



UFPG - UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
CCT - CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIAS
UNIDADE ACADÊMICA DE ENGENHARIA QUÍMICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA
LABORATÓRIO DE EXPERIMENTAÇÃO NUMÉRICA DE PROCESSOS



**CONTRIBUIÇÕES PARA A CLASSIFICAÇÃO DE ÁREAS
DEVIDO A LIBERAÇÃO BIFÁSICA DE INFLAMÁVEIS
VIA FLUIDODINÂMICA COMPUTACIONAL**

TALLES CAIO LINHARES DE OLIVEIRA

CAMPINA GRANDE – PB

2018

CONTRIBUIÇÕES PARA A CLASSIFICAÇÃO DE ÁREAS DEVIDO A LIBERAÇÃO BIFÁSICA DE INFLAMÁVEIS VIA FLUIDODINÂMICA COMPUTACIONAL

TALLES CAIO LINHARES DE OLIVEIRA

Tese de doutorado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química da Universidade Federal de Campina Grande, como parte dos requisitos para obtenção do título de Doutor em Engenharia Química.

Área de Concentração: Modelagem e Simulação

Orientadores:

Prof. Dr. José Jailson Nicácio Alves

Prof. Dr. Antonio Tavernard Pereira Neto

CAMPINA GRANDE – PB

2018

- O48c Oliveira, Talles Caio Linhares de.
 Contribuições para a classificação de áreas devido a liberação bifásica de inflamáveis via fluidodinâmica computacional / Talles Caio Linhares de Oliveira. – Campina Grande, 2018.
 149 f. : il. color.
- Tese (Doutorado em Engenharia Química) – Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Ciências e Tecnologia, 2018.
 "Orientação: Prof. Dr. José Jailson Nicácio Alves, Prof. Dr. Antonio Tavernard Pereira Neto".
 Referências.
1. Engenharia Química. 2. Análise de Risco. 3. Segurança de Processos. 4. Modelagem Spray. 5. Gases Liquefeitos. 6. Atmosfera Explosiva. I. Alves, José Jailson Nicácio. II. Pereira Neto, Antonio Tavernard. III. Título.

CDU 66.01(043)

TALLES CAIO LINHARES DE OLIVEIRA

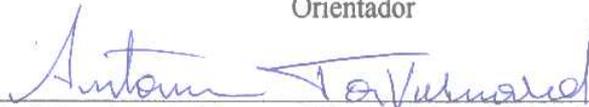
CONTRIBUIÇÕES PARA A CLASSIFICAÇÃO DE ÁREAS
DEVIDO A LIBERAÇÃO BIFÁSICA DE INFLAMÁVEIS VIA
FLUIDODINÂMICA COMPUTACIONAL

Tese de Doutorado aprovada em: 21/09 2018

BANCA EXAMINADORA:



Prof. Dr. José Jailson Nicácio Alves - UAEQ/CCT/UFCG
Orientador



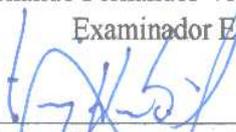
Prof. Dr. Antonio Tavernard Pereira Neto - UAEQ/CCT/UFCG
Orientador



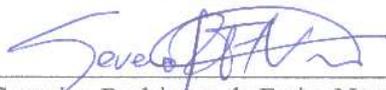
Prof. Dr. Sidinei Kleber da Silva - UAEQ/CCT/UFCG
Examinador Interno



Prof. Dr. Fernando Fernandes Vieira - DESA/CCT/UEPB
Examinador Externo



Prof. Dr. Tony Herbert Freire de Andrade - UAEPetro/CCT/UFCG
Examinador Externo



Prof. Dr. Severino Rodrigues de Farias Neto- UAEQ/CCT/UFCG
Examinador Externo

Campina Grande – PB, setembro de 2018

Dedicatória

A minha família, especialmente a meus pais Ademir de Oliveira Silva e Meirelúcia Ferreira Linhares de Oliveira pelo apoio e incentivo durante toda esta jornada.

A minha namorada, Yeda, por todo o incentivo, carinho e companheirismo durante todo este longo percurso.

AGRADECIMENTOS

Ao professor José Jaílson Nicácio Alves pela orientação e ensinamentos de grande relevância para a realização deste trabalho.

Ao professor Antônio Tavernard Pereira Neto pelo apoio e orientação prestada na realização deste trabalho.

Ao engenheiro da Petrobras Aurélio Moreira Luiz pelo suporte técnico e ensinamentos acerca de classificação de áreas que foram fundamentais para o desenvolvimento do presente trabalho.

Ao Laboratório de Experimentação Numérica de Processos (LENP) pela estrutura e suporte que possibilitaram a realização deste trabalho.

Aos companheiros do LENP pelos momentos compartilhados de conhecimento e companheirismos.

Aos professores e colegas do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química pelos ensinamentos essenciais para a realização deste trabalho.

A CAPES e a PETROBRAS pelo apoio financeiro e técnico.

“Os pessimistas reclamam do vento, os otimistas esperam que ele mude, os realistas ajustam as velas.”

William G. Ward

RESUMO

Industrialmente gases inflamáveis são armazenados e transportados sob a forma de líquido pressurizado. A ocorrência de vazamentos de gases liquefeitos inflamáveis pressurizados em vasos ou tubos pode causar uma liberação bifásica contendo uma mistura inflamável constituída de gotas líquidas e vapor, portanto o estudo deste tipo de liberação é de fundamental importância para a classificação de áreas. A mais importante norma (IEC 60079-10-1) utilizada para classificação de áreas não aborda casos onde a liberação de gases liquefeitos é de natureza bifásica, porém recomenda o uso de fluidodinâmica computacional (CFD) para essas situações. No presente trabalho um modelo em CFD foi definido para a classificação de áreas onde possíveis liberações de gases liquefeitos possam ocorrer, para isso utilizou-se o software comercial Ansys® CFX 16.1. Um estudo detalhado da liberação do jato bifásico inflamável é conduzido utilizando propano e gás liquefeito do petróleo (GLP). Os resultados mostraram que em média, para a maioria dos casos simulados, as extensões das áreas classificadas apresentadas nas normas são maiores que as obtidas pelo modelo, resultando em um sobredimensionamento da área classificada para a maioria dos casos analisados. A influência do vento foi analisada, onde constatou-se que um aumento gradativo da intensidade do vento no mesmo sentido da liberação contribui para um aumento na extensão e uma redução no volume da atmosfera explosiva. Para baixas velocidades de ventos e direção oposta ao vazamento foi constatado um aumento na extensão e volume da atmosfera explosiva. As simulações conduzidas com inerte confirmaram a eficácia do processo de inertização para redução da área de risco. A partir do modelo fluidodinâmico foi possível propor uma equação para a determinação da extensão da atmosfera explosiva, proporcionando uma resposta rápida e precisa, eliminando assim o elevado custo computacional requerido pelo modelo em CFD. Os resultados obtidos com o presente modelo numérico estão em concordância com dados experimentais.

Palavras-chave: Análise de Risco, Modelagem Spray, Gases Liquefeitos, Atmosfera Explosiva, Segurança de Processos.

ABSTRACT

Industrially, flammable gases are stored and transported in the form of pressurized liquid. The occurrence of leaks from pressurized flammable liquids in vessels or pipes may cause a two-phase release containing a mixture of liquid droplets and vapour of flammable substances, therefore the study of this type of release of fundamental importance for the hazardous areas classification. The most important standard used for classification of areas does not address cases where the release of liquefied gases is two-phase nature but recommends the use of computational fluid dynamics (CFD) for these situations. In the present work, a CFD model was defined to hazardous areas classification where possible releases of liquefied gases can occur, for which the commercial software Ansys® CFX 16.1 was used. A detailed study of the release of the flammable two-phase jet was conducted using propane and liquefied petroleum gas (LPG). The results showed that on average for most simulated cases the extensions of the classified areas presented in the standards are larger than those obtained by the model, resulting in oversizing of the hazardous area for most of the cases analyzed. The influence of the wind was analyzed, where it was verified that a gradual increase of the wind intensity in the same direction of the release contributes to an increase in the extension and a reduction in the volume of the explosive atmosphere. For low wind velocity and opposite direction to the leak, an increase in the extent and volume of the explosive atmosphere was observed. The simulations conducted in CFD with inert confirmed the effectiveness of the process of inertization to reduce the hazardous area. Using the fluid dynamics model it was possible to propose an equation to determine the extent of the explosive atmosphere, providing a fast and accurate response, thus eliminating the high computational cost required by the CFD. The numerical model results agree with available experimental results.

Keywords: Risk Analysis, Spray Modeling, Liquefied Gases, Explosive Atmosphere, Process Safety.

LISTA DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| Figura 3.1 – Ilustração limites de explosividade. | 30 |
| Figura 3.2 – Classificação de áreas em torno de um tanque de acordo com as práticas americanas. | 34 |
| Figura 3.3 – Classificação de áreas em torno de um tanque de acordo com a norma internacional. | 35 |
| Figura 3.4 – Comportamento da atmosfera explosiva para liberações com vento. | 37 |
| Figura 3.5 – Representação esquemática da liberação flashing no ambiente. | 38 |
| Figura 3.6 – Representação gráfica do fator de risco. | 41 |
| Figura 3.7 – Áreas classificadas em torno de uma bomba ou compressor manipulando líquidos inflamáveis ou altamente voláteis. | 45 |
| Figura 3.8 – Áreas classificadas em torno de acessórios em uma tubulação. | 45 |
| Figura 3.9 – Vazamento no solo em ambiente aberto. | 47 |
| Figura 3.10 – Vazamento acima do solo em ambiente aberto. | 47 |
| Figura 3.11 – Tubulação com válvulas, acessórios roscados e flange para transporte de LAV em ambiente aberto. | 48 |
| Figura 3.12 – Compressor ou bomba para operações com LAV em ambiente com ventilação adequada. | 49 |
| Figura 3.13 – Esferas de GLP, em ambiente aberto com ventilação adequada e sem sistema de dique de contenção. | 49 |
| Figura 3.14 – Vaso de pressão esférico em ambiente aberto. | 50 |
| Figura 4.1 – Regime de quebra de gotas. | 57 |
| Figura 4.2 – Regimes de colisão de gotas: (a) choque elástico; (b) coalescência; (c) separação de alongamento; (d) separação reflexiva. | 58 |
| Figura 4.3 – Acoplamento de duas vias para a abordagem Euleriana-Lagrangeana. | 60 |
| Figura 4.4 – Procedimento numérico para o modelo PSI-Cell em estado estacionário. | 61 |
| Figura 4.5 – Ângulo do spray. | 63 |
| Figura 4.6 – Distribuições de tamanho de partículas para diferentes parâmetros de espalhamento (n) com $d_m = 100 \mu\text{m}$ | 64 |
| Figura 4.7 – Diagrama esquemático do flash de um único estágio. | 65 |
| Figura 4.8 – Cálculo flash adiabático com as condições de alimentação conhecidas. | 66 |
| Figura 5.1 – Cenário de liberação. | 69 |
| Figura 5.2 – Esquema de uma fatia representativa do ambiente. | 70 |
| Figura 5.3 – Geometria de liberação bifásica. (a) vista frontal da geometria. (b) perspectiva isométrica da geometria. (c) detalhe do orifício de vazamento. | 70 |
| Figura 5.4 – Malha computacional de liberação bifásica; (a) vista frontal da malha; (b) perspectiva isométrica da malha; (c) detalhe do orifício de vazamento. | 71 |
| Figura 5.5 – Condições de contorno utilizadas. | 72 |
| Figura 5.6 – Injeção das partículas computacionais no domínio. | 73 |
| Figura 5.7 – Parametrização do tamanho do domínio. | 74 |
| Figura 5.8 – Fluxograma da metodologia utilizada. | 75 |
| Figura 5.9 – Fluxograma de processo utilizado para representação da liberação de misturas. | 76 |

| | |
|---|-----|
| Figura 5.10 – Geometria utilizada para situações de ventos com sentido contrário à liberação: (a) vista frontal da geometria; (b) perspectiva isométrica da geometria; (c) detalhe do orifício de vazamento..... | 76 |
| Figura 5.11 – Malha computacional do modelo para vento com sentido contrário à liberação. (a) vista frontal da malha; (b) perspectiva isométrica da malha; (c) detalhe do orifício de vazamento. | 77 |
| Figura 5.12 – Condições de contorno: (a) vento a favor; (b) vento contra..... | 77 |
| Figura 5.13 – Quadrado latino de ordem quatro..... | 80 |
| Figura 5.14 – LHS com dez pontos em um espaço bidimensional..... | 80 |
| Figura 6.1 – Perfis de concentração de gás propano para diferentes malhas. | 82 |
| Figura 6.2 – Efeito do número de partículas computacionais no tempo de simulação. . | 83 |
| Figura 6.3 – Concentração de gás propano ao longo da liberação. | 84 |
| Figura 6.4 – Temperatura do gás propano ao longo da liberação..... | 84 |
| Figura 6.5 – Distribuição de tamanho de partícula no orifício para liberação de propano: (a) fração mássica; (b) fração mássica acumulada. | 85 |
| Figura 6.6 – Perfis típicos para a gota de propano: (a) diâmetro; (b) massa; (c) taxa de evaporação; (d) temperatura; (e) velocidade; (f) regime de quebra. | 86 |
| Figura 6.7 – Perfis de velocidade próximo ao orifício de liberação..... | 87 |
| Figura 6.8 – Liberação bifásica de propano. | 88 |
| Figura 6.9 – Liberação bifásica de GLP. | 89 |
| Figura 6.10 – Influência do vento no comportamento da liberação. | 92 |
| Figura 6.11 – Influência do sentido e intensidade do vento no fator de risco: (a) e (b) vento e jato no mesmo sentido; (c) e (d) vento e jato em sentidos opostos. | 93 |
| Figura 6.12 – Análise da influência de inerte na liberação de GLP: (a) extensão da atmosfera explosiva; (b) volume da atmosfera explosiva; (c) limite inferior de explosividade da mistura GLP e CO ₂ | 94 |
| Figura 6.13 – Perfis de velocidade do C ₃ H _{8(l)} : (a) axial; (b) radial em x = 500 mm;..... | 96 |
| Figura 6.14 – Pontos obtidos pelo hipercubo latino para 100 casos de liberação de propano. | 97 |
| Figura 6.15 – Comportamento da extensão com a taxa de liberação de propano para os 100 casos simulados. | 98 |
| Figura 6.16 – Extensão em função da fração molar para a liberação de propano a 20,64 bar e 1,4 mm. | 98 |
| Figura 6.17 – Extensão em função da massa molecular do componente para liberação de propano a 15 bar e 1 mm. | 99 |
| Figura 6.18 – Extensões no LIE para liberação de propano..... | 100 |
| Figura 6.19 – Extensões em ½ LIE para liberação de propano. | 100 |
| Figura 6.20 – Pontos obtidos pelo hipercubo latino para os 300 casos de liberação de GLP. | 101 |
| Figura 6.21 – Extensões no LIE para liberação de GLP. | 101 |
| Figura 6.22 – Extensões em ½ LIE para liberação de GLP..... | 102 |
| Figura 6.23 – Casos simulados em CFD para liberação em torno de uma bomba limitado ao LIE. | 105 |
| Figura 6.24 – Casos simulados em CFD para liberação em torno de uma bomba limitado a ½ LIE. | 106 |
| Figura 6.25 – Casos simulados em CFD para liberação em torno de uma bomba limitado a ¼ do LIE. | 106 |

| | |
|--|-----|
| Figura 6.26 – Razões entre as extensões (normas/CFD) avaliadas no LIE para liberação em torno de uma bomba. | 107 |
| Figura 6.27 – Razões entre as extensões (normas/CFD) avaliadas em ½ LIE para liberação em torno de uma bomba. | 108 |
| Figura 6.28 – Razões entre as extensões (normas/CFD) avaliada em ¼ do LIE para liberação em torno de uma bomba..... | 108 |
| Figura 6.29 – Casos simulados em CFD para liberação em torno de um flange limitada ao LIE. | 109 |
| Figura 6.30 – Casos simulados em CFD para liberação em torno de um flange limitado a ½ LIE. | 109 |
| Figura 6.31 – Casos simulados em CFD para liberação em torno de um flange limitado a ¼ do LIE. | 110 |
| Figura 6.32 – Razões entre as extensões (normas/CFD) para liberação em torno de um flange no LIE. | 110 |
| Figura 6.33 – Razões entre as extensões (normas/CFD) para liberação em torno de um flange em ½ LIE. | 111 |
| Figura 6.34 – Razões entre as extensões (normas/CFD) para a liberação em torno de um flange em ¼ do LIE. | 111 |
| Figura 6.35 – Casos simulados em CFD para liberação em torno de um vaso de pressão no LIE. | 113 |
| Figura 6.36 – Casos simulados em CFD para liberação em torno de um vaso de pressão em ½ LIE. | 113 |
| Figura 6.37 – Casos simulados em CFD para liberação em torno de um vaso de pressão em ¼ do LIE. | 114 |
| Figura 6.38 – Razões entre as extensões (normas/CFD) para liberação em torno de um vaso de pressão no LIE. | 114 |
| Figura 6.39 – Razões entre as extensões (normas/CFD) para liberação em torno de um vaso de pressão em ½ LIE. | 115 |
| Figura 6.40 – Razões entre as extensões (normas/CFD) para liberação em torno de um vaso de pressão em ¼ do LIE. | 115 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|--|-----|
| Tabela 3.1 – Limites de explosividade para algumas substâncias..... | 31 |
| Tabela 3.2 – Composição típica de GLP em diferentes países..... | 39 |
| Tabela 3.3 – Magnitude da classificação de áreas em função do volume, pressão e vazão. | 46 |
| Tabela 4.1 – Constantes de Antoine para o propano e butano. | 56 |
| Tabela 4.2 – Constantes do modelo de quebra Reitz e Diwakar (1987). | 58 |
| Tabela 4.3 – Coeficientes de equivalência, K_k , para gases inertes em relação ao nitrogênio. | 68 |
| Tabela 5.1 – Especificações técnicas do servidor. | 73 |
| Tabela 5.2 – Propriedades do propano e butano..... | 78 |
| Tabela 5.3 – Composições nas condições de armazenamento para liberações de GLP com inerte. | 79 |
| Tabela 6.1 – Efeito do número de gotas computacionais nos resultados. | 82 |
| Tabela 6.2 – Dados e parâmetro da simulação. | 83 |
| Tabela 6.3 – Dados e parâmetro da liberação bifásica de GLP. | 89 |
| Tabela 6.4 – Alcanos utilizados na análise da influência da massa molecular do material inflamável na extensão da atmosfera explosiva. | 99 |
| Tabela 6.5 – Casos simulados para liberação em torno de uma bomba. | 104 |
| Tabela 6.6 – Casos simulados para liberação em torno de um vaso de pressão esférico. | 112 |
| Tabela 6.7 – Razões médias entre as extensões (normas/CFD) com seus respectivos desvios padrões..... | 116 |

LISTA DE QUADROS

| | |
|---|----|
| Quadro 3.1 – Conceito de classe para atmosfera explosiva. | 33 |
| Quadro 3.2 – Aplicações de GLP por setores..... | 40 |
| Quadro 3.3 – Níveis de abrangência das normas..... | 42 |
| Quadro 3.4 – Orientação para o desenvolvimento da Figura 3.11. | 48 |
| Quadro 3.5 – Orientação para o desenvolvimento da Figura 3.12. | 49 |
| Quadro 3.6 – Orientação para o desenvolvimento da Figura 3.13. | 49 |
| Quadro 4.1 – Equações para as variáveis r_{stable} e t_{br} para os regimes de quebra em bolsas e partes..... | 58 |

NOMECLATURA

| | |
|-----------|---|
| A, B, C | Constantes da equação de Antoine |
| A_s | Área de superfície da gota (m^2) |
| A_F | Área frontal da partícula (m^2) |
| C_d | Coefficiente de descarga |
| C_D | Coefficiente de arrasto |
| C_p | Capacidade calorífica a pressão constante (J/kgK) |
| d | Diâmetro (mm) |
| D | Coefficiente de difusão (m^2/s) |
| d_m | Diâmetro médio das gotas (μm) |
| F_v | Fração mássica de líquido vaporizada ao longo do vazamento |
| F_r | Somatório das forças que atuam sobre uma partícula (N) |
| h | Entalpia (J/kg) |
| h_e | Coefficiente de transferência de calor (W/m^2K) |
| h_{lv} | Calor latente de vaporização (J/kg) |
| LIE | Limite inferior de explosividade |
| L_p | Posição da gota (m) |
| m | Massa (kg) |
| n | Parâmetro de espalhamento |
| Nu | Número de Nusselt |
| P | Pressão (N/m^2) |
| P_{sat} | Pressão de saturação (Pa) |
| Pr | Número de Prandtl |
| Q_C | Taxa de transferência de calor convectiva (J/s) |
| Q_M | Taxa de transferência de calor associada à evaporação da gota (J/s) |
| S_E | Fonte de energia (J/m^3s) |
| Sh | Número de Sherwood |
| S_M | Fonte de momento (N/m^3) |
| S_{MS} | Fonte de massa (kg/m^3s) |
| T | Temperatura da fase gás (K) |
| t | Tempo (s) |
| t_{br} | Tempo característico de quebra (s) |
| T_b | Temperatura de ebulição (K) |

| | |
|---------------------|--|
| U | Velocidade (m/s) |
| v_{jato} | Velocidade do jato (m/s) |
| W_c | Massa molar do componente que sendo liberado (kg/mol) |
| W_G | Massa molar da mistura (kg/mol) |
| X | Fração molar |
| x_{flash} | Fração mássica que vaporiza no ambiente |
| Y | Fração mássica |
| x | Distância ao longo da linha central (m) |
| k | Energia cinética turbulenta por unidade de massa (m^2/s^2) |
| V_{slip} | Velocidade relativa (m/s) |
| r | Raio (m) |
| r_p | Raio de gota antes da quebra (m) |
| r_{stable} | Raio da gota estável após a quebra (m) |
| R | Constante dos gases (J/kgK) |
| Re | Número de Reynolds |
| We | Número de Weber |
| C_1, C_2, C_{s1} | Constantes do modelo de quebra de gota |
| V_m | Volume molar |

