁₀	0.1433	1.7164	1.5734	1.091
Carbon dioxide	CO ₂	0.1889	0.846	0.657	1.289
Carbon monoxide	CO	0.2968	1.040	0.744	1.400
Ethane	C ₂ H ₆	0.2765	1.7662	1.4897	1.186
Ethylene	C ₂ H ₄	0.2964	1.5482	1.2518	1.237
Helium	He	2.0769	5.1926	3.1156	1.667
Hydrogen	H ₂	4.1240	14.307	10.183	1.405
Methane	CH ₄	0.5182	2.2537	1.7354	1.299
Neon	Ne	0.4119	1.0299	0.6179	1.667
Nitrogen	N ₂	0.2968	1.039	0.743	1.400
Octane	C ₈ H ₁₈	0.0729	1.7113	1.6385	1.044
Oxygen	O ₂	0.2598	0.918	0.658	1.395
Propane	C ₃ H ₈	0.1885	1.6794	1.4909	1.126
Steam	H ₂ O	0.4615	1.8723	1.4108	1.327

Note: The unit kJ/kg·K is equivalent to kJ/kg·°C.

Source of Data: B. G. Kyle, *Chemical and Process Thermodynamics*, 3rd ed. (Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall, 2000).