Letras Gregas

| | |
|--|--|
| Γ_{nM} | Difusividade de massa efetiva do componente n na mistura (kg/ms) |
| δ | Matrix identidade |
| ε | Taxa de dissipação turbulenta (m^2/s^3) |
| λ | Condutividade térmica da fase contínua (W/mK) |
| μ | Viscosidade dinâmica de fase contínua (kg/ms) |
| ξ | Tolerância |
| ρ | Massa específica da fase contínua (kg/m^3) |
| ρ_m | Massa específica da mistura bifásica (kg/m^3) |
| σ | Tensão superficial da interface líquido-gás (N/m) |
| τ | Tensor tensão (kg/ms^2) |
| θ | Ângulo do spray (graus) |
| ω | Taxa específica de dissipação de turbulência (1/s) |
| β, β^*, σ_k e σ_ω | Constante do modelo de turbulência SST- k- ω |

Subscritos

| | |
|-----|---------------------------|
| n | Componente |
| l | Fase líquida |
| o | Orifício |
| p | Partícula |
| res | Condições de reservatório |
| S | Superfície da partícula |
| Vap | Componente que evapora |
| M | Mistura |

Sobrescrito

| | |
|---|------------|
| T | Transposto |
| V | Vapor |

Siglas

| | |
|--------|---|
| ABNT | Associação Brasileira de Normas Técnicas |
| API | American Petroleum Institute |
| CEI | Italian Electrotechnical Commission |
| CFD | Computational Fluid Dynamics |
| CONTEC | Comissão de Normas Técnicas |
| DDM | Discrete Droplet Model |
| DNS | Direct Numerical Simulation |
| E-L | Euleriana-Lagrangeana |
| GLP | Gás Liquefeito de Petróleo |
| IEC | International Electrotechnical Commission |
| LDA | Laser-Doppler anemometry |
| LENP | Laboratório de Experimentação Numérica |
| LES | Large Eddy Simulation |
| LIF | Laser-Induced Fluorescence |
| NFPA | National Fire Protection Association |
| OISD | Oil Industry Safety Directorate |
| PDA | Phase-Doppler Anemometry |
| RANS | Reynolds Averaged Navier-Stokes |
| SI | Sistema Internacional de Unidades |

SUMÁRIO

| | |
|--|----|
| Capítulo 1 | 20 |
| Introdução..... | 20 |
| 1.1 Contextualização | 20 |
| 1.2 Justificativas | 21 |
| 1.3 Objetivos | 22 |
| 1.3.1 Geral..... | 22 |
| 1.3.2 Específico..... | 22 |
| 1.4 Estrutura da Tese | 23 |
| 1.5 Contribuições da Tese | 23 |
| Capítulo 2 | 25 |
| Estado da Arte | 25 |
| Capítulo 3 | 30 |
| Conceitos Fundamentais | 30 |
| 3.1 Limites de Inflamabilidade..... | 30 |
| 3.2 Ponto de Fulgor | 31 |
| 3.3 Atmosferas Explosivas | 31 |
| 3.4 Classificação de Área | 32 |
| 3.5 Fontes de Risco | 35 |
| 3.6 Extensão de Zonas..... | 36 |
| 3.7 Liberações Bifásicas..... | 38 |
| 3.8 Gás Liquefeito de Petróleo..... | 39 |
| 3.9 Conceito de Fator de Risco | 40 |
| 3.10 Normas Utilizadas para a Determinação de Áreas Classificadas..... | 41 |
| 3.10.1 Norma API-505 | 44 |
| 3.10.2 Norma NFPA 497..... | 46 |
| 3.10.3 Norma Petrobras N-2918 | 48 |
| 3.10.4 Norma OISD – 113 | 50 |
| Capítulo 4 | 51 |
| Modelagem..... | 51 |
| 4.1 Modelagem Matemática da Fase Contínua | 52 |
| 4.2 Modelagem Matemática da Fase Dispersa..... | 53 |
| 4.3 Modelo de Turbulência | 59 |

| | | |
|------------|---|-----|
| 4.4 | Acoplamento entre as Fases e Procedimento Numérico | 60 |
| 4.5 | Parâmetros Característicos do Spray | 61 |
| 4.5.1 | Estimativa da Vazão Mássica | 62 |
| 4.5.2 | Ângulo do Spray | 63 |
| 4.5.3 | Distribuição de Tamanho de Partícula | 63 |
| 4.6 | Evaporação Flash Binária..... | 64 |
| 4.6.1 | Flash Adiabático | 66 |
| 4.7 | Limite de Explosividade para Misturas..... | 67 |
| 4.7.1 | Limite de Explosividade para Misturas Contendo Gases Inertes | 67 |
| Capítulo 5 | | 69 |
| | Metodologia | 69 |
| 5.1 | Condições de Contorno | 71 |
| 5.2 | Definições Físicas do Problema | 72 |
| 5.3 | Parametrização do Domínio e Implementação das Simulações..... | 73 |
| 5.4 | Influência do Vento..... | 76 |
| 5.5 | Propriedades do Material | 78 |
| 5.6 | Liberação de GLP com Inerte | 78 |
| 5.7 | Planejamento dos Experimentos Computacionais | 79 |
| Capítulo 6 | | 81 |
| | Resultados e Discussões..... | 81 |
| 6.1 | Estudo de Independência de Malha..... | 81 |
| 6.2 | Análise do Número de Partículas Computacionais | 82 |
| 6.3 | Análise da Liberação Bifásica..... | 83 |
| 6.4 | Influência do Vento na Área Classificada..... | 89 |
| 6.5 | Análise do Fator de Risco | 92 |
| 6.6 | Liberação de GLP com Inerte | 93 |
| 6.7 | Validação do Modelo | 95 |
| 6.8 | Desenvolvimento de uma Equação para Estimativa da Extensão da Área Classificada | 97 |
| 6.9 | Comparação do Modelo em CFD com Normas Vigentes..... | 103 |
| 6.9.1 | Extensão da Área Classificada em Torno de uma Bomba..... | 103 |
| 6.9.2 | Extensão da Área Classificada em Torno de um Flange | 109 |
| 6.9.3 | Área Classificada em Torno de um Vaso de Pressão Esférico | 112 |
| Capítulo 7 | | 117 |
| | Conclusões | 117 |

| | | |
|-----|--------------------------------------|-----|
| 7.1 | Conclusões | 117 |
| 7.2 | Sugestões para Estudos Futuros | 118 |
| | Referências Bibliográficas | 119 |
| | Apêndice..... | 127 |

Capítulo 1

Introdução

1.1 Contextualização

Acidentes ocorridos em várias partes do mundo, tiveram como origem um equipamento elétrico indevidamente especificado para operar em uma área, cuja presença de substâncias inflamáveis no ambiente, criava condições especiais para a ocorrência destes acidentes (BOSSERT, 2001).

Desde o início da utilização da eletricidade pelas indústrias, no final do século XIX, equipamentos elétricos foram instalados em ambientes com presença de substâncias inflamáveis. Ainda nessa época, surgiram os primeiros debates sobre o potencial dos equipamentos elétricos se tornarem fontes de ignição de atmosferas explosivas. As máquinas elétricas tão necessárias para a indústria emergente também poderiam provocar explosões dentro de uma área industrial (ERTHAL, 2004).

Geralmente os gases são armazenados sob forma liquefeita, para que se possa ter uma grande massa armazenada em um volume relativamente pequeno. A armazenagem de gases em estado gasoso é inviável, devido a sua baixa densidade. Um gás pode ser mantido em estado líquido sob pressão a temperatura ambiente, nesse caso os reservatórios de armazenagem são vasos de pressão, ou podem ser liquefeitos, em pressão atmosférica, desde que mantidos em temperatura inferior ao seu ponto de ebulição. Nesses casos que são bem mais raros, os reservatórios de armazenagem não são considerados vasos de pressão (TELLES, 1996).

Gases como amônia, cloro, dióxido de enxofre, cloreto de vinila, propano, gás liquefeito de petróleo (GLP) condensam em líquidos à temperatura ambiente e sob

pressão moderada. Esses gases geralmente são transportados ou armazenados como gás liquefeito.

No caso de uma liberação acidental de gás liquefeito pressurizado, o produto liberado no ar ambiente é subitamente colocado sob condições de temperatura e pressão de forma que uma parte do líquido vaporiza violentamente. Este fenômeno é geralmente chamado de "flash". A vaporização súbita de uma parte do líquido leva à fragmentação do jato de líquido em gotas finas.

A mais recente versão da norma IEC 60079-10-1 (2015) em seu item 6.3.3 informa que liberações bifásicas como no caso de gás liquefeito de petróleo podem ocorrer, com vaporização parcial no ponto de vazamento, mas traz como conteúdo apenas a determinação da extensão para liberações monofásicas envolvendo gás.

As normas para classificação de área utilizadas por empresas (e.g. Petrobras) ou organizações internacionais (e.g. *American Petroleum Institute*) envolvendo o armazenamento e transporte de gases liquefeitos são baseadas no uso de figuras padronizadas que segundo Jordão (2002) pode induzir a erros por excesso, ou mesmo levar a uma falsa impressão de segurança, podendo dar margem a interpretação errônea, incorrendo em situação de risco.

Devido à alta complexidade do fenômeno de liberação bifásica que inclui a transferência simultânea de massa, momento e calor entre fases, fluidodinâmica computacional mostra-se uma importante ferramenta que pode ser utilizada no estudo de classificação de áreas.

1.2 Justificativas

Alguns acidentes são causados por falhas catastróficas (e.g. rompimento de uma tubulação), cuja possibilidade de ocorrência é remota. Porém, a ocorrência de pequenos vazamentos durante a operação normal de uma unidade é mais comum e pode se tornar precursora de acidentes de elevadas proporções caso não sejam observadas as condições mínimas de segurança para que tais vazamentos não entrem em contato com uma fonte de ignição e causem um incêndio ou explosão (CRUZ, 2012).

Algumas das principais normas frequentemente utilizadas nos estudos de classificação de áreas elaboradas por renomadas organizações como a API e NFPA utilizam distâncias fixas nas zonas em torno de fontes de risco. Segundo Cox (1989) essas distâncias fixas são subjetivas e, às vezes, levavam a inconsistências entre diferentes normas quando aplicadas à mesma situação.

A indústria em geral, mais particularmente a petroquímica, trabalha com condições de armazenamento e transporte de gás liquefeito que podem ocasionar liberações de jato bifásicos tipo *flashing*. Portanto o estudo desse tipo de liberação é de fundamental importância na área de segurança operacional nas instalações industriais.

O correto dimensionamento da área classificada é de fundamental importância para a segurança e deve ser realizado adequadamente, pois o sobredimensionamento causa o aumento nos custos (aquisição e manutenção de equipamentos à prova de explosão) sem nenhum benefício.

Os presentes trabalhos reportados na literatura (e.g. CALAY e HOLDO, 2008; LACOME et. al. , 2012 e COLDRICK, 2016) sobre liberação de gás liquefeito utilizando CFD têm o foco de reproduzir o fenômeno da liberação *flashing* em regiões próximas ao orifício. Porém nenhum estudo usando CFD como ferramenta para prever a extensão e volume de área classificada foi encontrado.

1.3 Objetivos

1.3.1 Geral

Avaliar as normas utilizadas para a classificação de áreas devido à presença de atmosfera explosiva resultante da liberação bifásica de gases liquefeitos armazenados sobre pressão.

1.3.2 Específico

- i. Definir a modelagem e simular a liberação bifásica tipo spray de gases liquefeitos inflamáveis puros e misturas em CFD utilizando o software comercial Ansys® CFX 16.1.
- ii. Analisar a influência do sentido e intensidade do vento na liberação bifásica.
- iii. Estudar a influência de inerte no dimensionamento da área classificada.
- iv. Validar o modelo com dados experimentais disponíveis.
- v. Desenvolver uma equação para o cálculo da extensão da área classificada.
- vi. Comparar os resultados obtidos do modelo em CFD com as normas: NFPA 497, API-505, N-2918 e OISD 113.

1.4 Estrutura da Tese

O presente trabalho é constituído de capítulos resumidamente descritos a seguir.

No capítulo 1 apresenta uma introdução do tema deste trabalho assim como justificativas, objetivos e contribuições.

O segundo capítulo traz o estado da arte de trabalhos relevantes ao tema da tese.

Conceitos fundamentais para o entendimento da classificação de áreas como também normas de segurança aplicadas a situações bifásicas onde liberações de gases liquefeitos possam ocorrer são apresentadas no capítulo 3.

No capítulo 4 são apresentadas as equações utilizadas no modelo fluidodinâmico com abordagem Euleriana-Lagrangeana, assim como outras equações utilizadas para obtenção das entradas necessárias para simulação do fenômeno de liberação bifásica.

No capítulo 5 é descrita a metodologia utilizada para implementação e parametrização do modelo de liberação *flashing* no pacote comercial Ansys® Workbench, assim como uso do software comercial de processo Aspen Plus® V.8.4 utilizado para liberação bifásica de misturas. Uma descrição a respeito do planejamento dos experimentos computacionais é realizada.

No capítulo 6 são apresentados os resultados onde pode-se destacar: a reprodução das características do fenômeno pelo modelo, comparação do modelo desenvolvido com as normas atualmente utilizadas, validação do modelo com dados experimentais, desenvolvimento de uma equação para estimativa da extensão da atmosfera explosiva e análises de liberações com inerte. As conclusões do trabalho e sugestões de estudos posteriores são apresentadas no capítulo 7.

1.5 Contribuições da Tese

Os estudos de classificação de áreas têm por finalidade básica mapear e determinar as extensões e a abrangência das áreas que podem conter misturas explosivas e, conseqüentemente, permitir a posterior especificação adequada de equipamentos e sistemas para cada tipo de área classificada mapeada por estes estudos (BULGARELLI, 2016).

As normas (e.g. NFPA 497, API-505, N-2918 e OISD 113) disponíveis para classificação de área, as quais abrangem o armazenamento de gases liquefeitos, baseiam-se no uso de figuras padronizadas, que são generalizadas.

A segurança da planta depende diretamente da seriedade com que é feita a classificação de áreas, sendo assim um estudo de classificação de áreas que simplesmente reproduza as figuras das normas não é confiável. Dessa forma, todos os desenhos de classificação de áreas obtidos por mera reprodução das figuras contidas nas normas não possuem qualquer credibilidade, o que acarreta problemas na especificação dos equipamentos elétricos e eletrônicos especiais como também nos procedimentos de segurança para execução de serviços naquelas regiões (RANGEL, 2015).

A partir dos resultados obtidos observou-se que em média para a maioria dos casos as distâncias das áreas classificadas apresentadas pelas normas para liberações envolvendo líquidos altamente voláteis são maiores que as obtidas via CFD. Resultados obtidos pelo modelo mostraram que em média as extensões das normas correspondem a uma concentração de $\frac{1}{4}$ do Limite Inferior de Explosividade (LIE).

A partir da parametrização do modelo e automatização das simulações, utilizando o Ansys[®] Workbench foi possível propor uma equação prática para a determinação da extensão da área classificada para o propano e GLP, tendo assim a vantagem da obtenção de uma resposta rápida, eliminando o elevado custo computacional requerido pelo CFD.

O estudo do efeito do vento no presente trabalho mostrou que para um aumento gradativo da intensidade do vento no mesmo sentido da liberação um aumento na extensão e uma redução no volume da atmosfera explosiva é constatado, reduzindo o risco de ignição. Para ventos no sentido oposto ao vazamento os seguintes resultados foram obtidos: (a) para ventos de baixas velocidades constatou-se um aumento na extensão e volume da atmosfera explosiva; (b) para um patamar de velocidades mais elevadas verificou-se a redução da extensão e volume; (c) com a inversão no sentido da pluma foi detectado um aumento de extensão com consequente redução de volume.

As simulações realizadas com inerte (CO₂) mostraram uma redução na extensão e volume da atmosfera explosiva, sendo essa redução ainda mais significativa em relação ao volume, comprovando a eficácia do uso de inertes para redução do risco de explosão. O principal efeito do inerte é no aumento do limite inferior de explosividade do componente reduzindo a extensão e volume da atmosfera explosiva.

Capítulo 2

Estado da Arte

Bricard e Friedel (1998) realizaram um levantamento do estado da arte para liberações bifásicas voltada para gases liquefeitos tóxicos e inflamáveis. Uma explicação teórica do fenômeno é realizada como também uma análise de modelos unidimensionais (e.g. WHEATLEY, 1986; IANELLO et al., 1989; EPSTEIN et al., 1990) e multidimensionais 2D e 3D (e.g. WURTZ et al., 1996; BARTZIS, 1991; GARCIA e CRESPO, 1997). As premissas, limitações e resultados de cada modelo relatado são descritos no trabalho, assim como comparações entre eles. Uma breve descrição é realizada contendo diversos experimentos (e.g. SCHUMANN et al., 1997; NIELSEN e OTT, 1996) reportados na literatura para medição de importantes variáveis como: velocidade, concentração, temperatura e tamanho de partícula. Para os modelos 1-D a hipótese de equilíbrio homogêneo (velocidades e temperatura iguais para ambas as fases) na liberação é a consideração frequentemente usada. Os autores ressaltam a importância da formulação das equações de *entrainment*¹ utilizadas nos modelos unidimensionais, sendo essa a principal diferença encontrada entre eles.

Witlox (2002) realiza uma das mais completas revisões bibliográficas disponíveis na literatura a respeito de liberações bifásicas de gases inflamáveis abordando aspectos teóricos e modelos disponíveis característicos do tema como: transferência de massa e calor, atomização da fase líquida, turbulência, *entrainment* e distribuição de tamanho de partículas. Em relação a modelos de colisão de gotas, o autor afirma a falta de evidências da precisão dos modelos desenvolvidos. No estudo recomenda-se o uso de técnicas experimentais para compreensão do fenômeno as quais são: PDA (*Phase-Doppler*

¹ De acordo com Falcone e Caltado (2003) *entrainment* é a entrada de um fluido, geralmente em um escoamento invíscido, no jato turbulento.

Anemometry), LDA (*Laser-Doppler Anemometry*) e LIF (*Laser-Induced Fluorescence*) para a obtenção das variáveis: tamanho de partícula, velocidade e temperatura, respectivamente.

Polanco et al. (2010) realiza uma revisão completa do estado da arte para liberação bifásica de gases liquefeitos, explicando detalhadamente aspectos teóricos envolvendo a termodinâmica e fluidodinâmica do fenômeno, na parte numérica relata que o modelo mais frequentemente utilizado é o DDM (*Droplet Discrete Model*) sendo as equações para a fase contínua tratadas como um campo Euleriano. Modelos matemáticos para a turbulência do tipo RANS (*Reynolds-Averaged Navier–Stokes*) são mais utilizados para reprodução do fenômeno devido ao reduzido custo computacional quando comparado com os modelos DNS (*Direct Numerical Simulation*) e LES (*Large Eddy Simulation*). A distância onde a temperatura alcança o seu valor mínimo (*Minimum Temperature Distance* - MTD) é um importante parâmetro que caracteriza a liberação *flashing* e, para qualquer liberação, está localizada entre $150 < x/d_0 < 170$.

Björnham (2016) propôs um modelo unidimensional de liberação bifásica para que o mesmo sirva de fonte para modelos de dispersão gasosa aplicadas a liberação de substâncias tóxicas. Algumas das premissas assumidas no trabalho foram: (a) os efeitos do solo são desconsiderados; (b) gás ideal; (c) sem ocorrência de chuva. Os resultados do modelo são: área da secção transversal da região de dispersão, densidade da mistura (gás e ar), temperatura e a distância da fonte até o início da zona de dispersão.

Anjos (2018) propôs uma metodologia para o cálculo da extensão da área classificada para liberação bifásica de gases liquefeitos utilizando o modelo de liberação bifásica descrito a partir dos estudos realizados por Fauske e Epstein (1988) e das correlações apresentadas em Bosch e Weterings (2005) e Kukkonen (1990), a hipótese de equilíbrio homogêneo foi adotada, e assim, obteve-se a extensão da região bifásica. A extensão da região de dispersão onde existe apenas gás foi obtida a partir da abordagem proposta por Long (1963) para jato turbulento subsônico, assim a extensão da área classificada consiste na soma da extensão da região bifásica com a extensão monofásica avaliada no Limite Inferior de Explosividade (LIE) ou em uma fração correspondente (e.g. $\frac{1}{2}$ LIE).

Cox (1989) realiza um completo estudo sobre classificação de áreas, uma análise das principais normas utilizadas para classificação de áreas mostrou que as distâncias das zonas em torno de fontes de risco são subjetivas e, às vezes, levavam a inconsistências

entre diferentes normas quando aplicados à mesma situação. A pesquisa contempla um levantamento e aplicação de modelos matemáticos disponíveis na literatura para estimativa da emissão e dispersão de liberações de material inflamável na forma de jatos: gasosos, líquidos e bifásicos e também para situações com formação de poça. Um levantamento sobre informações relativas aos tipos de equipamentos e acessórios, frequência de liberação e tamanho de orifício é realizada possibilitando o desenvolvimento de um modelo para estimativa da frequência de ignição.

Modelos de liberação frequentemente utilizados em software de análises de risco e classificação de área utilizam a abordagem com pseudocomponente onde a mistura é assumida como tendo uma composição constante em todo o modelo e se comportando como um único componente. As propriedades da mistura são calculadas a partir das propriedades do componente obtida através de uma equação de mistura ideal. O erro de uma abordagem de pseudocomponente varia de acordo com o intervalo de volatilidade do componente, a não idealidade da mistura e do próprio modelo. Para reduzir os erros causados pela abordagem do uso de pseudocomponente Witlox et al. (2006) propôs uma metodologia para obtenção das propriedades de sistemas multi-componente para liberações bifásicas baseado em equações de estado (Soave-Redlich-Kwong e Peng-Robinson). Esta metodologia foi implementada nos softwares de avaliação de riscos: PHAST e SAFETI. Os resultados são consideravelmente mais precisos do que a abordagem simplista de pseudocomponente.

Kelsey (1999) realizou simulações em CFD da liberação de um spray evaporativo de metanol usando uma abordagem Euleriana-Lagrangeana. No estudo dois códigos comerciais foram utilizados: CFX e STAR-CD. O trabalho aborda as vantagens e desvantagens dos dois softwares utilizados, a partir da comparação dos resultados com dados de experimentos realizados por McDonell e Samuelson (1995) os autores concluem que: (i) as simulações reproduziram com acurácia o comportamento experimental da liberação spray; (ii) os casos utilizando diferentes números de gotas computacionais mostraram pouca diferença nos resultados calculados; (iii) os modelos de transferência de calor e massa das gotas produziram o comportamento teórico esperado.

Aamir e Watkins (2000) realizaram a modelagem e simulação em CFD da liberação de propano. O trabalho consiste de um modelo 2D axissimétrico usando uma abordagem Euleriana-Lagrangeana, a distribuição de Rosin-Rammler para tamanho de partícula é utilizada na saída do orifício. Modelos modificados de colisão e quebra de

gotas são usados para modelar a liberação spray. Os resultados obtidos para os perfis radiais de velocidade e tamanho de partículas são comparados com dados experimentais reportados por Hervieu e Veneau (1996) e Allen (1998b).

Kelsey (2001) realizou a modelagem de liberação bifásica de propano utilizando o código comercial de CFD STAR-CD, os resultados mostraram boa concordância com dados experimentais de velocidade e tamanho de partícula, o modelo de quebra de gota de Reitz e Diwakar (1987) mostrou-se essencial para a validação do modelo.

Um modelo em CFD do cenário pós-flashing de um jato emergindo de um orifício circular foi desenvolvido por Calay e Holdo (2008). A distribuição de Rosin-Rammler para tamanho de partícula foi utilizada, a turbulência foi modelada com o modelo k- ϵ . Em seu trabalho são analisados parâmetros como: velocidade, diâmetro de partícula, distribuição de tamanho de partícula, fração vaporizada. A partir dos resultados obtidos via CFD obteve-se as seguintes conclusões: (a) a velocidade de liberação pode ser calculada com base na equação de Bernoulli, isto é justificado na maioria dos casos para pequenos vazamentos *flashing* que inicialmente começa nos cantos do jato considerando que o núcleo do jato se propaga como um líquido sendo esta suposição realista para estes casos; (b) a condição de equilíbrio homogêneo com velocidade iguais para ambas as fases na liberação pode ser adotada; (c) a fração mássica vaporizada pode ser calculada usando expansão adiabática para as condições atmosféricas.

Lacome et al. (2012) desenvolveu um modelo em CFD para a liberação bifásica de butano através de um orifício circular. O trabalho se concentra especialmente no efeito do processo de vaporização no jato. Um modelo de equilíbrio termodinâmico para vaporização foi desenvolvido. Os resultados obtidos mostram que o perfil de temperatura obtido no jato spray teve boa concordância quando comparado com dados experimentais.

Coldrick (2016) realizou a modelagem em CFD da liberação de propano utilizando uma abordagem Euleriana-Lagrangeana, os parâmetros característicos para este tipo de liberação como: diâmetro de gota, vazão mássica e velocidade foram obtidos por meio do software DNV PHAST, os resultados dos perfis de temperatura e velocidade axial são comparados com os modelos analíticos disponíveis nos seguintes softwares: DRIFT 3.7.2, Phast 6.7 e QUADVENT 1.9.9.17 e validados com dados experimentais (ALLEN, 1995).

Tommasini (2013) faz uso de CFD para comparar o volume hipotético obtido pela norma IEC 60079-10-1 (2003), o volume obtido por essa versão da norma chega a ser

dezenas de vezes maior que o obtido via CFD, resultados semelhantes a partir de fluidodinâmica computacional foram obtidos nos estudos conduzidos por: Souza (2016) e Gant e Ivings (2005).

Souza (2016) realizou estudos via fluidodinâmica direcionados a classificação de áreas envolvendo liberações gasosas, resultados obtidos mostraram que a norma IEC (2008) sobredimensionava a área classificada, um novo método para classificação de área é proposto considerando a influência do vento. Uma equação baseada em resultados de CFD para a obtenção da extensão da área classificada é proposta. Análises 3D em CFD mostraram que o efeito da gravidade não influencia o jato. A partir de resultados de simulações com vento variando o sentido (a favor e contra o vazamento) mantendo fixa a velocidade quando comparado com a situação sem vento observou-se que: (i) na condição de vento a favor foi verificado um aumento na extensão com redução no volume da pluma; (ii) na condição de vento contrária foi detectado um aumento na extensão e no volume da área classificada.

Allen (1998a) conduziu um experimento em pequena escala para liberação bifásica de propano para obtenção de perfis de velocidades para isso a técnica de LDA para obtenção dos perfis de velocidade de gotas, a instalação do experimento é constituída por: vaso para o armazenamento do propano, sistema de liberação, equipamento de medição, câmara onde o experimento foi montado e o sistema de extração para evitar o acúmulo de gás inflamável. O perfil axial e perfis radiais ao longo do jato são obtidos. A mesma instalação descrita em Allen (1998a) foi utilizada para obtenção da distribuição de tamanho de gotas para a liberação bifásica de propano, sendo a técnica de medição PDA utilizada como descrito em Allen (1998b).

Tommasini (2013) desenvolveu uma equação para o cálculo da extensão da área classificada baseada na teoria da dispersão turbulenta de jato turbulento circular, o modelo teórico produz distância cerca de 30 % maiores que as obtidas por meio de experimentos.

Diante do conteúdo exposto no presente capítulo sobre o tema, verificou-se a ausência de estudos de liberações bifásicas de gases liquefeitos aplicados a classificação de áreas, dado que nenhum trabalho foi encontrado na literatura. Constatou-se também há inexistência de estudos em CFD para avaliar as normas vigentes que são altamente criticadas por estudiosos em classificação de áreas por serem consideradas muito conservadoras. Apenas equações simplificadas para liberações gasosas foram encontradas.

Capítulo 3

Conceitos Fundamentais

3.1 Limites de Inflamabilidade

Segundo Escalante (2016) limite de inflamabilidade ou explosividade é o intervalo de concentração no qual a substância inflamável pode produzir fogo ou explosão quando uma fonte de ignição está presente. Especificamente, o limite de inflamabilidade é classificado em dois tipos (ZHAO, 2011): (a) o Limite Superior de Explosividade (LSE), onde a mistura possui baixa concentração de oxigênio, sendo assim muito rica em combustível para queimar; (b) o Limite Inferior de Explosividade (LIE), abaixo do qual o oxigênio, na mistura, está em excesso e o combustível é muito pobre para queimar.

Para ambos os casos (LSE e LIE) não se consegue a propagação da chama. A Figura 3.1 ilustra os conceitos apresentados para ambos os limites.

Figura 3.1 – Ilustração limites de explosividade.



As substâncias que possuem faixas de inflamabilidade amplas apresentam maior risco, quando comparadas com outras que possuem faixas de inflamabilidade menores, pois, no caso de liberação para a atmosfera, o tempo de permanência com a mistura inflamável será tanto maior quanto maior for a faixa de inflamabilidade da substância, considerando-se as mesmas condições de liberação em ambos os casos (JORDÃO, 2002). A Tabela 3.1 apresenta os limites de explosividade para algumas substâncias.

Tabela 3.1 – Limites de explosividade para algumas substâncias.

| Substância | LIE (%) | LSE (%) |
|-------------------|----------------|----------------|
| Propano | 2,2 | 9,5 |
| Butano | 1,9 | 8,4 |
| Metano | 5,0 | 15 |

Fonte: Cheremisinoff e Davletshina (1998).

3.2 Ponto de Fulgor

É a menor temperatura na qual, sob determinadas condições normalizadas, um líquido libera vapor em quantidade suficiente para ser capaz de formar uma mistura inflamável ar/vapor (CRUZ, 2012).

Portanto, para avaliar se um líquido irá gerar risco deve-se comparar seu ponto de fulgor com a temperatura na qual o mesmo é armazenado, manipulado ou processado. Se o ponto de fulgor é mais alto que a temperatura de processo não há a formação de uma atmosfera explosiva, e conseqüentemente, a área será não classificada.

3.3 Atmosferas Explosivas

Os riscos de explosão podem aparecer em qualquer indústria em que as substâncias inflamáveis sejam manipuladas, estas incluem inúmeras matérias-primas, produtos intermediários e acabados, como também nos resíduos gerados pelo processo. Assim, o risco da presença de uma atmosfera explosiva abrange os mais diversos processos e procedimentos de trabalho, afetando quase todos os ramos de atividade (IBARS e TORRENT, 2005).

Denomina-se substância inflamável o material que é inflamável por si mesmo ou que é capaz de produzir um gás, vapor ou névoa inflamável. As substâncias inflamáveis

incluem: líquidos inflamáveis, gases ou vapores inflamáveis, gases liquefeitos e névoa inflamável (IEC 60079-10-1, 2015).

Segundo a norma IEC 60079-10-1 (2015) atmosfera explosiva pode ser definida como a mistura com ar, sob condições atmosféricas, de substâncias inflamáveis na forma de gás, vapor, poeira, fibras, ou partículas suspensas os quais, após a ignição, permitem autossustentação da propagação.

3.4 Classificação de Área

Segundo a norma IEC 60079-10-1 (2015) área classificada é aquela na qual uma atmosfera explosiva de gás está presente ou é esperada para estar presente em quantidades tais que requeiram precauções especiais para a construção, instalação e utilização de equipamentos.

Segundo Erthal (2004) área classificada consiste de um espaço tridimensional no qual uma atmosfera explosiva pode estar presente, requerendo precauções para controle das fontes de ignição e cuidados especiais dos trabalhadores. Desta maneira, tendo em vista o resultado da classificação de área, é possível estabelecer os requisitos construtivos dos equipamentos elétricos que estarão dentro dessa região, tornando-os aptos para operar nessa circunstância.

Entretanto, conforme a IEC 60079-10-1 (2015), não é objetivo da classificação de áreas proteger contra liberações maiores de materiais inflamáveis causadas por falhas catastróficas, tais como, ruptura de vasos de pressão, de dutos ou tanques.

A classificação baseia-se no grau de periculosidade da substância combustível manipulada e na frequência de formação da atmosfera potencialmente explosiva. Visando a padronização dos procedimentos de classificação das áreas de risco, cada país adota as recomendações de normas técnicas. No Brasil a ABNT utiliza a coletânea de normas técnicas da IEC (*International Electrical Commicion*), que trata da classificação de áreas no volume IEC-79-10 (SENAI, 2015).

A partir desses estudos de classificação de áreas, deve ser assegurado que a especificação e a instalação dos equipamentos atendam aos requisitos de risco da área, em conformidade com os requisitos das respectivas normas técnicas aplicáveis. Sendo assim, o projeto, operação ou locação dos equipamentos de processo deve assegurar que, mesmo quando operando anormalmente, a quantidade de material inflamável ou

combustível liberado seja minimizada, de modo a reduzir a extensão da área classificada (BULGARELLI, 2009).

3.4.1 Classificação de Área de Acordo com Práticas Americanas

Os ambientes onde há chances da presença de materiais inflamáveis são divididos em três classes, considerando se o material inflamável está na forma de gás ou vapor, poeira ou fibra como ilustrado no Quadro 3.1.

Quadro 3.1 – Conceito de classe para atmosfera explosiva.

| | |
|------------|-----------------|
| Classe I | Gases e Vapores |
| Classe II | Poeiras |
| Classe III | Fibras |

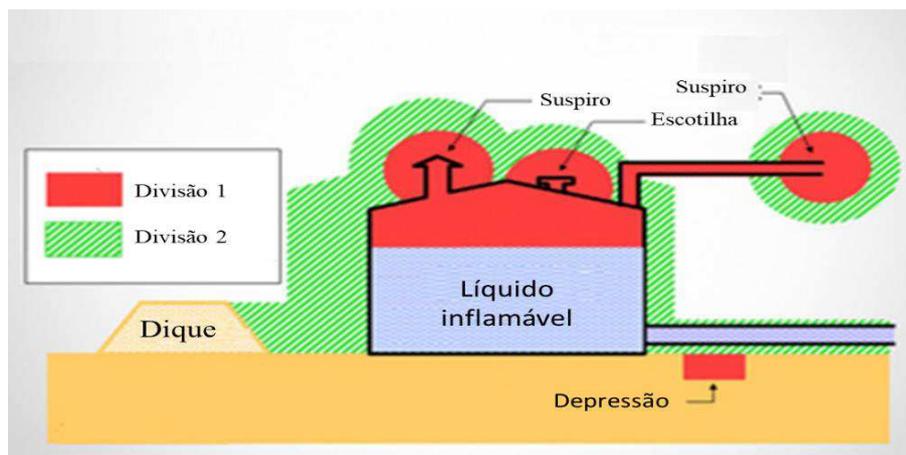
Para uma avaliação qualitativa do grau de risco alguns normas utilizam o conceito de divisão ao invés de zonas, conceito esse originado de normas americanas. De acordo com a norma NFPA (2017) o conceito de divisão para a atmosfera explosiva na presença de gases e vapores inflamáveis é definida como:

- i) **Divisão 1** – Área onde é provável a ocorrência de uma mistura inflamável em condições normais.
- ii) **Divisão 2** – Área onde é provável a ocorrência apenas em condições anormais.

A Figura 3.2 indica a classificação de áreas em torno de um tanque de acordo com as práticas americanas.

Depressão é um local abaixo do nível do solo selado com grades para possibilitar acesso ao sistema de tubulações como também a motores elétricos instalados nestes locais, nesses pontos a probabilidade de ocorrência de acumulação de gás inflamável é elevada.

Figura 3.2 – Classificação de áreas em torno de um tanque de acordo com as práticas americanas.



Adaptado de: Schosker (2013).

Conforme aponta Jordão (2002), para áreas de classe 1 e divisão 1, os gases ou vapores inflamáveis podem existir:

- a) Continuamente, intermitente, ou periodicamente em condições normais de operação do equipamento de processo.
- b) Frequentemente, devido a vazamentos provocados por reparos de manutenção frequentes.
- c) Quando o defeito em um equipamento de processo ou operação incorreta do mesmo provoca, simultaneamente, o aparecimento de mistura explosiva e uma fonte de ignição de origem elétrica.

Pode-se citar como exemplo de ambientes incluídos nessa classe os seguintes:

- i) Locais onde líquidos inflamáveis ou gases liquefeitos inflamáveis são transferidos de um recipiente para outro.
- ii) Locais contendo tanques ou reservatórios de líquidos inflamáveis abertos para a atmosfera.
- iii) Salas de geradores a gás e outros compartimentos de indústrias de processamento de gás.

3.4.2 Classificação de Área de Acordo com a Norma Internacional

Ao contrário de classificar os ambientes em classes, a norma internacional especifica o tipo de equipamento em grupos, como:

- a) **Grupo I:** grupo dos equipamentos feitos para operar em mineração subterrânea.

b) **Grupo II:** grupo dos equipamentos fabricados para operar na superfície.

As áreas perigosas são classificadas em zonas com base na avaliação da frequência da ocorrência e duração de uma atmosfera de gás explosivo, da seguinte forma:

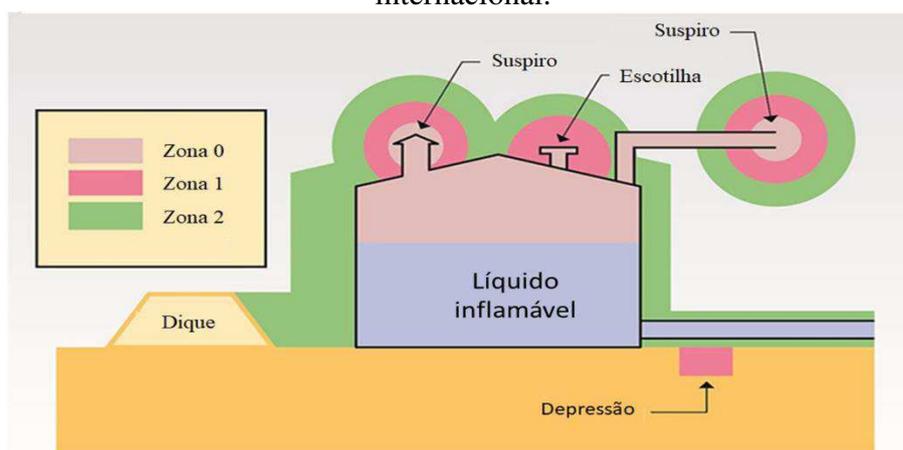
- **Zona 0:** Área na qual uma atmosfera gasosa explosiva está presente continuamente, ou está presente por longos períodos.
- **Zona 1:** Área na qual uma atmosfera gasosa explosiva tem probabilidade de ocorrer em operação normal.
- **Zona 2:** Área na qual uma atmosfera gasosa explosiva não é provável ocorrer em operação normal, porém se ocorrer, será por um período curto.

Várias fontes tentaram colocar limites de tempo para essas zonas, mas nenhuma delas foi oficialmente adotada. Os valores mais comuns utilizados são (HSE, 2018):

- **Zona 0:** Atmosfera explosiva por mais de 1000 h/ano.
- **Zona 1:** Atmosfera explosiva para mais de 10 h/ano, mas menos de 1000 h/ano.
- **Zona 2:** Atmosfera explosiva por menos de 10 h/ano, mas ainda é suficientemente provável para exigir controles sobre fontes de ignição.

A Figura 3.3 mostra a classificação de áreas em torno de um tanque de acordo com a norma internacional.

Figura 3.3 – Classificação de áreas em torno de um tanque de acordo com a norma internacional.



Adaptado de: Schosker (2013).

3.5 Fontes de Risco

De acordo com a norma internacional (IEC 60079-10-1, 2015) fonte de risco é o ponto ou local no qual um gás, vapor, névoa ou líquido pode ser liberado para a atmosfera de modo que uma atmosfera explosiva de gás possa ser formada.

Se for estabelecido que o equipamento possa liberar material inflamável para a atmosfera, é necessário, em primeiro lugar, determinar o grau de risco de liberação de acordo com as definições, estabelecendo a frequência e a duração da liberação. Deve ser reconhecido que a abertura de partes de sistemas de processo fechados (por exemplo, durante troca de filtros) deve também ser considerada fonte de risco quando da elaboração da classificação de áreas (SOARES et al., 2015).

Existem basicamente três graus de risco relacionados a fontes, conforme relacionado a seguir, em ordem decrescente em relação à probabilidade de a atmosfera explosiva de gás estar presente (IEC 60079-10-1, 2015):

- I) **Fonte de risco de grau contínuo** - liberação que é contínua ou é esperada para ocorrer frequentemente ou por longos períodos.
- II) **Fonte de risco de grau primário** - liberação que pode ser esperada para ocorrer periodicamente ou ocasionalmente durante operação normal.
- III) **Fonte de risco de grau secundário** - liberação que não é esperada para ocorrer em operação normal e, se ocorrer, é somente de forma pouco frequente e por curtos períodos.

3.6 Extensão de Zonas

A extensão de zonas depende da distância estimada ou calculada sobre a qual uma atmosfera explosiva de gases inflamáveis exista antes que esta possa se dispersar no ar para uma concentração abaixo do seu limite inferior de explosividade, com um fator apropriado de segurança que está compreendido entre um intervalo de 1 - 0,5 (IEC 60079-10-1, 2015).

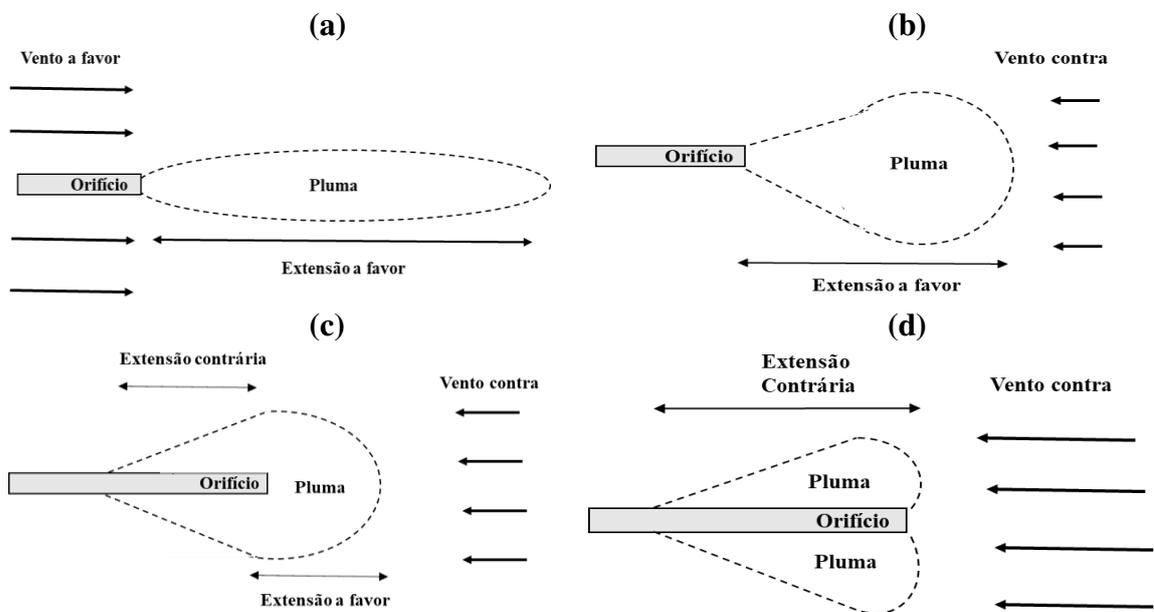
Segundo a norma internacional, a extensão da zona é principalmente afetada por parâmetros químicos e físicos, alguns dos quais são propriedades intrínsecas do material inflamável e outros são específicos do processo. Por simplicidade, o efeito de cada parâmetro descrito a seguir considera que os outros parâmetros permaneçam inalterados.

- a) **Taxa de liberação** - Quanto maior for a taxa de liberação do material inflamável, maior será a extensão da área classificada. A taxa de liberação por sua vez depende dos seguintes parâmetros: geometria da fonte de risco, velocidade de liberação, concentração, volatilidade de um líquido inflamável e temperatura do líquido.

- b) **Limite inferior de explosividade** - Para um dado volume liberado, quanto menor o LIE, maior é a extensão da zona.
- c) **Condições climáticas** - A taxa de dispersão de gás ou vapor na atmosfera é influenciada pelo vento.

O sentido e a intensidade do vento (ar puro) podem afetar o comportamento do jato e conseqüentemente a extensão da pluma, a Figura 3.4 ilustra as diferentes situações que podem ocorrer (Mannan, 2005). Na situação onde o vento possui o mesmo sentido da liberação a pluma segue o comportamento descrito na Figura 3.4a, devido a extensão ter o mesmo sentido da liberação esta foi denominada de extensão a favor. Na Figura 3.4b o sentido do vento é contrário a liberação como pode ser verificado pelo achatamento da pluma, porém para essa situação o momento do vento não é suficiente para deslocar a pluma no sentido contrário e a extensão da pluma continua sendo a extensão a favor, para um patamar de velocidade mais elevado o vento provocará uma inversão parcial criando uma situação onde a pluma terá também uma extensão no sentido oposto ao da liberação denominada de extensão contrária, como ilustrado na Figura 3.4c. Para velocidades do vento mais elevadas ocorrerá uma inversão da pluma sendo a tendência de que apenas a extensão contrária exista como mostrado na Figura 3.4d.

Figura 3.4 – Comportamento da atmosfera explosiva para liberações com vento.



3.7 Liberações Bifásicas

O estudo e compreensão do fenômeno da liberação bifásica (líquido e gás) de matérias inflamáveis é de fundamental importância para a classificação de áreas. O presente trabalho tem foco no estudo da liberação de gases liquefeitos sobre pressão, portanto a abordagem teórica para este cenário será abordada.

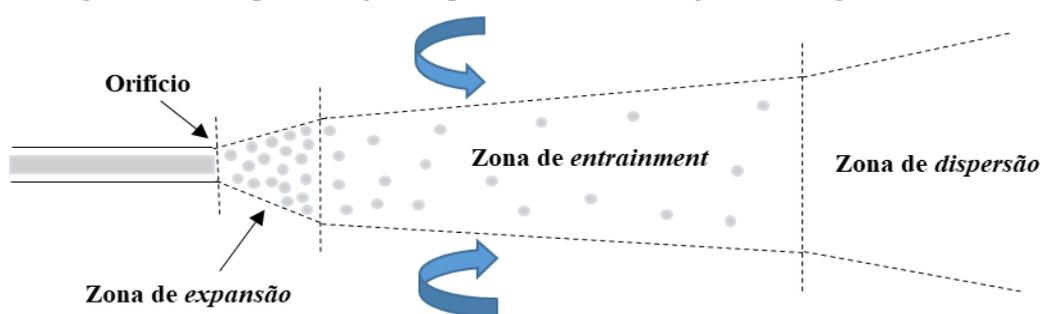
Segundo Bosch e Weterings (2005) gás liquefeito pressurizado pode ser definido como uma substância química no estado líquido que está em equilíbrio termodinâmico com seu próprio vapor sob a pressão de saturação em uma determinada temperatura, superior a pressão atmosférica. Gases são armazenados e transportados sob a forma de líquidos sobre pressão para facilitar o armazenamento em grandes quantidades como exemplo tem-se o gás liquefeito de petróleo (GLP) amplamente utilizado na indústria e em aplicações domésticas.

O fenômeno *flashing* é caracterizado pela quebra violenta do líquido pressurizado em pequenas gotículas, que ocorre quando um líquido superaquecido entra em contato com o ambiente (temperatura atmosférica e pressão) no ponto de liberação (CALAY e HOLDO, 2008). Este tipo de vazamento pode ocasionar há formação de uma atmosfera explosiva sendo necessário a classificação da área.

Um esquema resumido do processo *flashing* é apresentado na Figura 3.5. Na zona de expansão o fluido expande-se devido a diferença entre a pressão do orifício e a pressão atmosférica. Nessa etapa ocorre a atomização primária sendo constituída por gotas de tamanho maior.

Na zona de *entrainment* o ar entra em contato com o jato que está a uma temperatura menos elevada ocasionando a evaporação das gotas. Na zona de dispersão existe apenas vapor, onde a evaporação total do líquido acontece na etapa anterior (LACOME et al., 2012).

Figura 3.5 – Representação esquemática da liberação *flashing* no ambiente.



Fonte: Adptado de Lacome et al. (2012).

O processo de quebra das gotas formadas em gotas menores na zona de *entrainment* é conhecido como atomização secundária e acontece assim que é atingido o número de Weber crítico.

A localização do *flashing* depende da geometria do orifício, das condições de estocagem e das propriedades do líquido. O processo *flashing* pode ocorrer fora do orifício, mas pode-se iniciar no orifício fenômeno esse denominado de cavitação (EL-KHOLY, 2009), ocorrendo geralmente quando o comprimento do orifício é maior que 10 vezes o diâmetro do mesmo (McMILLAN, 1998). A quebra do líquido em gotas para a liberação *flashing* é resultado de dois mecanismos de quebra aerodinâmica e térmica.

Após a liberação algumas gotas de diâmetros grande podem imediatamente cair (chover), processo esse denominado de *rainout*, outras podem mover-se sob a ação da gravidade e da força de arraste enquanto vaporizam e posteriormente podem sofrer o processo de *rainout*, e algumas gotas podem permanecer na pluma. A fração de líquido que chove e a fração que permanece é de grande relevância, pois a situação que pode ocasionar maior risco ocorre quando toda a fase líquida permanece suspensa servindo como fonte de geração de vapor, proporcionando, assim, a taxa máxima de vapor possível para a pluma (BRITTER et al., 2011).

3.8 Gás Liquefeito de Petróleo

Define-se como gás liquefeito de petróleo, GLP, a mistura formada, em sua quase totalidade, por moléculas de carbono e hidrogênio (hidrocarbonetos) de três a quatro átomos de carbono que, embora gasosos nas condições normais de temperatura e pressão (CNTF), podem ser liquefeitos por resfriamento e/ou compressão.

O GLP é incolor e, desde que tenha baixo teor de enxofre, é inodoro. A composição de GLP em todo o mundo inclui misturas de propano e butano, a composição típica de GLP para diferentes países é descrita pela Tabela 3.2.

Tabela 3.2 – Composição típica de GLP em diferentes países.

| País | Propano/Butano (%) |
|-------------|---------------------|
| Bélgica | 60/40 |
| Grécia | 20/80 |
| Reino Unido | 100/0 |
| Portugal | 92/8 |
| Brasil | *Proporção variável |

Fonte: European LPG Association (2017); *Petrobras (2018).

O uso do GLP na forma líquida foi proposto por Walter Snelling em 1911, quando este produziu propano e butano liquefeitos e propôs um sistema de armazenamento e distribuição destes combustíveis (PETROBRAS, 2018).

A principal aplicação do GLP, em nível mundial, é no cozimento de alimentos, representando no Brasil cerca de 80% do consumo deste derivado. O GLP também é utilizado como matéria prima em diversos segmentos mostrados no Quadro 3.2.

Quadro 3.2 – Aplicações de GLP por setores.

| Setor | Aplicações |
|------------------------|---|
| Siderúrgico | Fundição, corte e solda de metais (custo menor que o acetileno, seu competidor); |
| Petroquímico | Fabricação de borracha, polímeros, álcoois e éteres; |
| Combustível industrial | Indústria de vidros (moldagem, solda e acabamento), indústria cerâmica (queima e secagem), indústria de papel e celulose (secagem) e indústria alimentícia; |
| Agropecuário | Secagem de grãos, controle de pragas e queima ervas daninhas, aquecimento e esterilização de ambiente de criação de animais; |

Fonte: Petrobras (2018).

A relação entre o volume do GLP gasoso e líquido é de cerca de 250, o que faz com que o GLP comprimido e liquefeito ocupe pouco espaço. Manter um gás pressurizado com uma redução de volume de cerca de 250 vezes, requer o uso de recipientes que aguentem a pressão superior a necessária para essa compressão (1500 kPa ou 15 kgf/cm²). No caso de pequenas liberações acidentais nesses recipientes ou tubulações e conexões que transporte o GLP há um elevado risco de acidente.

3.9 Conceito de Fator de Risco

A partir do estudo de classificação de áreas realizados, pode-se afirmar que a probabilidade de ocorrência de explosões depende de 3 fatores:

- I - A probabilidade de vazamento, formando uma nuvem explosiva, que é fornecida pelo fabricante do acessório ou unidade que contém a substância inflamável;
- II - A probabilidade do equipamento elétrico emitir uma centelha, que possa iniciar a combustão, que é fornecida pelo fabricante do equipamento elétrico;
- III - A probabilidade da ignição atingir a nuvem explosiva, isto é, a probabilidade de ocorrência de ignição dentro da nuvem explosiva.

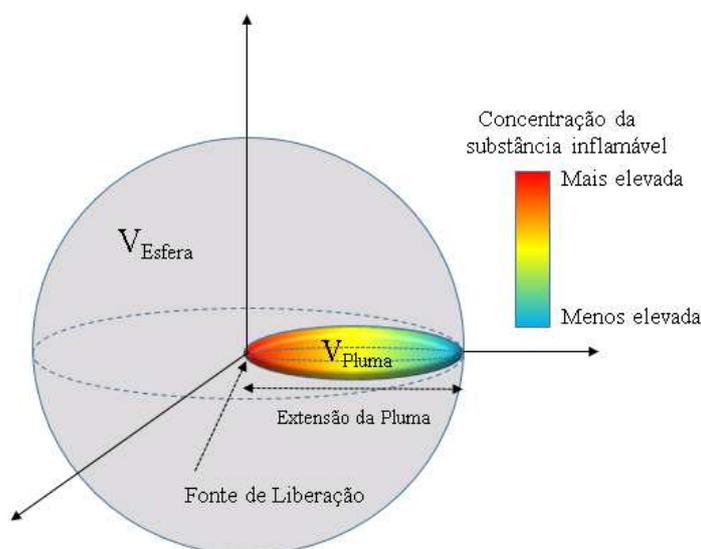
O fator de risco representa a probabilidade da nuvem explosiva encontrar a ignição. O cálculo deste fator de risco apenas é possível via CFD, uma vez que esse fator depende do volume da nuvem explosiva dentro da esfera definida pela extensão da área classificada, também calculada via CFD.

O fator de risco (F_{risco}) é definido como a razão entre o volume da pluma (V_{Pluma}) obtido nas simulações e o volume da esfera (V_{Esfera}) obtido tomando como raio a extensão da pluma em uma dada concentração (e.g. LIE ou $\frac{1}{2}$ LIE) de acordo com a Equação (3.1).

$$F_{risco} = \frac{V_{Pluma}}{V_{Esfera}} \quad 3.1$$

O volume da pluma é muito menor do que o volume da esfera como ilustrado na Figura 3.6.

Figura 3.6 – Representação gráfica do fator de risco.



3.10 Normas Utilizadas para a Determinação de Áreas Classificadas

Por muitos anos, uma enorme quantidade de tempo e dinheiro foi empregada por governos, instituições de normalização e pela própria indústria com o objetivo de estabelecer regras claras para a classificação de áreas e aplicação de equipamentos elétricos nestas áreas (McMillan, 1998). Desta forma, o resultado é que muitas situações apresentam riscos similares, mas são classificadas de maneiras completamente diferentes por diversos grupos encarregados deste trabalho. Felizmente, esta situação longe do ideal não tem causado maiores acidentes, o que é atribuído principalmente ao fato de que as soluções têm sido muito mais para o lado conservador, superdimensionado não somente

a extensão da área classificada bem como a utilização de equipamentos elétricos especiais nessas áreas acarretando em um aumento significativo de custos (JORDÃO, 2002).

Levando em consideração que a classificação de áreas não é uma ciência exata, que depende de fatores externos até mesmo de caráter subjetivo, a determinação da forma e extensão das áreas classificadas torna-se uma tarefa difícil (JORDÃO, 2002).

Segundo Cox et al. (1990) a classificação de áreas foi desenvolvida de forma independente, com muitas filosofias e conhecimentos diferentes, sendo que até hoje inexistente uma prática comum. Na verdade, as normas foram desenvolvidas por diferentes entidades, ao longo do tempo, e possuem suas próprias especificidades. A normalização técnica em níveis de abrangência é mostrada no Quadro 3.3.

Quadro 3.3 – Níveis de abrangência das normas.

| | |
|---------------|--|
| Empresa | É o nível de menor abrangência, tendo em vista que as normas técnicas da empresa têm que cuidar especificadamente da atividade fim da empresa. |
| Nacional | A norma técnica é aquela que foi elaborada e publicada por um organismo para aquele fim e tem validade nacional. |
| Estrangeira | A norma técnica estrangeira é uma norma elaborada em outro país diferente do que está sendo aplicada, onde no país de origem possui abrangência em nível nacional. |
| Regional | A norma técnica regional é aquela que tem validade para um determinado grupo de países. |
| Internacional | Neste caso tem-se que a norma técnica de maior abrangência, tendo em vista que o objetivo principal é o de produzir normas que sejam aceitas universalmente. |

Fonte: Jordão (2002).

A respeito da classificação de áreas, existem várias normas que abordam o assunto. O Quadro 3.4 descreve exemplos de normas elaborados por empresas e entidades internacionais.

Quadro 3.4 – Exemplos de normas utilizadas na classificação de áreas.

| Origem | Abreviação | Título | Desenvolvedor |
|--------|-----------------|---|---|
| EUA | API-505 | Recommended Practice for Classification of Locations for Electrical Installations at Petroleum Facilities Classified as Class I, Zone 0, Zone 1, and Zone 2. | American Petroleum Institute (API) |
| EUA | NFPA 497 | Recommended Practice for the Classification of Flammable Liquids, Gases, or Vapours and of Hazardous (Classified) Locations for Electrical Installations in Chemical Process Areas. | National Fire Protection Association |
| Suíça | IEC 60079-10-1 | Explosive atmospheres Part 10-1: Classification of areas – Explosive gas atmospheres. | International Electrotechnical Commission |
| Itália | GUIDA CEI 31-35 | Explosive atmospheres – Guide for classification of hazardous areas for the presence of gas in application of CEI EN 60079-10-1 (CEI 31-87): examples of application. | CEI – Italian Electrotechnical Commission |
| Brasil | N-2918 | Atmosferas Explosivas - Classificação de Áreas. | CONTEC - Comissão de Normalização Técnica (Petrobras) |
| Índia | OISD 113 | Classificação de Áreas para Instalações Elétricas em Processamento e Manipulação de Hidrocarbonetos. | Diretório de Segurança da Indústria de Petróleo |

Considerando as normas descritas no Quadro 3.4 as normas: NFPA 497, API-505, N-2918 e OISD 113, baseadas em figuras pré-estabelecidas são as que podem ser aplicadas para estudos de classificação de áreas onde a atmosfera explosiva é proveniente da liberação bifásica de gases liquefeitos.

O uso de figuras padronizadas ainda é o procedimento mais adotado para o dimensionamento de áreas classificadas pela suposta simplicidade de se usar o exemplo mais aproximado do equipamento em questão e transpor o contorno e a forma da sua extensão para o objeto em estudo (JORDÃO, 2002).

Segundo Uzeda (2002), desenhos de classificação de áreas genéricos, com a simples transposição de figuras orientativas devem ser evitados. Os desenhos, sempre que possível, devem conter a identificação dos equipamentos e adequação das figuras à planta

representada. Essa prática permite a visualização das particularidades das plantas, o que facilita a “comunicação” dos desenhos. Sempre que possível, desenhos em corte da planta devem ser elaborados, o que inibe a possibilidade de erros de interpretação.

3.10.1 Norma API-505

A norma API-505 elaborada pelo *American Petroleum Institute* (API) uma associação comercial que representa o setor de petróleo dos Estados Unidos, contando com mais de 625 membros, dentre eles companhias do setor de produção, exploração e refino de petróleo. O API mantém em torno de 700 normas, muitas foram adotadas por órgãos estaduais e federais e também são as normas mais citadas por entidades internacionais.

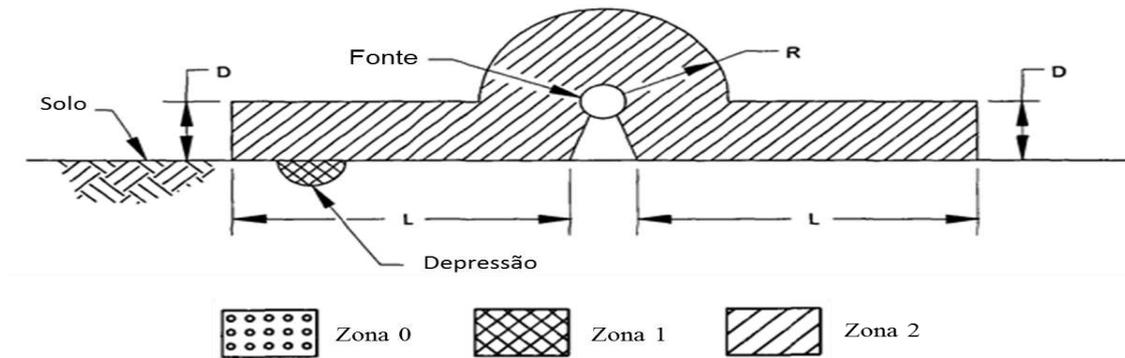
As figuras disponíveis na API 505, utilizadas para classificação de área, como por exemplo a mostrada na Figura 3.7, são apresentadas de forma genérica sem especificar que substâncias, pressões ou vazões levaram às distâncias mostradas para aquelas áreas classificadas, como também em que concentração corresponde as distâncias de áreas classificadas em torno das figuras.

Para seleção das figuras para as normas analisadas, utilizou-se como critério de seleção que o ambiente seja aberto e que o equipamento possa transportar ou armazenar líquidos inflamáveis altamente voláteis (LAV) como por exemplo:

- i. Butano;
- ii. Etano;
- iii. Etileno;
- iv. Propano;
- v. Propileno;
- vi. Gás natural liquefeito.

A Figura 3.7 ilustra a classificação de área em torno de uma bomba ou compressor manipulando líquidos inflamáveis ou altamente voláteis. As distâncias R, L e D indicadas são descritas no quadro em anexo, dependendo das condições de operação e da categoria do fluido.

Figura 3.7 – Áreas classificadas em torno de uma bomba ou compressor manipulando líquidos inflamáveis ou altamente voláteis.

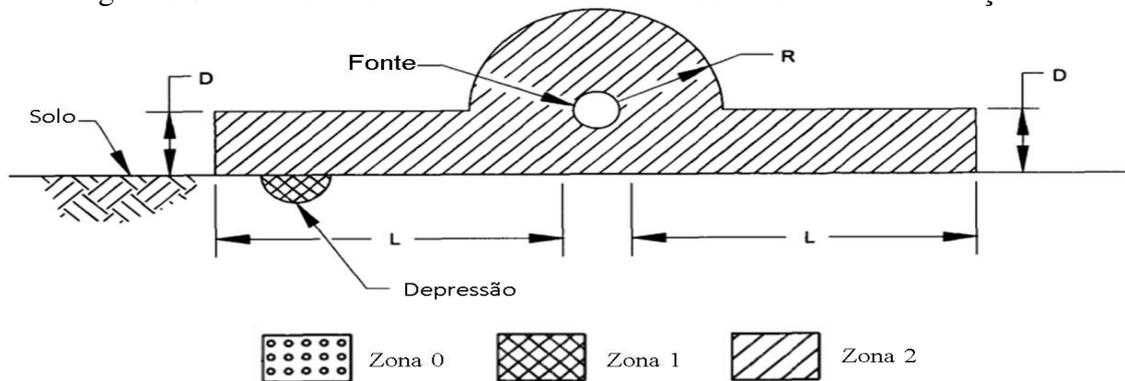


| Nível | Descrição | Distância (m) | | |
|-------|------------------------------|---------------|-----|---|
| | | L | R | D |
| 1 | Líquido a 1900 kPa ou menos. | 3 | 1 | 6 |
| 2 | Líquido acima de 1900 KPa. | 15 | 7,5 | 6 |
| 3 | LAV | 30 | 7,5 | 6 |

Fonte: API 505 (1997).

A Figura 3.8 mostra a área classificada ao redor de tubulações com válvulas, conexões roscadas, flanges ou acessos similares que manipulam líquidos inflamáveis ou altamente voláteis.

Figura 3.8 – Áreas classificadas em torno de acessórios em uma tubulação.



| Nível | Descrição | Distância (m) | | |
|-------|------------------------------|---------------|---|---|
| | | L | R | D |
| 1 | Líquido a 1900 kPa ou menos. | 3 | 1 | 6 |
| 2 | Líquido acima de 1900 kPa. | 3 | 1 | 6 |
| 3 | LAV | 6 | 3 | 6 |

Fonte: API 505 (1997).

As distâncias fornecidas nas figuras disponíveis na API-505 são aplicáveis a indústria de petróleo. O uso dessas figuras para outros ramos industriais acarreta uma classificação de área não confiável.

3.10.2 Norma NFPA 497

A norma NFPA 497 criada pela NFPA (*National Fire Protection Association*) uma organização global sem fins lucrativos sediada nos Estados Unidos, criada em 1896, dedicada à eliminação de danos a pessoas e propriedades devido a incêndios, riscos elétricos e relacionados.

A NFPA 497 é aplicada para as indústrias químicas em geral. Assim como a API 505 esta norma realiza o dimensionamento da área classificada através de figuras padronizadas.

Diferentemente da API 505 que não especifica em que condições de operação os equipamentos apresentados nas figuras são aplicáveis, a norma NFPA 497 considera as condições de operação e o porte do equipamento para a determinação das extensões de áreas classificadas como ilustrado na Tabela 3.3.

Tabela 3.3 – Magnitude da classificação de áreas em função do volume, pressão e vazão.

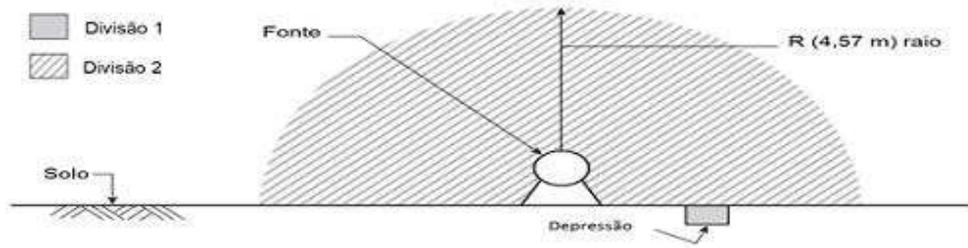
| Equipamento | Unidade | Pequeno/Baixo | Moderado | Grande/Alto |
|--------------------|---------------------|----------------------|-----------------|--------------------|
| Volume | m ³ | <19 | 19 – 95 | >95 |
| Pressão | kgf/cm ² | <7 | 7 – 35 | >35 |
| Vazão | m ³ /h | <23 | 23 – 114 | >114 |

Fonte: NFPA 497 (2017).

O procedimento para se determinar a extensão da área classificada utilizando a NFPA 497 consiste no enquadramento do equipamento em estudo para se determinar: volume, pressão e vazão de operação como médio, baixo ou alto de acordo com a Tabela 3.3, dispondo dessa informação consulta-se uma tabela de correspondência anexa com cada figura disponível na norma.

As Figuras 3.9 e 3.10 típicas da NFPA 497 são utilizadas para classificação de áreas envolvendo um líquido inflamável, um gás inflamável liquefeito ou comprimido ou um líquido criogênico inflamável. As distâncias apresentadas nas figuras da presente norma são para materiais combustíveis avaliadas nos seus respectivos limites inferiores de explosividade.

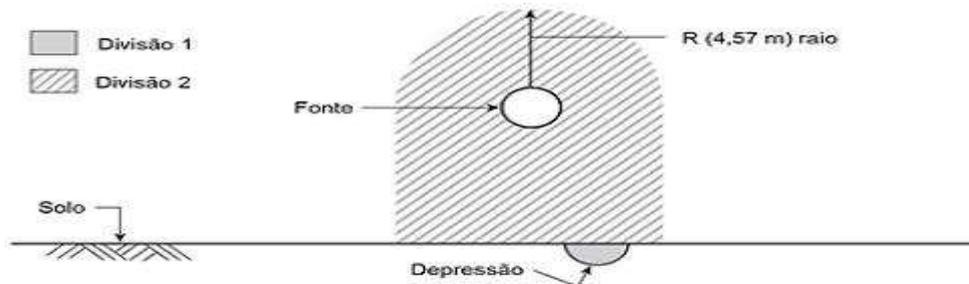
Figura 3.9 – Vazamento no solo em ambiente aberto.



| | Pequeno / baixo | Moderado | Grande/alto |
|------------------------------------|-----------------|----------|-------------|
| Tamanho do equipamento de processo | X | X | |
| Pressão | | X | X |
| Vazão | X | X | |

Fonte: NFPA 497 (2017).

Figura 3.10 – Vazamento acima do solo em ambiente aberto.



| | Pequeno/baixo | Moderado | Grande/alto |
|------------------------------------|---------------|----------|-------------|
| Tamanho do equipamento de processo | X | X | |
| Pressão | | X | X |
| Vazão | X | X | |

Fonte: NFPA 497 (2017).

A Figura 3.9 é utilizada para liberações quando o equipamento está localizado no solo, sendo a Figura 3.10 utilizada quando se tem vazamentos acima do solo.

3.10.3 Norma Petrobras N-2918

A norma N-2918 da Petrobras para classificação de áreas assim como as normas americanas mostradas anteriormente utilizam figuras pré-definidas para casos específicos.

As figuras de referência utilizada na N-2918 tiveram como origem estudos desenvolvidos e consolidados por normas estrangeiras, internacionais e pela experiência prática da Petrobras desenvolvida desde os primeiros estudos sobre o tema (N-2918, 2017).

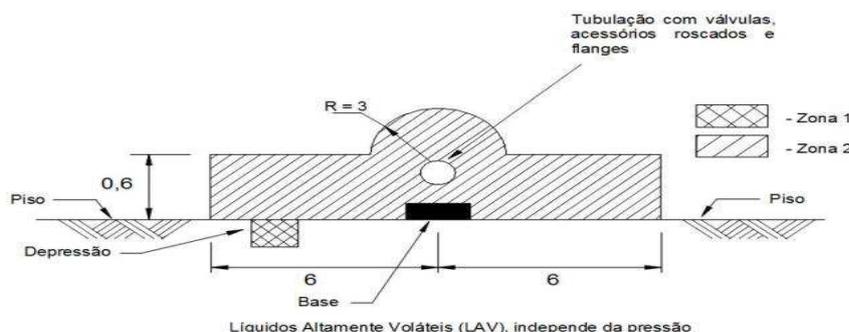
As figuras disponíveis por esta norma são aplicáveis a indústria petroquímica onde gases e líquidos inflamáveis, líquidos altamente voláteis (LAV) ou poeiras combustíveis são produzidos, processados, manuseados, armazenados, transportados e submetidos à operações de carregamento e descarregamento.

As distâncias das zonas apresentadas na norma como mostrado nas Figuras: 3.11, 3.12 e 3.13 se estende em qualquer direção da fonte de risco ao ponto onde a mistura gás e ar, ou poeira e ar, tenha sido diluída no ambiente para um valor abaixo de 25 % do LIE.

Quadro 3.4 – Orientação para o desenvolvimento da Figura 3.11.

| Magnitude relativa da fonte de risco | | | |
|--------------------------------------|----------------------|----------|------|
| | Baixa | Moderada | Alta |
| Volume | X | X | X |
| Pressão | X | X | X |
| Vazão | X | X | X |
| Ventilação | Adequada | | |
| Tipo de fluido | LAV | | |
| Densidade relativa | Maior do que a do ar | | |

Figura 3.11 – Tubulação com válvulas, acessórios roscados e flange para transporte de LAV em ambiente aberto.



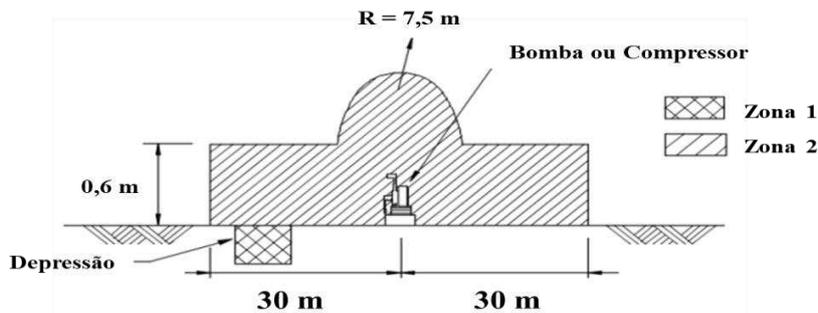
NOTA As medidas estão em metros.

Fonte: N-2918 (2017).

Quadro 3.5 – Orientação para o desenvolvimento da Figura 3.12.

| Magnitude relativa da fonte de risco | | | |
|--------------------------------------|----------------------|----------|------|
| | Baixa | Moderada | Alta |
| Volume | | | X |
| Pressão | | X | X |
| Vazão | | | X |
| Ventilação | Adequada | | |
| Tipo de fluido | LAV | | |
| Densidade relativa | Maior do que a do ar | | |

Figura 3.12 – Compressor ou bomba para operações com LAV em ambiente com ventilação adequada.

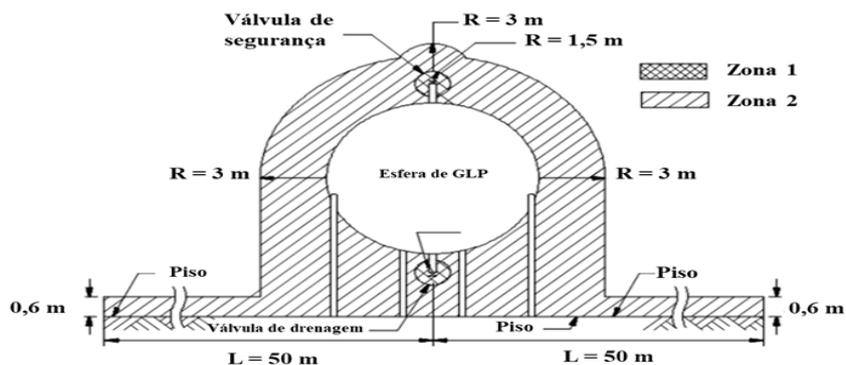


Fonte: N-2918 (2017).

Quadro 3.6 – Orientação para o desenvolvimento da Figura 3.13.

| Magnitude relativa da fonte de risco | | | |
|--------------------------------------|----------------------|----------|------|
| | Baixa | Moderada | Alta |
| Volume | | X | X |
| Pressão | X | X | |
| Vazão | | X | X |
| Ventilação | Adequada | | |
| Tipo de fluido | LAV (GLP) | | |
| Densidade relativa | Maior do que a do ar | | |

Figura 3.13 – Esferas de GLP, em ambiente aberto com ventilação adequada e sem sistema de dique de contenção.



Fonte: N-2918 (2017).

3.10.4 Norma OISD – 113

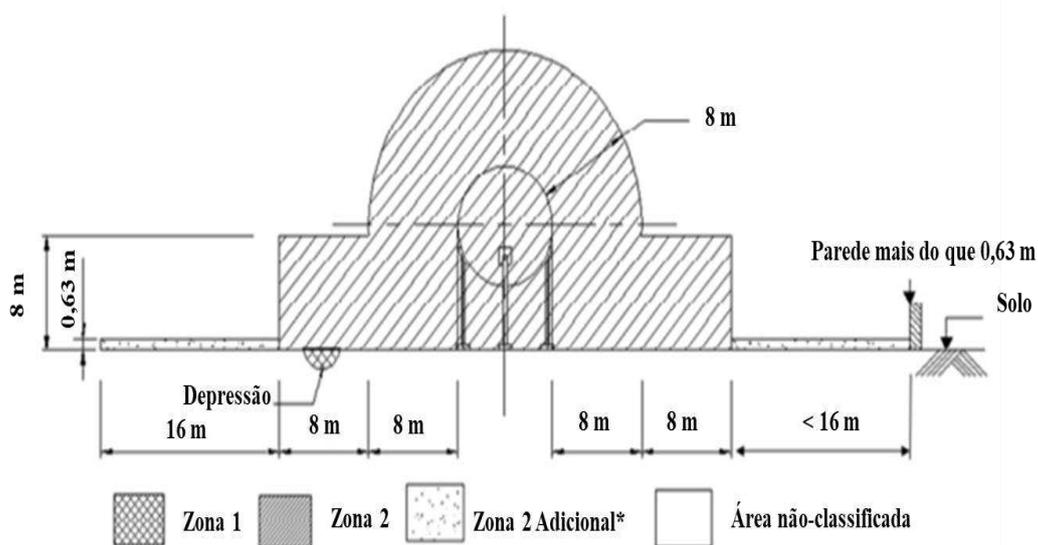
A Norma OISD – 113 intitulada classificação de áreas para instalações elétricas em processamento e manipulação de hidrocarbonetos foi preparada pelo comitê de classificação de áreas para instalações elétricas sendo este subordinado ao diretório de segurança da indústria de petróleo órgão vinculado ao ministério de petróleo e gás natural da Índia.

Esta norma faz parte de uma série de normas elaboradas pelo governo indiano para indústria de petróleo e tem como base a experiência adquirida em mais de um século.

A OISD – 113 é aplicável à classificação de áreas para instalações elétricas em processamento *onshore*, envolvendo o armazenamento, transporte e o manuseio de líquidos, vapores ou gases inflamáveis, incluindo estações de bombeamento e processamento de gás/óleo. Para o propósito desta norma, a área é uma região ou espaço tridimensional. A presente norma não é aplicada a operações *offshore*.

A área classificada em torno de uma esfera contendo GLP presente na OISD-113 é ilustrada na Figura 3.14. Assim como a norma americana API-505, a norma indiana OISD – 113 não informa em que concentração (LIE ou fração do LIE) corresponde as distâncias de áreas classificadas em torno das figuras apresentadas.

Figura 3.14 – Vaso de pressão esférico em ambiente aberto.



Fonte: OISD – 113 (2012).

Capítulo 4

Modelagem

Para a representação efetiva do complexo fenômeno de liberação bifásica adotou-se a abordagem Euleriana-Lagrangeana (E-L), onde a fase contínua (gás) é resolvida a partir de um referencial Euleriano e o movimento da fase dispersa (líquida) na fase contínua é calculado separadamente pelo rastreamento Lagrangeano de partículas computacionais, sendo obtido por um conjunto de equações diferenciais ordinárias no tempo para cada gota, consistindo em equações para: posição, velocidade, temperatura e massa, que são integradas para calcular o comportamento da gota no ambiente.

Para o fluxo multifásico disperso, o modelo E-L é mais preciso do que a abordagem Euleriana-Euleriana (E-E), uma vez que contém menos pressupostos em sua derivação, fornecendo uma transferência de massa e calor mais precisas (BENYAHIA e GALVIN, 2010). Além desse fato na abordagem E-E gotas de diferentes tamanhos são descritas como fases diferentes tratadas como fluidos contínuos e interpenetrantes. Para liberações bifásicas tipo spray onde os tamanhos das gotas são diferentes (polidisperso) um elevado número de fases para fornecer uma representação adequada do fenômeno é necessário, assim como cada fase adicional requer a adição de um conjunto de equações o custo computacional para resolução do problema seria muito elevado.

Uma limitação geral da abordagem E-L é o elevado custo computacional do rastreamento de um grande número de partículas, sendo assim usa-se um limitado número de partículas computacionais assumindo ter a mesma trajetória e tamanho de um grupo de gotas reais. Geralmente também é restrito a partículas esféricas e fluxos diluídos com uma fração volumétrica da fase dispersa abaixo de 10% (PERSSON, 2013). Embora as partículas tenham um diâmetro associado, elas são modeladas como pontos móveis, de modo que não ocupam volume do fluido contínuo.

4.1 Modelagem Matemática da Fase Contínua

As Equações (4.1- 4.5) representam a conservação: da massa, espécies, momento e energia para a fase contínua com a adição de termos fontes devido a interação com a fase dispersa (ANSYS, 2015).

I. Equação da continuidade

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{U}) = S_{MS} \quad 4.1$$

II. Conservação de massa por espécie

$$\frac{\partial(\rho Y_n)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{U} Y_n) = \nabla \cdot (\Gamma_{nM} \nabla Y_n) + S_{MSn} \quad 4.2$$

III. Equação de momento

$$\frac{\partial(\rho \mathbf{U})}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{U} \otimes \mathbf{U}) = -\nabla p + \nabla \cdot \tau + S_M \quad 4.3$$

Onde o vetor de tensão é relatado com uma taxa de deformação dada pela seguinte equação:

$$\tau = \mu \left(\nabla \mathbf{U} + (\nabla \mathbf{U})^T - \frac{2}{3} \delta \nabla \cdot \mathbf{U} \right) \quad 4.4$$

IV. Conservação da energia

$$\frac{\partial(\rho h)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{U} h) = \nabla \cdot (\lambda \nabla T) + \tau : \nabla \mathbf{U} + S_E \quad 4.5$$

onde ρ é a densidade, Y_n é a fração mássica do componente n , Γ_{nM} é a difusividade de massa efetiva do componente n na mistura, λ é a condutividade térmica, h é a entalpia,

$\boldsymbol{\tau}$ é o tensor tensão, μ é viscosidade dinâmica, t é o tempo, \boldsymbol{U} é o vetor velocidade da fase contínua, p é a pressão, T é a temperatura e o termo $\boldsymbol{\tau} : \nabla \boldsymbol{U}$ é a dissipação viscosa. Os termos fontes (S_{MS} , S_{MSi} , S_M , S_E), são usados para incluir as contribuições da evaporação das espécies, momento e energia de evaporação da fase dispersa. A ocorrência de uma possível condensação da fase contínua não é prevista pelo modelo.

4.2 Modelagem Matemática da Fase Dispersa

4.2.1 Equação do Movimento

As forças que atuam sobre uma partícula em uma fase dispersa podem ser descritas pela equação de movimento (segunda lei de Newton):

$$m_p \frac{d\boldsymbol{U}_p}{dt} = \boldsymbol{F}_r \quad 4.6$$

onde \boldsymbol{F}_r representa o somatório das possíveis forças que atuam sobre a partícula, m_p e \boldsymbol{U}_p são a massa e a velocidade da partícula, respectivamente.

Levando em consideração um problema axissimétrico, em estado estacionário e a densidade da fase dispersa consideravelmente maior que a fase contínua é possível considerar apenas a força de arrasto (NOHLÅS e TRYGGVADOTTIR, 2015), como mostrada na Equação 4.7.

$$F_d = \frac{1}{2} C_D \rho A_p |\boldsymbol{U} - \boldsymbol{U}_p| (\boldsymbol{U} - \boldsymbol{U}_p) \quad 4.7$$

onde C_D é o coeficiente de arrasto, A_p é a área projetada da partícula.

O coeficiente de arrasto é calculado de acordo com a correlação proposta por Schiller-Naumann (1933) como mostrado na Equação 4.8, sendo esta correlação comumente utilizada em modelos de liberação de jatos bifásicos tipo spray (e.g. AAMIR & WATKINS, 2000; KELSEY, 1999) devido a sua simplicidade e boa concordância com dados experimentais.

$$\left\{ \begin{array}{ll} C_D = \frac{24}{Re} (1 + Re^{0,687}) & Re \leq 1000 \\ C_D = 0,44 & Re > 1000 \end{array} \right\} \quad 4.8$$

O número de Reynolds (Re) é calculado a partir da Equação 4.9.

$$Re = \frac{\rho V_{slip} d_p}{\mu} \quad 4.9$$

onde V_{slip} é a velocidade relativa entre as fases definida por $|\mathbf{U} - \mathbf{U}_p|$ e d_p é o diâmetro da gota.

A posição da gota é obtida pela integração da velocidade da gota:

$$\frac{dL_p}{dt} = \mathbf{U}_p \quad 4.10$$

onde L_p é a posição da gota.

4.2.2 Balanço de Energia

A equação do balanço de energia, que rege a temperatura da gota, negligenciando a transferência de calor por radiação, é dada pela Equação (4.11).

$$m_p C_p \frac{dT_p}{dt} = Q_C + Q_M \quad 4.11$$

onde T_p é a temperatura da gota, Q_C e Q_M são respectivamente a taxa de transferência de calor convectiva e a associada a evaporação da gota.

A transferência de calor convectiva é dada por:

$$Q_C = A_s h_e (T - T_p) \quad 4.12$$

onde A_s é a área de superfície da gota, T é a temperatura do gás que compõe a fase contínua e h_e é o coeficiente convectivo de transferência de calor calculado de acordo com a Equação (4.13).

$$h_e = \frac{\lambda Nu}{d_p} \quad 4.13$$

onde Nu é o número de Nusselt.

O número de Nusselt (Nu) é dado pela correlação proposta por Ranz e Marshall (1952):

$$Nu = 2(1 + 0,3Re^{1/2}Pr^{1/3}) \quad 4.14$$

onde $Pr = Cp\mu/\lambda$, é o número de Prandtl.

A transferência de calor associada à evaporação da gota é dada por:

$$Q_M = h_{lv} \frac{dm_p}{dt} \quad 4.15$$

sendo h_{lv} o calor latente de vaporização.

No presente trabalho a hipótese na qual baseia-se o método da capacitância global é assumida, assim a temperatura dentro da gota é considerada espacialmente uniforme e depende apenas do tempo, esta simplificação é válida em situações que o número de Biot ($Bi = h_{erp}/\lambda_i$) é muito menor que a unidade ($Bi < 0,1$), ou seja, a resistência a condução no interior da gota é muito menor que a resistência a convecção através da camada limite do gás (STIESCH, 2003).

4.2.3 Modelo de Evaporação de Partícula

O modelo de evaporação da fase dispersa usa duas correlações de transferência de massa dependendo se a gota está acima ou abaixo do ponto de ebulição (ANSYS, 2015). A Equação (4.16) é usada quando a temperatura da partícula está acima da temperatura de ebulição.

$$\frac{dm_p}{dt} = - \frac{Q_c}{h_{lv}} \quad 4.16$$

e a Equação (4.17) é usada quando a temperatura da partícula está abaixo do ponto de ebulição.

$$\frac{dm_p}{dt} = \Pi d_p \rho D Sh \frac{W_c}{W_G} \ln \left(\frac{1 - X_S^V}{1 - X_{vap}^V} \right) \quad 4.17$$

Onde, D é a difusividade de massa do componente na fase contínua e Sh é o número de Sherwood. W_c e W_G são a massa molar do componente que está sendo liberado e da mistura na fase contínua respectivamente, X_S^V é a fração molar de vapor de equilíbrio do componente que está evaporando na superfície da gota e X_{vap}^V é a fração molar do componente que está evaporando no seio da fase gasosa.

A pressão de vapor saturado é determinada pela equação de Antoine dada por:

$$\ln P_{sat} = A - \frac{B}{T + C} \quad 4.18$$

Onde P_{sat} é a pressão de saturação do componente inflamável (kPa) e T é a temperatura (K). As constantes da Equação 4.18 para os compostos utilizados no presente trabalho são mostrados na Tabela 4.1.

Tabela 4.1 – Constantes de Antoine para o propano e butano.

| Componente | A | B | C |
|------------|--------|--------|----------|
| Propano | 9,0452 | 1851,3 | -26.11 |
| Butano | 9,0553 | 2154,7 | -34,3610 |

Fonte: Ansys® CFX 16.1.

4.2.4 Quebra de Partícula

Para a simulação numérica de quebra de gotas, uma aproximação chamada quebra estatística é usada no software Ansys® CFX 16.1. Neste modelo, presume-se que, se uma gota se quebra em gotas menores, o diâmetro da partícula diminui de acordo com as previsões do modelo de quebra utilizado. A razão entre o número de partículas reais e computacionais é ajustada nos balanços de modo que a massa total de partículas permaneça constante (Σ massa da gota original = Σ massa das gotas geradas). Com esse pressuposto, não é necessário gerar e rastrear novas gotas após a separação, mas continuar rastreando uma única partícula representativa. (ANSYS, 2015)

A quebra secundária de gotas de líquido combustível em gotas ainda menores é conduzida principalmente por forças aerodinâmicas atuantes nas gotas pela fase gasosa circundante. Essas forças causam uma distorção da gota inicialmente esférica e ocorre quando a tensão superficial que neutraliza a deformação seja excedida e conseqüentemente, afeta o número adimensional de Weber para gotas, o qual relaciona a pressão dinâmica e a tensão superficial (STIESCH, 2003), sendo definido como:

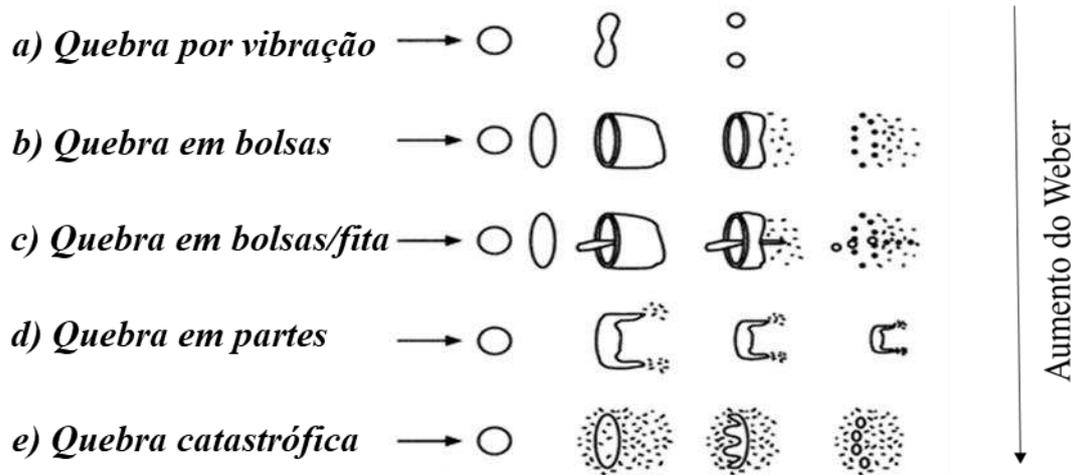
$$We = \frac{\rho V_{slip}^2 d_p}{\sigma} \quad 4.19$$

onde σ é a tensão superficial e V_{slip} é a velocidade relativa.

Este parâmetro é uma medida característica do comportamento de quebra de gotas líquidas. Dependendo da velocidade relativa entre a gota e a fase gasosa e, portanto, do número de Weber, vários mecanismos de quebra diferentes foram observados em estudos experimentais.

A Figura 4.1 mostra cinco diferentes tipos de regimes de quebra frequentemente distinguidos.

Figura 4.1 – Regime de quebra de gotas.



Fonte: Adptado de Stiesch (2003).

Uma variedade de modelos matemáticos para a quebra da gota está disponível na literatura, no presente trabalho a quebra das gotas é modelada utilizando o modelo proposto por Reitz e Diwakar (1987), este modelo considera dois tipos de regime de quebra por bolsa e partes, regimes (b) e (d) da Figura 4.1, respectivamente.

No regime bag break-up (Figura 4.1b) ocorre quando a pressão interna da partícula de combustível supera a tensão superficial devido ao efeito da baixa pressão ao redor da partícula de combustível, eventualmente as forças de tensão superficial são superadas e a gota se desintegra, a quebra ocorre quando o número Weber obtido pela Equação 4.19 é maior que 6 (Weber crítico). No processo de quebra em partes (Figura 4.1d) novas gotas são formadas a partir da separação de partes da superfície líquida de uma gota existentes, o início deste regime ocorre quando $We > 0,5Re^{1/2}$.

Independente do regime de quebra, a seguinte relação descreve a redução do raio da partícula:

$$\frac{dr_p}{dt} = \frac{-(r_p - r_{stable})}{t_{br}} \tag{4.20}$$

onde r_p é o raio de gota antes da quebra, r_{stable} é o novo raio para a gota estável e t_{br} é o tempo característico de quebra. Os valores para r_{stable} e t_{br} são calculados a partir das equações descritas no Quadro 4.1.

Quadro 4.1 – Equações para as variáveis r_{stable} e t_{br} para os regimes de quebra em bolsas e partes.

| | Quebra em bolsas ($We > We_{crit}$) | Quebra em partes ($We/Re^{1/2} > C_{s1}$) |
|--------------|---|---|
| t_{br} | $C_1 \sqrt{\frac{\rho_p r_p^3}{2\sigma}}$ | $C_2 \frac{r_p}{V_{slip}} \sqrt{\frac{\rho_p}{\rho}}$ |
| r_{stable} | $\frac{6\sigma}{\rho V_{slip}^2}$ | $\frac{\sigma^2}{2\rho^2 V_{slip}^3 \nu}$ |

As constantes C_1 , C_2 , We_{crit} e C_{s1} do modelo Reitz e Diwakar (1987) são descritas na Tabela 4.2.

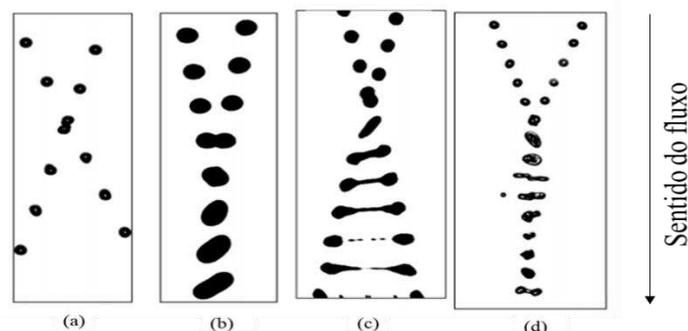
Tabela 4.2 – Constantes do modelo de quebra Reitz e Diwakar (1987).

| Constates | Valores |
|-------------|---------|
| C_1 | π |
| C_2 | 20 |
| We_{crit} | 6 |
| C_{s1} | 0,5 |

4.2.5 Colisões

Colisões ocorrem se a fase dispersa for suficientemente densa e se a velocidade relativa entre as partículas não for muito pequena. No caso de partículas sólidas, as colisões só podem modificar as velocidades das partículas, mas no caso de gotas tanto o tamanho quanto a velocidade podem mudar e o resultado de uma colisão é muito mais complexo, a Figura 4.2 exibe alguns regimes que podem ocorrer (MURRONE e VILLEDIEU, 2017).

Figura 4.2 – Regimes de colisão de gotas: (a) choque elástico; (b) coalescência; (c) separação de alongamento; (d) separação reflexiva.



Adaptado de: Murrone e Villedieu (2017).

As colisões de gotas não são consideradas no presente trabalho devido às incertezas na modelagem do fenômeno em jatos bifásicos turbulentos (WITLOX, 2002).

4.3 Modelo de Turbulência

O modelo de turbulência Shear Stress Transport (SST) (MENTER, 2003) é utilizado no presente trabalho. Este modelo do tipo RANS utiliza o equacionamento de dois outros modelos, $k - \varepsilon$ e $k - \omega$.

O modelo SST utiliza o modelo $k - \varepsilon$ nas regiões distantes de superfícies, onde esse se mostra mais eficiente, para regiões próximas à parede utilizam-se as equações de transporte do modelo $k - \omega$.

A energia cinética turbulenta (k), no modelo SST é obtida por:

$$\frac{\partial k}{\partial t} + \frac{\partial u_i k}{\partial x_i} = \frac{\bar{P}_k}{\rho} - \beta^* \omega k + \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial x_i} \left[(\mu + \sigma_k \mu_t) \frac{\partial k}{\partial x_i} \right] \quad 4.21$$

onde u_i representa a componente de velocidade, ρ é a massa específica, μ é a viscosidade molecular, μ_t é a viscosidade turbulenta. O termo \bar{P}_k é dado por:

$$\bar{P}_k = \min(P_k, 10\varepsilon) \quad 4.22$$

onde:

$$P_k = \mu_t \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad 4.23$$

A equação da taxa de dissipação de energia cinética turbulenta ω , no modelo SST é dada por:

$$\frac{\partial \omega}{\partial t} + \frac{\partial u_i \omega}{\partial x_i} = \alpha S^2 - \beta \omega^2 + \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial x_i} \left[(\mu + \sigma_\omega \mu_t) \frac{\partial \omega}{\partial x_i} \right] + 2(1 - F_1) \sigma_{\omega 2} \frac{1}{\omega} \frac{\partial k}{\partial x_i} \frac{\partial \omega}{\partial x_i} \quad 4.24$$

onde F_1 é definido como:

$$F_1 = \tanh \left\{ \left\{ \min \left(\max \left(\frac{\sqrt{k}}{\beta^* \omega y}, \frac{500\nu}{\omega y^2} \right); \frac{4\rho\sigma_{\omega 2} k}{CD_{k\omega} y^2} \right) \right\}^2 \right\} \quad 4.25$$

Sendo y é a distância da superfície de não deslizamento e $CD_{k\omega}$ dado pela Equação 4.26.

$$CD_{k\omega} = \max \left\{ 2\rho\sigma_{\omega 2} \frac{1}{\omega} \frac{\partial k}{\partial x_i} \frac{\partial \omega}{\partial x_i}, 10^{-10} \right\} \quad 4.26$$

Neste trabalho, os termos fonte referentes a fase dispersa nas equações de turbulência da fase contínua são negligenciados (ANSYS, 2015), assim a turbulência da fase contínua não é influenciada pela fase dispersa.

A intensidade de turbulência da fase contínua no orifício foi obtida seguindo as relações (ANSYS, 2015):

$$k = \frac{3}{2} I^2 U^2 \quad 4.27$$

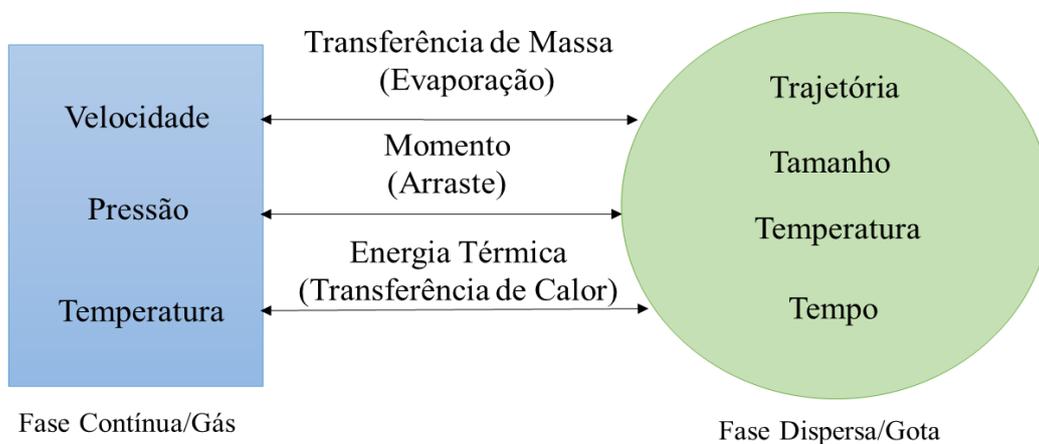
$$\varepsilon = \frac{k^{3/2}}{0,3d_o} \quad 4.28$$

Onde k é a energia cinética turbulenta por unidade de massa, ε é a taxa de dissipação turbulenta e I é a intensidade de turbulência especificada. Na ausência de informações sobre os níveis de turbulência na saída do orifício, o valor para a intensidade turbulenta de 5% foi usado, sendo este recomendado para pequenos orifícios circulares (ANSYS, 2015).

4.4 Acoplamento entre as Fases e Procedimento Numérico

No presente trabalho o acoplamento de duas vias (“two-way”) foi utilizado, neste modelo a fase dispersa e a fase contínua influenciam uma na outra (CROWE et al., 1998). Um esquema da interação entre as fases é mostrado na Figura 4.3.

Figura 4.3 – Acoplamento de duas vias para a abordagem Euleriana-Lagrangeana.

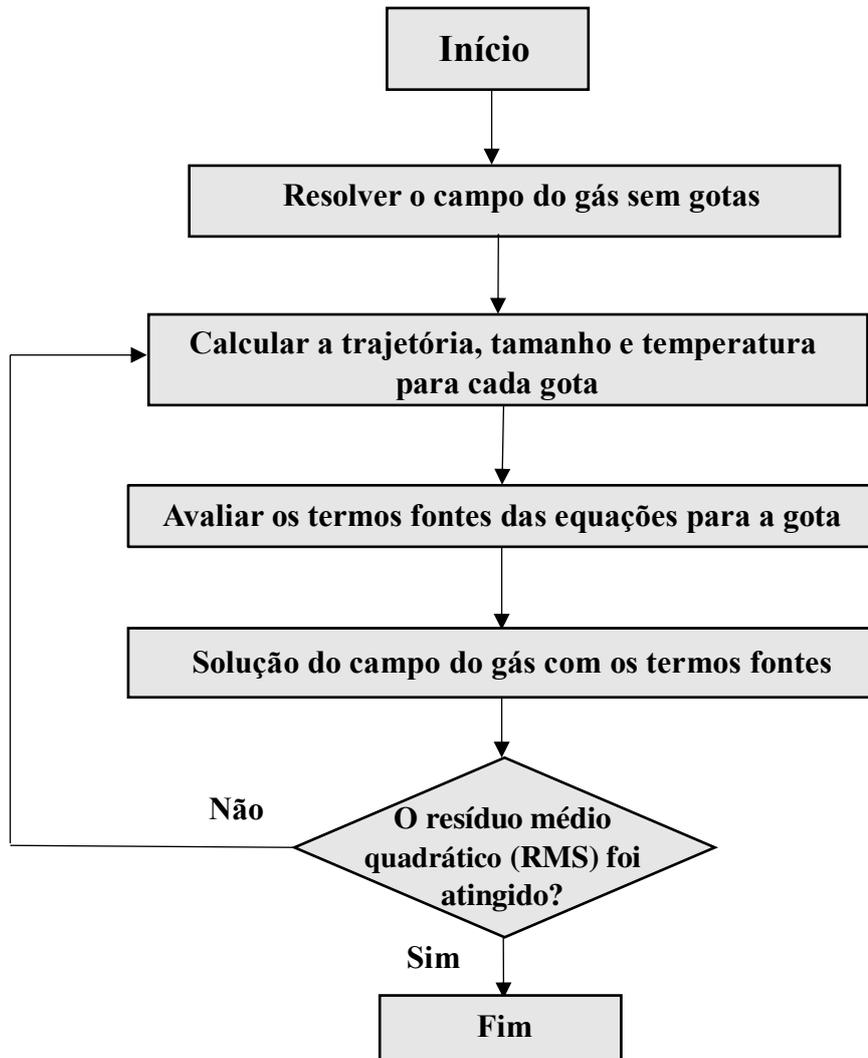


Adaptado de: Anandharamkrishnan e Ishwarya (2015).

O modelo de *Particle Source in Cell* (PSI-Cell) proposto por Crowe et al. (1977) constitui a base da abordagem E-L, neste método as partículas são rastreadas dentro do domínio computacional tratadas como fontes de massa, calor e momento dentro de cada

célula sendo calculada individualmente. A Figura 4.4 descreve os cálculos numéricos do modelo para o estado estacionário.

Figura 4.4 – Procedimento numérico para o modelo PSI-Cell em estado estacionário.



Adaptado de: Crowe et al. (1977).

4.5 Parâmetros Característicos do Spray

Alguns parâmetros relacionados a liberação sob a forma de spray como: vazão mássica, velocidade, ângulo do spray, diâmetro médio e distribuição de tamanho de partícula no orifício são estimados, para serem usados posteriormente no modelo em CFD como condição inicial ou de contorno na saída do orifício.

4.5.1 Estimativa da Vazão Mássica

O método proposto McMillan (1998) para estimativa da liberação bifásica é usado, este modelo é válido para o cenário em que o material inflamável seria um vapor em condições ambientes, mas é mantido como um líquido pressurizado.

A quantidade de líquido que vaporiza após o vazamento pode ser obtida a partir de um balanço adiabático como descrito pela Equação 4.29.

$$x_{\text{flash}} = \frac{C_{\text{pl}}(T_{\text{res}} - T_{\text{b}})}{h_{\text{lv}}} \quad 4.29$$

onde C_{pl} , T_{res} , T_{b} e h_{lv} são a capacidade calorífica, temperatura do reservatório, temperatura de ebulição e o calor latente, respectivamente.

Neste tipo de liberação a vaporização ocorre ao longo do vazamento onde o comprimento do caminho de vazamento é maior do que 10 vezes o diâmetro do orifício, reduzindo assim a quantidade de material inflamável liberado. A vazão mássica de material inflamável pode ser obtida por:

$$Q_{\text{m}} = C_{\text{d}}A_{\text{o}}\sqrt{2\rho_{\text{m}}(P_{\text{res}} - P_{\text{o}})} \quad 4.30$$

Onde C_{d} , A_{o} , ρ_{m} , P_{res} são o coeficiente de descarga, área da secção transversal do orifício, densidade da mistura liberada e pressão no reservatório, respectivamente.

A pressão no orifício (P_{o}) é definida de acordo com a Equação (4.31).

$$P_{\text{o}} = 0,55P_{\text{res}} \quad 4.31$$

A densidade da mistura é obtida pela Equação (4.32).

$$\rho_{\text{m}} = \frac{1}{\frac{F_{\text{v}}}{\rho} + \frac{1 - F_{\text{v}}}{\rho_{\text{l}}}} \quad 4.32$$

sendo ρ_{l} a densidade do líquido calculada na temperatura de processo. F_{v} é a fração de líquido que vaporiza ao longo do vazamento pela Equação (4.33).

$$F_{\text{v}} = \frac{C_{\text{pl}}(T_{\text{res}} - T_{\text{o}})}{h_{\text{lv}}} \quad 4.33$$

onde T_{o} é a temperatura no orifício.

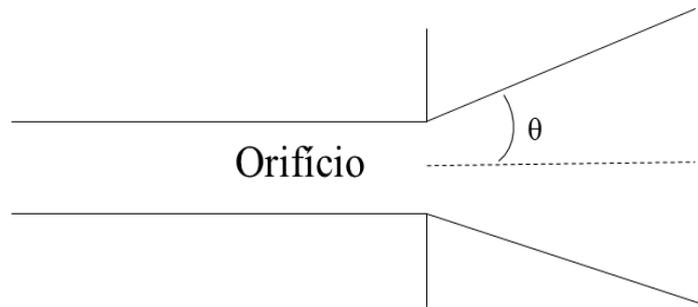
4.5.2 Ângulo do Spray

O ângulo é um parâmetro de entrada necessário para o modelo fluidodinâmico de liberação bifásica. No presente trabalho, o ângulo é calculado a partir do modelo proposto por Arai et al. (1984), dado pela Equação (4.34). Esse é o ângulo com o eixo central do jato como mostrado na Figura 4.5.

$$\theta = 0,025 \left(\frac{\rho \Delta P d_o^2}{\mu^2} \right) \quad 4.34$$

onde ΔP é a diferença entre a pressão de armazenamento e a ambiente, e d_o é o diâmetro do orifício.

Figura 4.5 – Ângulo do spray.



4.5.3 Distribuição de Tamanho de Partícula

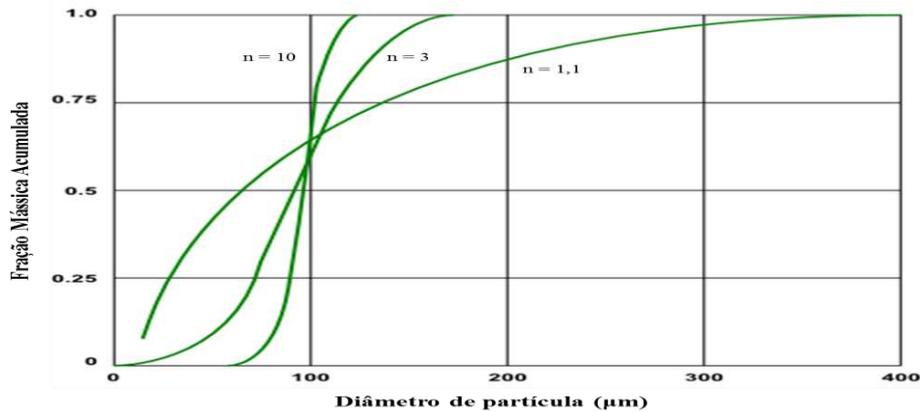
Para estimar a distribuição de tamanho de gota na liberação foi utilizada a distribuição semi-empírica de Rosin-Hammler (MONTAZERI et al., 2015) descrita pela Equação (4.35), este modelo é amplamente utilizado em diversas áreas, incluindo na previsão de distribuição de tamanho de gota em spray.

$$Y_d = \exp(-d/d_m)^n \quad 4.35$$

onde Y_d é a fração em massa de gotas com diâmetros maiores do que d , d_m é o diâmetro médio das gotas e n o parâmetro de espalhamento, relacionado a dispersão da distribuição.

A Figura 4.6 mostra a distribuição de tamanho de partícula com diâmetro médio igual a $100 \mu\text{m}$ para diferentes valores de n , observa-se que quanto menor o seu valor, mais dispersa é a distribuição.

Figura 4.6 – Distribuições de tamanho de partículas para diferentes parâmetros de espalhamento (n) com $d_m = 100 \mu\text{m}$.



Fonte: ANSYS (2015).

Valores típicos de n para liberações spray estão compreendidos no intervalo 1,5 - 3 (ANSYS, 2015), assim usou-se $n = 2$.

No presente trabalho o modelo proposto por Tilton e Farley (1990) foi utilizado para estimativa do diâmetro médio das gotas, esta correlação empírica é função da velocidade do jato bifásico na saída do orifício e das propriedades do fluido como mostrado na Equação (4.36).

$$d_m = 0,585 \frac{1}{v_{jato}} \sqrt{\frac{\sigma}{\rho_l}} \quad 4.36$$

onde, σ é a tensão superficial do líquido, ρ_l densidade do líquido e v_{jato} é a velocidade inicial do jato bifásico obtido pela Equação (4.37) (CALAY e HOLDO, 2008).

$$v_{jato} = C_d \sqrt{\frac{2\Delta P}{\rho_l}} \quad 4.37$$

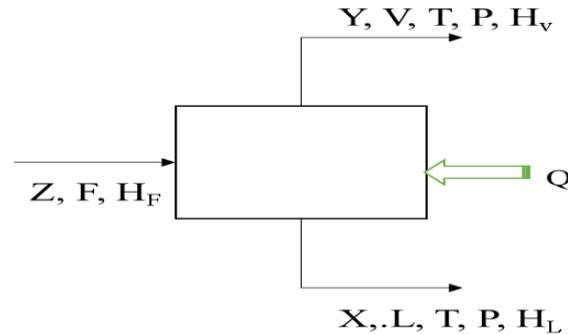
sendo, C_d o coeficiente de descarga.

4.6 Evaporação Flash Binária

A destilação flash ou instantânea é uma operação de separação contínua de um andar de equilíbrio onde uma mistura líquida de dois ou mais componentes é parcialmente vaporizada através da passagem por uma válvula de expansão (AZEVEDO e ALVES, 2009).

O processo de destilação mais simples, ocorre em um único andar, com formação de uma fase vapor em equilíbrio com um líquido a partir da corrente de alimentação como mostrado na Figura 4.7.

Figura 4.7 – Diagrama esquemático do flash de um único estágio.



De acordo com Boston e Britt (1978) os cinco tipos de equações que são necessárias para descrever completamente um fenômeno flash em um único estágio são descritos pelas Equações (4.38 - 4.42).

I. Equilíbrio de fase:

$$y_n = K_n x_n \quad 4.38$$

II. Balanço de massa por componente:

$$x_n L + y_n V = Z_n F \quad 4.39$$

III. Balanço de massa total:

$$L + V = F \quad 4.40$$

IV. Balanço Entalpia

$$H_L L + H_V V = H_F + Q \quad 4.41$$

V. Constitutiva

$$\sum_n x_n = \sum_n y_n \quad 4.42$$

onde x_n é a composição da fase líquida, y_n é a composição da fase gás, Q é a taxa de troca térmica de calor. H_F , H_v e H_L correspondem as entalpias: da alimentação, da fase vapor e da fase líquida, respectivamente. F , L e V são vazões molares das correntes: de alimentação, de líquido e de vapor, respectivamente.

4.6.1 Flash Adiabático

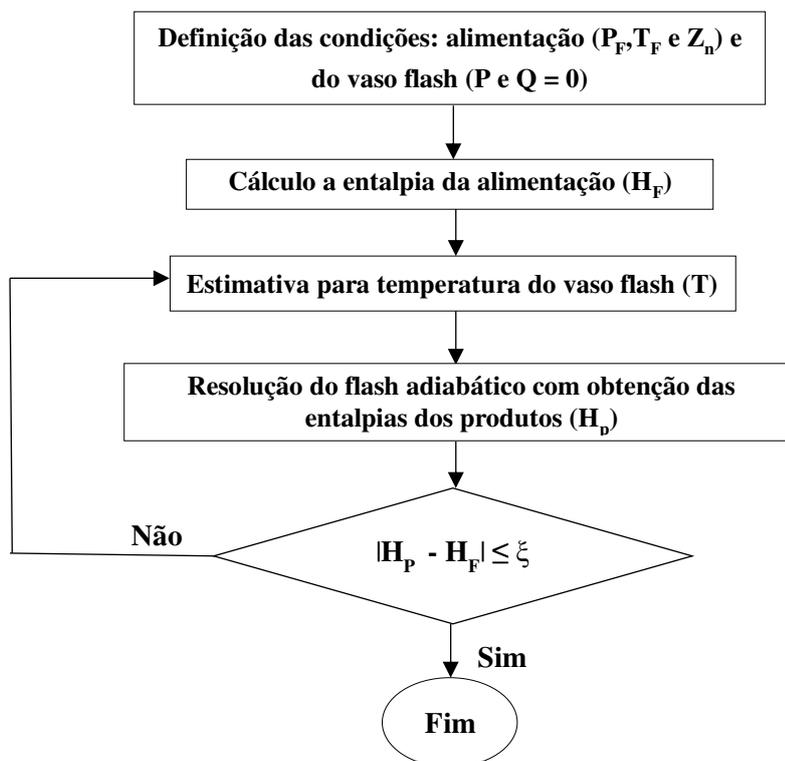
Nesta operação, as variáveis especificadas são a temperatura ou pressão e a carga térmica, Q . Especificar a carga térmica é equivalente a especificar a entalpia final. As variáveis dependentes são a pressão ou temperatura, a fração de vapor e as composições de vapor e líquido (KHOURY,1999).

Em um processo verdadeiramente adiabático $Q = 0$ (ou $H_L = H_V$), porém o termo flash adiabático geralmente é aplicado a um processo em que a carga térmica é especificada.

O problema consiste em determinar uma temperatura (ou pressão se a temperatura for especificada) em que a entalpia total dos produtos satisfaça a carga térmica especificada.

Neste trabalho a simulação de liberação de misturas inflamáveis é realizada utilizando um flash adiabático com pressão especificada como mostrado na Figura 4.8, o flash adiabático foi definido em um software comercial de processo, onde a temperatura e composições das fases (contínua e dispersa) na saída do orifício foram obtidas.

Figura 4.8 – Cálculo flash adiabático com as condições de alimentação conhecidas.



Adaptado de: Siurana et al. (2018).

As equações de estado cúbicas apresentam um compromisso entre generalidade e simplicidade que é adequado a muitas aplicações, também são, na realidade, as equações mais simples capazes de representar o comportamento tanto de líquidos quanto de gases (SMITH et. al, 2007).

No presente trabalho a equação de estado padrão de Soave-Redlich-Kwong (Equação 4.43) é utilizada para a modelagem da liberação de misturas no software Aspen Plus® V.8.4, sendo esta recomendada para aplicações de processamento de hidrocarbonetos, tais como processamento de gás, refinaria e processos petroquímicos (ASPEN, 2013). A pressão (p) está relacionada à temperatura (T), à constante de gás ideal (R) e ao volume molar (V_m) de acordo com:

$$p = \frac{RT}{V_m - b} - \frac{a}{V_m(V_m + b) + b(V_m - b)} \quad 4.43$$

O parâmetro a é uma medida das forças atrativas entre as moléculas, b está relacionado ao tamanho das moléculas.

4.7 Limite de Explosividade para Misturas

No presente trabalho utilizou-se a regra de mistura empírica proposta por Le Chatelier (1891) para estimar o limite de inflamabilidade de misturas combustíveis como descrito na Equação (4.44).

$$LIE_M = \frac{1}{\sum_{n=1}^N \frac{y_n}{LIE_n}} \quad 4.44$$

onde y_n é a fração molar do componente n considerando apenas as espécies combustíveis, e LIE_n , é o limite inferior de explosividade do componente n em volume.

Algebricamente, o método de Le Chatelier afirma que o limite de inflamabilidade da mistura tem um valor situado entre o máximo e o mínimo dos limites de inflamabilidade dos componentes puros.

4.7.1 Limite de Explosividade para Misturas Contendo Gases Inertes

O método de cálculo para misturas de gases contendo gases inertes utiliza o método desenvolvido por Schroeder (2016), que é baseado na regra de Le Chatelier e foi estendido para componentes inertes de mistura, como mostrado na Equação 4.45.

$$LIE_{in} = \frac{100}{\sum_{i=1}^n \frac{A_n}{LIE'_n}} \quad 4.45$$

onde:

$$LIE'_i = \left(\frac{100 - LFL'_M - (1 - \bar{K}) \frac{\sum_{p=1}^k B_k}{\sum_{i=1}^n A_n}}{(100 - LIE'_M)} \right) LIE_n \quad 4.46$$

sendo:

- LIE_n Limite inferior de explosividade do componente n .
 LIE'_M Limite inferior de explosividade da mistura apenas com gases inflamáveis, calculado de acordo com a Equação 4.44.
 K_n Coeficiente de equivalência de um gás inerte em relação ao nitrogênio.
 \bar{K} Média dos valores K_k dos gases inertes ponderados de acordo com suas frações molares.
 A_n Fração molar do gás inflamável n em uma mistura de gás, em %.
 B_k Fração molar do gás inerte k em uma mistura de gás, em %.

A alteração na capacidade calorífica molar da mistura inerte-ar no LIE_M influencia a concentração de combustível necessária para a propagação da chama. A influência do tipo de gás inerte presente na mistura é representada pelo valor adimensional K_k , sendo característico para cada gás, como mostrado na Tabela 4.3.

Tabela 4.3 – Coeficientes de equivalência, K_k , para gases inertes em relação ao nitrogênio.

| Gás | N ₂ | CO ₂ | He | Ar | Ne | Kr | Xe | SO ₂ | SF ₆ | CF ₄ | C ₃ F ₈ |
|-------|----------------|-----------------|-----|------|-----|-----|-----|-----------------|-----------------|-----------------|-------------------------------|
| K_k | 1 | 1,5 | 0,9 | 0,55 | 0,7 | 0,5 | 0,5 | 1,5 | 4 | 2 | 1,5 |

Fonte: Schroeder (2016)

Uma mistura pode ser classificada como não inflamável, se a seguinte equação for satisfeita (BS EN ISO 10156, 2010):

$$\sum_{n=1}^w A_n \left(\frac{100}{T_{cn}} - 1 \right) \leq \sum_{k=1}^p B_k K_k \quad 4.47$$

onde T_{cn} teor máximo de gás inflamável que, quando misturado com nitrogênio, não é inflamável no ar.

Capítulo 5

Metodologia

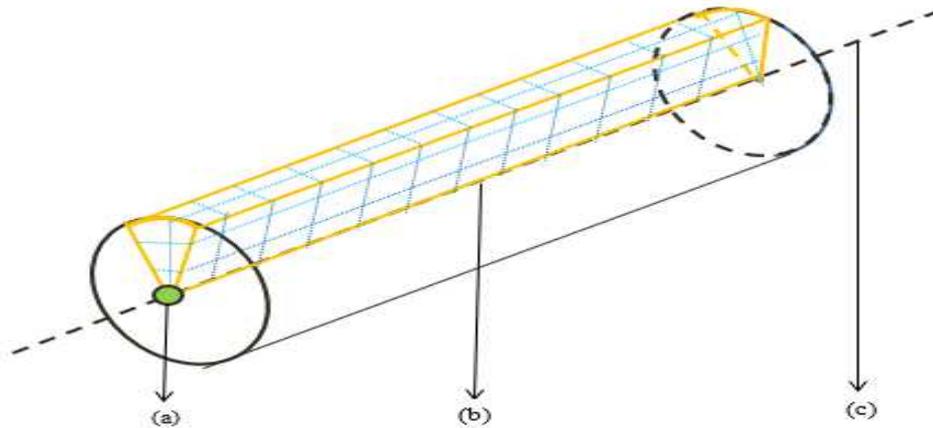
A Figura 5.1 ilustra o cenário da liberação onde um reservatório contendo gás inflamável liquefeito (e.g. propano ou GLP) sobre pressão libera material no ambiente.

Figura 5.1 – Cenário de liberação.



No presente trabalho a hipótese de jato axissimétrico foi assumida, sendo esta válida porque na região inicial bifásica até a completa evaporação do líquido, o momento do jato é muito maior que a força gravitacional. Após a completa evaporação das gotas, o jato está completamente na fase gasosa, sendo o efeito da gravidade insignificante comparado a dispersão turbulenta. Essa simplificação, observada em experimentos (ALLEN, 1998a), permite a redução do cálculo do domínio para uma fatia do domínio real. Um esboço da fatia de 4 graus (ângulo que representa um elemento na direção angular) usada no presente trabalho é mostrado na Figura 5.2. A vantagem de usar essa fatia é reduzir o alto custo computacional da simulação em CFD. Para fins de simplificação o reservatório não foi considerado.

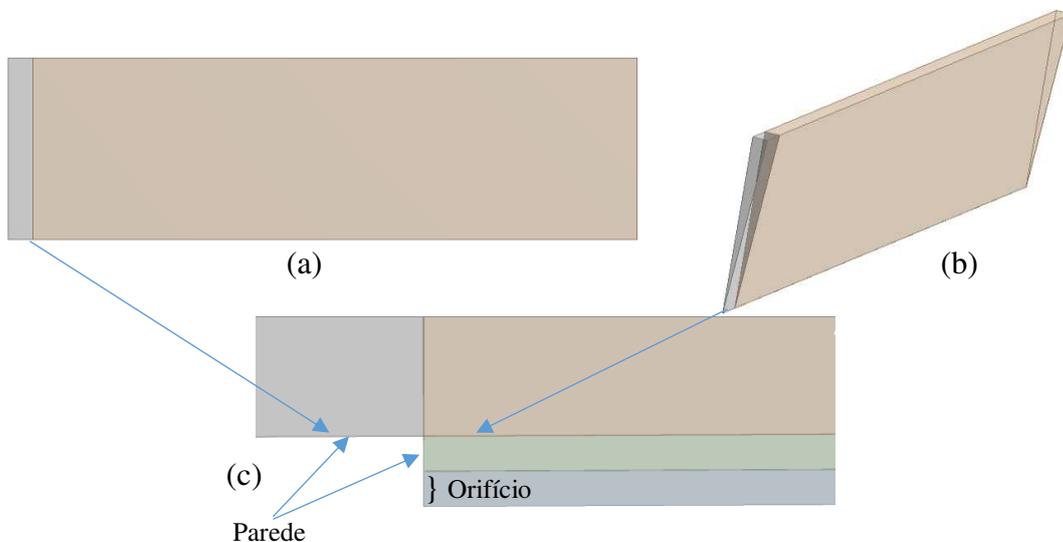
Figura 5.2 – Esquema de uma fatia representativa do ambiente.



Adaptado de: Souza (2016).

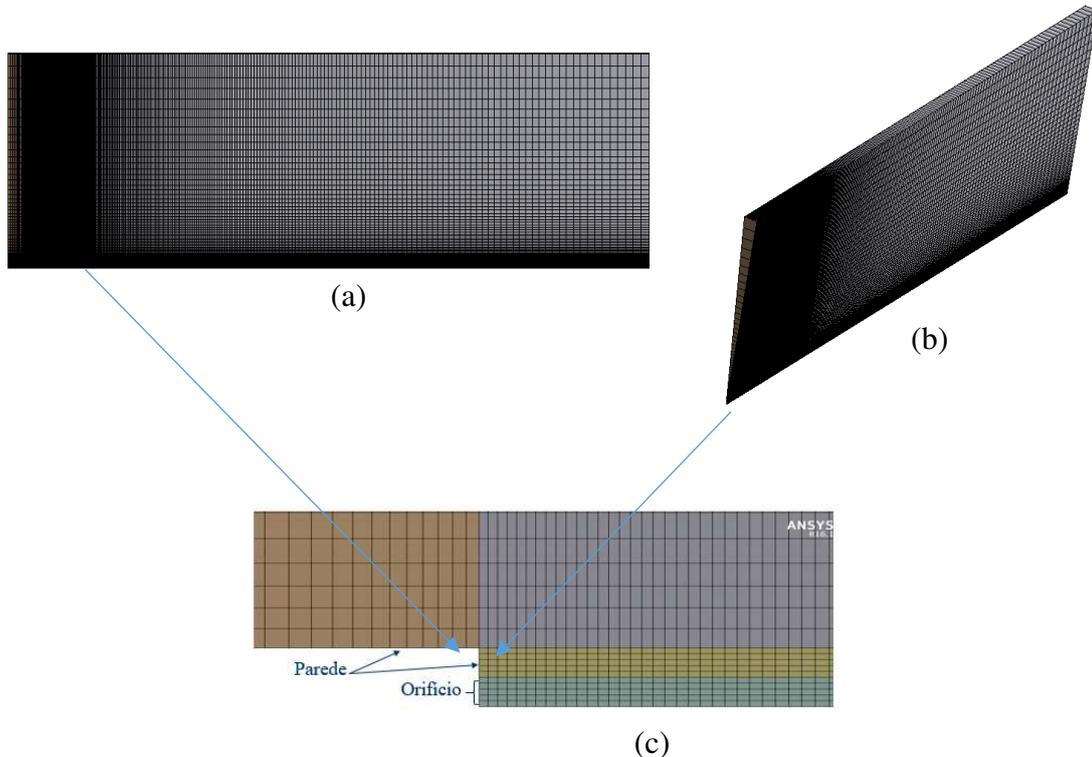
O domínio computacional é a fatia destacada na Figura 5.2. (a) a saída do orifício (entrada do domínio), (b) uma das duas faces da "fatia" em que a condição de simetria é imposta, e (c) a linha central. Dada a condição de simetria na face indicada da fatia, entende-se que o comportamento do vazamento na fatia destacada é repetido em fatias vizinhas, por rotação ao redor da linha central, formando o cilindro completo. A geometria obtida para a fatia é apresentada na Figura 5.3, sendo essa construída no software Ansys® DesignModeler 16.1.

Figura 5.3 – Geometria de liberação bifásica. (a) vista frontal da geometria. (b) perspectiva isométrica da geometria. (c) detalhe do orifício de vazamento.



A malha computacional utilizada no presente trabalho foi construída no software Ansys® Meshing 16.1, a mesma é estruturada sendo composta de elementos hexaédricos como representada na Figura 5.4. Como observado um refinamento foi realizado na região de liberação com objetivo de captar melhor o fenômeno, a Figura 5.4c exibe a região próxima ao orifício.

Figura 5.4 – Malha computacional de liberação bifásica; (a) vista frontal da malha; (b) perspectiva isométrica da malha; (c) detalhe do orifício de vazamento.

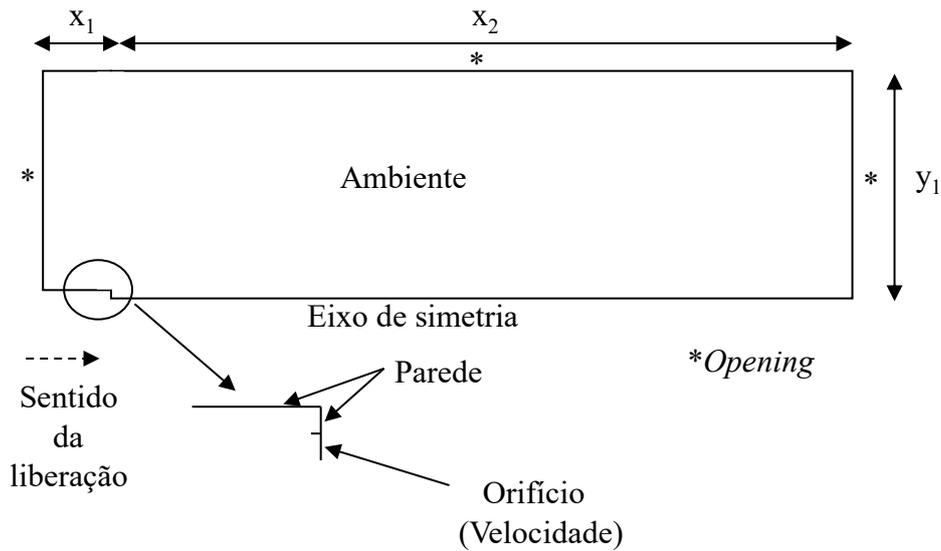


5.1 Condições de Contorno

As condições de contorno adotadas para o presente trabalho são ilustradas na Figura 5.5 e descritas a seguir:

- I. A condição de simetria nas duas faces da “fatia” que tem a linha do eixo em comum;
- II. Para os contornos do ambiente externo foi considerada a condição de *opening pressure* ($P = 1 \text{ atm}$ e $T = 25 \text{ °C}$);
- III. A condição de não deslizamento foi utilizada para definir as paredes do orifício;
- IV. Velocidade de saída no orifício cujo valores para os casos simulados encontra-se no apêndice do presente trabalho.

Figura 5.5 – Condições de contorno utilizadas.



5.2 Definições Físicas do Problema

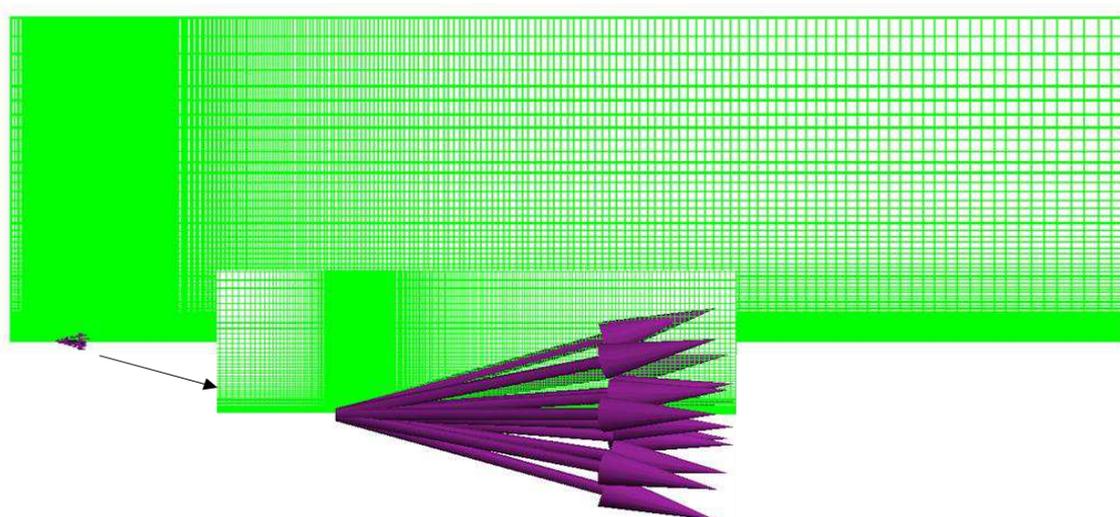
O software Ansys® CFX 16.1 foi utilizado para inserir as definições do problema. As condições de contorno na condição *opening* foram de pressão atmosférica ($P = 1 \text{ atm}$) e temperatura ambiente ($T = 25 \text{ °C}$).

No orifício considerou-se as fases dispersas e contínua em equilíbrio, emergindo com mesma velocidade e temperatura, para a fase dispersa foi criada um ponto de injeção localizado no orifício sendo inseridas no domínio como uma injeção tipo cone como mostrada na Figura 5.6. A velocidade, ângulo inicial, vazão mássica e os parâmetros da distribuição de partícula (d_m e $n = 2$) foram inseridos, esses valores para os casos simulados constam no apêndice do presente trabalho.

O número de gotas também é uma condição de entrada requerida, devido ao alto custo computacional para rastrear o número de gotas reais da liberação, é necessário especificar um número de partículas computacionais que represente o total de partículas reais, onde cada gota especificada representa um grupo de gotas da população.

A localização na injeção das gotas computacionais no orifício de vazamento é determinada de forma randômica. No presente trabalho 1000 gotas computacionais são injetadas na fatia representativa do domínio.

Figura 5.6 – Injeção das partículas computacionais no domínio.



As simulações foram realizadas em servidores Hp Proliant D1380 Gen8 com as especificações técnicas mostradas na Tabela 5.1.

Tabela 5.1 – Especificações técnicas do servidor.

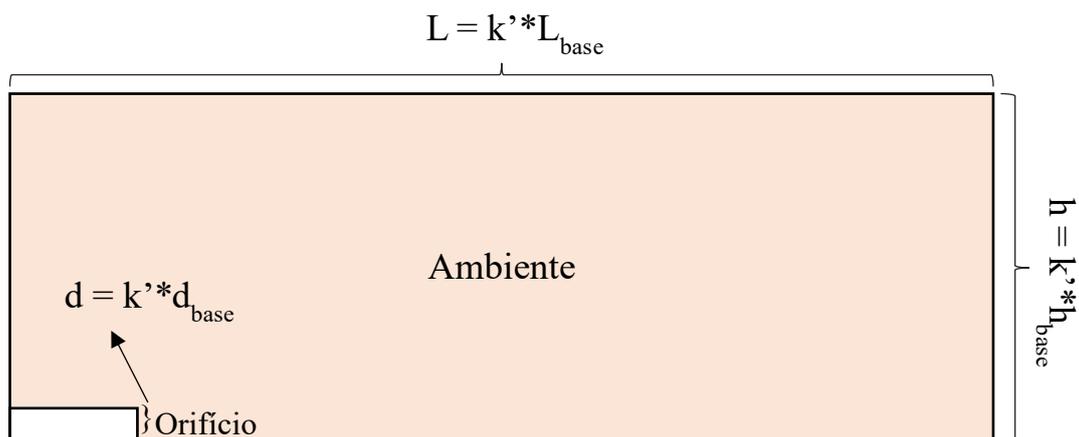
| | |
|----------------------------|---|
| Processadores | Processador Intel Xeon CPU E5-2620 |
| Memória RAM | 48 GB |
| Armazenamento | 2 Tb |
| Sistema Operacional | Windows Server 2012 |

As simulações foram conduzidas no estado estacionário utilizando como critério de convergência um resíduo médio quadrático (RMS) de 10^{-4} com número total de iterações igual a 6000, pois testes realizados com RMS inferiores não impactavam de maneira significativa os resultados obtidos. O tempo médio de simulação foi de aproximadamente 1 hora.

5.3 Parametrização do Domínio e Implementação das Simulações

Para viabilizar o estudo da liberação bifásica o tamanho do domínio foi parametrizado em relação ao diâmetro do orifício como mostrado na Figura 5.7. Os valores utilizados para o caso base são respectivamente: $d_{base} = 1$ mm, $L_{base} = 8$ m e $h_{base} = 2$ m. Portanto, o tamanho do ambiente se ajusta proporcionalmente ao tamanho do orifício garantindo que a extensão e volume da pluma sejam comportados com uma margem de segurança dentro do domínio. Os casos simulados foram checados com auxílio de uma planilha desenvolvida no ambiente Excel e a parametrização usada mostrou-se adequada para o estudo sendo em média o tamanho do domínio 5 vezes maior que a extensão da pluma.

Figura 5.7– Parametrização do tamanho do domínio.



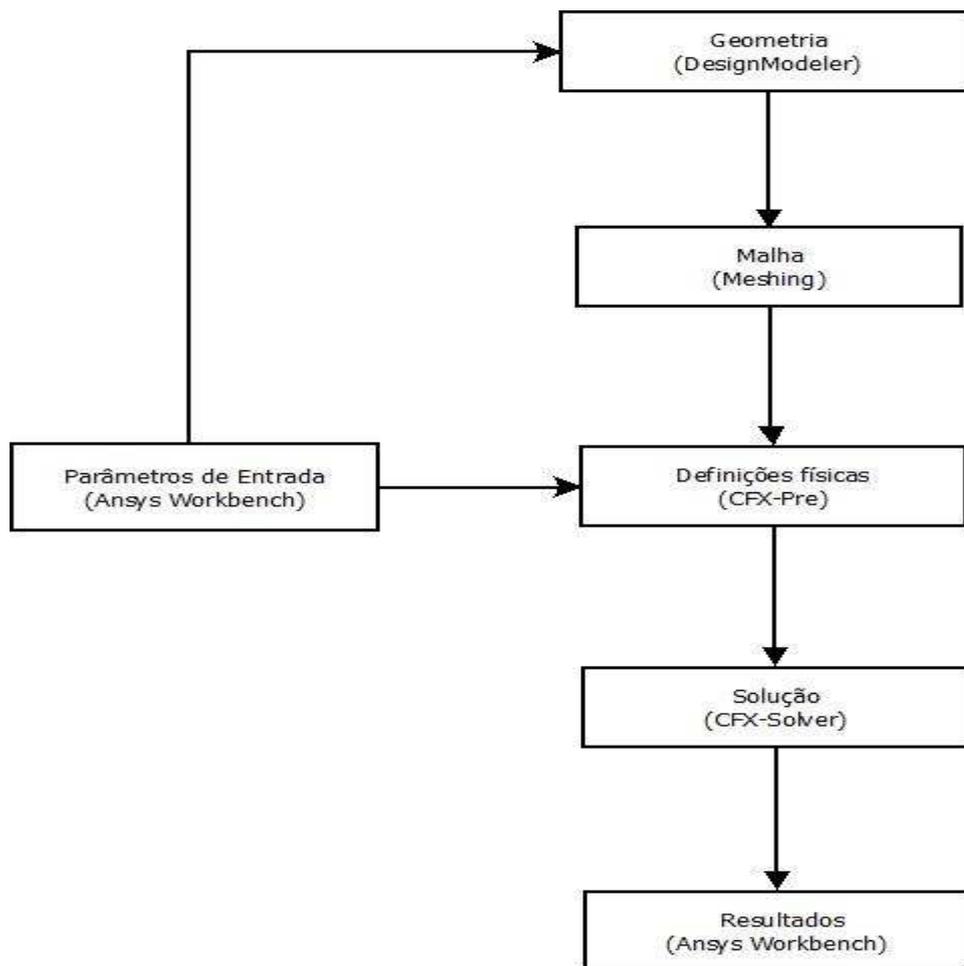
A obtenção das condições de armazenamento para as variáveis: pressão, diâmetro e também composição quando a liberação é multicomponente (e.g. GLP) nos intervalos de interesse foram obtidas a partir de normas (IEC 60079-10-1, 2015), manuais de equipamentos (BLACKMER, 2010) e condições operacionais típicas da indústria.

O software Matlab[®] R2014a foi utilizado para resolver um conjunto de equações (detalhadas no item 4.5 do capítulo de modelagem) para obtenção dos parâmetros de entrada: vazão mássica, velocidade inicial do jato, ângulo de injeção e diâmetro médio da gota. Os parâmetros (pressão, diâmetro do orifício e composição nas condições de reservatório) necessários para os cálculos das condições de entrada do modelo fluidodinâmico são inseridos em uma planilha Excel, onde essa planilha é lida pelo código escrito em Matlab[®], após o cálculo os resultados são escritos em uma planilha de saída. Essa implementação viabilizou os cálculos das entradas do modelo em CFD para o elevado número de simulações realizadas.

Na etapa de pós-processamento a análise dos resultados foi realizada no software Ansys[®] CFD Post 16.1, as variáveis de interesse para classificação de área: extensão e volume da atmosfera explosiva foram definidas como parâmetros de saída, assim como as expressões referentes aos limites inferiores de explosividade para misturas (Equações 4.44 e 4.45).

Após as definições dos parâmetros de entrada e de saída, foi possível simular os diversos casos realizados no presente trabalho no Ansys[®] Workbench. Os resultados de cada caso são atualizados ao fim de cada simulação em uma tabela. O fluxograma na Figura 5.8 ilustra de forma resumida a metodologia utilizada.

Figura 5.8 – Fluxograma da metodologia utilizada.

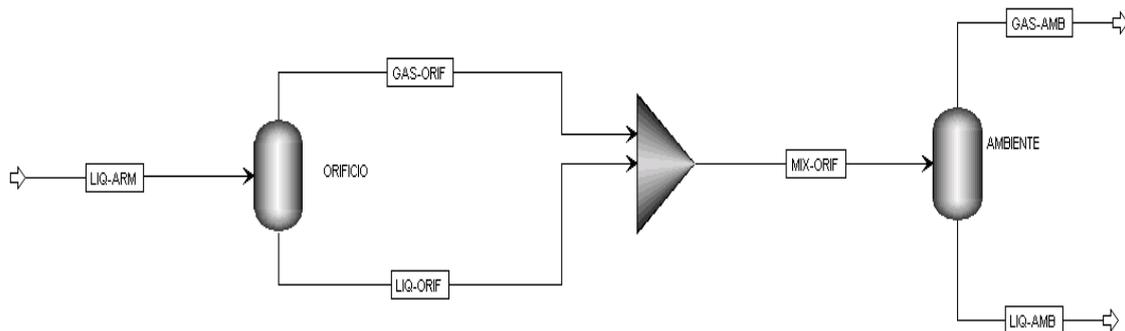


Para obtenção dos dados necessários para a simulação de GLP como também dos casos com inerte, utilizou-se o software comercial de simulação de processo Aspen Plus® V.8.4 para simular o processo *flashing* durante a liberação. A ferramenta *Sensitive* disponível no simulador foi utilizada para simular os diversos casos visando a obtenção da temperatura e composição das fases líquida e gás, parâmetros estes necessários para o modelo em CFD.

A corrente de entrada é constituída de GLP (ou GLP e inerte) especificada nas condições de reservatório. Aplicando a metodologia proposta por McMillan (1998) tem-se que o primeiro vaso flash adiabático que representa as condições ao longo do orifício com pressão especificada que corresponde a 55% da pressão do reservatório. Um *mixer* é adicionado para misturar as correntes de saída do primeiro vaso, então a mistura segue para o segundo flash adiabático especificado a pressão ambiente ($P = 1 \text{ atm}$). A Figura

5.9 ilustra com detalhe o fluxograma implementado. Os dados simulados encontram-se no apêndice do presente trabalho.

Figura 5.9 – Fluxograma de processo utilizado para representação da liberação de misturas.

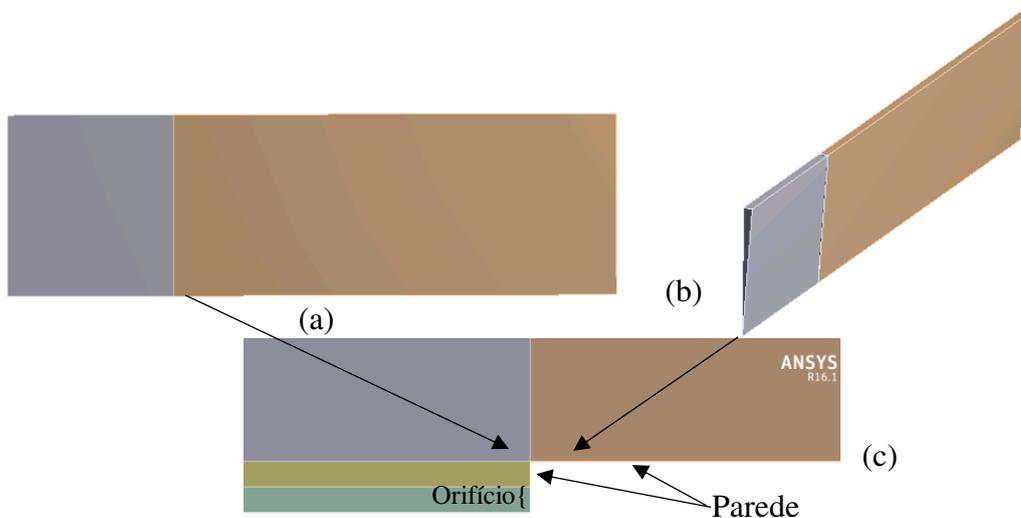


5.4 Influência do Vento

A presença de vento² durante uma liberação de gás liquefeito inflamável pressurizado influencia diretamente na extensão e volume da atmosfera explosiva. Duas importantes variáveis a serem consideradas são a intensidade e o sentido do vento.

Para ventos no mesmo sentido da liberação a geometria e malha descrita anteriormente (Figuras 5.3 e 5.4) foram utilizadas, para ventos contrários a fonte de emissão um ajuste na geometria foi realizado para evitar que o gás liberado ultrapasse o domínio nos limites de concentração da análise como mostrado na Figura 5.10.

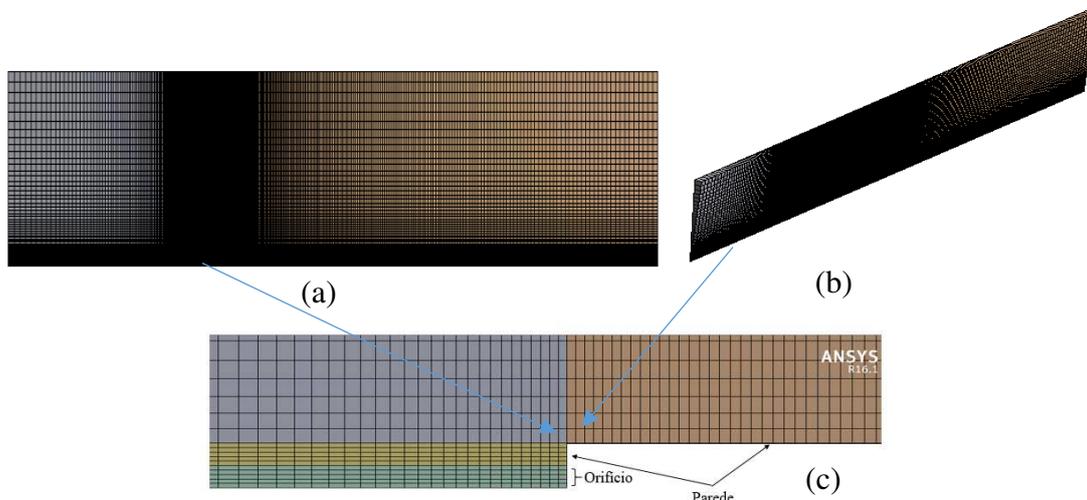
Figura 5.10 – Geometria utilizada para situações de ventos com sentido contrário à liberação: (a) vista frontal da geometria; (b) perspectiva isométrica da geometria; (c) detalhe do orifício de vazamento.



² Ar seco puro considerado como um componente com propriedades médias dos dois principais gases que compõem o ar: oxigênio (24% em volume) e nitrogênio (76 % em volume).

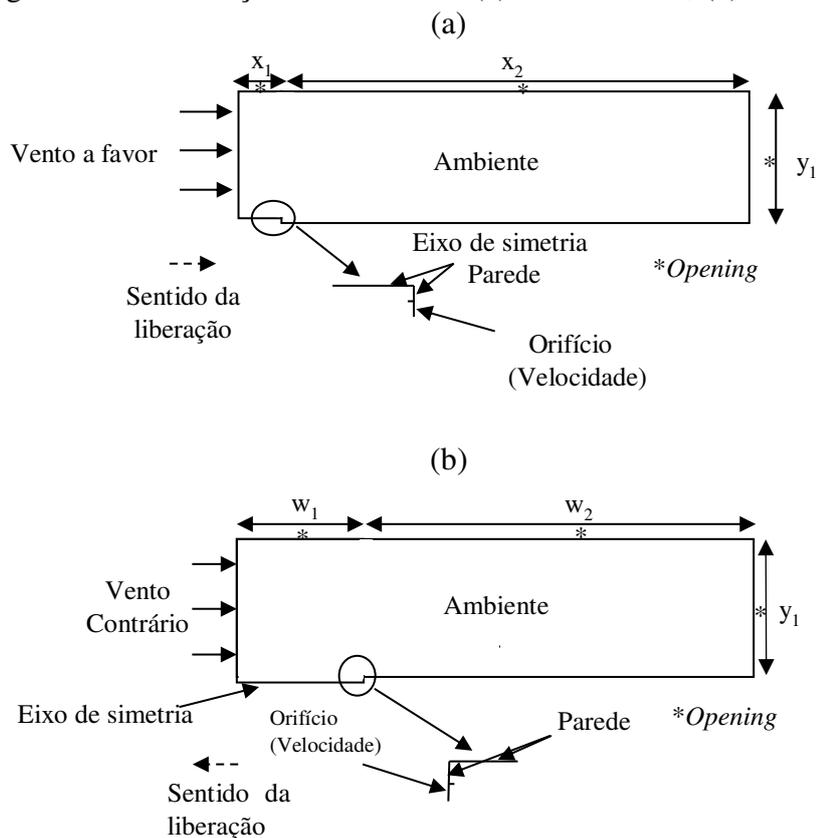
A malha para casos de ventos contrários é ilustrada na Figura 5.11.

Figura 5.11 – Malha computacional do modelo para vento com sentido contrário à liberação. (a) vista frontal da malha; (b) perspectiva isométrica da malha; (c) detalhe do orifício de vazamento.



A Figura 5.12 ilustra as condições de contorno para vento a favor e contra a liberação. A condição de contorno *inlet* com velocidade do vento especificada foi utilizada.

Figura 5.12 – Condições de contorno: (a) vento a favor; (b) vento contra.



5.5 Propriedades do Material

As propriedades físicas utilizadas do propano e butano nas simulações foram obtidas a partir da biblioteca do software comercial Ansys® CFX 16.1 como mostrado na Tabela 5.2, exceto o coeficiente de difusão no ar e a tensão superficial obtidos de Yaws (1999). As propriedades constantes são avaliadas na temperatura de ebulição dos respectivos componentes.

Tabela 5.2 – Propriedades do propano e butano.

| Propriedades | Propano / Butano |
|---|---|
| Massa molar (kg/kmol) | 44,097 / 58,123 |
| Capacidade calorífica do líquido (J/kgK) | 2248,4 / 2297,6 |
| (Capacidade calorífica do gás)/R (T em K) | $3,847+5,13110^{-3}T+6,01110^{-5}T^2-7,89310^{-8} T^3 /$ $5,547+5,53610^{-3}T+8,05710^{-5}T^2-10,57110^{-8} T^3$ |
| Calor latente (kJ/kg) | 431,78 / 386,08 |
| Viscosidade dinâmica do líquido (Pas) | $1,981910^{-4} / 2,037110^{-4}$ |
| Viscosidade dinâmica do gás (Pas) | $6,309310^{-6} / 6,754610^{-6}$ |
| Condutividade térmica do líquido (W/mK) | 0,12954 / 0,11559 |
| Condutividade térmica do gás (W/mK) | 0,011571 / 0,014138 |
| Tensão superficial (N/m) | 0,0154 / 0,0149 |
| Densidade do líquido (kg/m ³) | 581,42 / 600,39 |
| Coeficiente de difusão no ar (cm ² /s) | 0,1142 / 0,0959 |

5.6 Liberação de GLP com Inerte

Uma alternativa para se reduzir o risco de possíveis explosões na indústria que transporta e armazena GLP é a utilização de gases inertes como: CO₂ e nitrogênio. O processo de inertização visa reduzir o potencial explosível do gás combustível injetando um diluente no sistema. No presente estudo é simulado a liberação de gás liquefeito de petróleo com dióxido de carbono. O objetivo do presente estudo é avaliar a influência do inerte (CO₂) no dimensionamento da área classificada, para isso tomou-se como base uma simulação a 10 bar com diâmetro de orifício igual a 1 mm de GLP, as composições da fase líquida do diluente e dos materiais inflamáveis são mostrados na Tabela 5.3, considerou-se para o presente estudo composições equimolares para propano e butano nas condições de armazenamento.

Tabela 5.3 – Composições nas condições de armazenamento para liberações de GLP com inerte.

| Caso | x_{CO_2} | $x_{C_3H_8}$ |
|------|------------|--------------|
| 1 | 0,03 | 0,485 |
| 2 | 0,06 | 0,470 |
| 3 | 0,09 | 0,455 |
| 4 | 0,12 | 0,440 |
| 5 | 0,15 | 0,425 |
| 6 | 0,18 | 0,410 |
| 7 | 0,21 | 0,395 |
| 8 | 0,24 | 0,380 |
| 9 | 0,27 | 0,365 |
| 10 | 0,30 | 0,350 |

As condições de temperatura e composição das fases líquida e gás na liberação foram obtidas utilizando o software Aspen Plus[®] V.8.4. O LIE de mistura foi obtido pelo método proposto por Schroeder (2016).

5.7 Planejamento dos Experimentos Computacionais

Na obtenção de pontos para construção de experimentos é recomendado o uso de uma técnica numérica para sorteios de experimentos computacionais, de forma a garantir uma distribuição ótima dos experimentos a serem realizadas em CFD.

Dentre várias técnicas de amostragem disponíveis na literatura tem-se: Monte Carlo, hipercubo latino (HL) e o vetor ortogonal (OA). No presente trabalho optou-se pelo uso da técnica hipercubo latino para geração de pontos para os experimentos computacionais.

Seja um inteiro m positivo, um quadrado latino de ordem m é um arranjo de m caracteres latinos (caracteres do alfabeto latino ou romano) em um quadro de m linhas e m colunas, onde cada letra latina aparece uma só vez em cada linha e apenas uma vez em cada coluna (SÁNCHEZ, 2011).

A Figura 5.13 apresenta um arranjo de um quadrado latino de ordem $m = 4$.

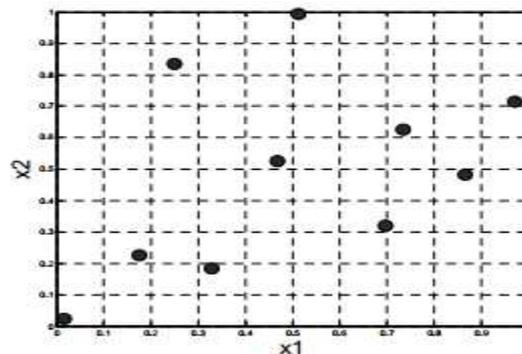
Figura 5.13 – Quadrado latino de ordem quatro.

| | | | |
|----------|----------|----------|----------|
| A | B | C | D |
| B | C | D | A |
| C | D | A | B |
| D | A | B | C |

Para obter uma amostra LHS, o intervalo de cada dimensão do espaço de amostragem é dividido em m subintervalos, que não se sobrepõem, de igual probabilidade. Para um domínio de projeto com dimensão j , este particionamento resulta num total de m^j subintervalos no domínio de projeto. Em seguida, m pontos são selecionados aleatoriamente no domínio de projeto obedecendo às seguintes restrições. Cada ponto deve ser aleatoriamente alocado dentro de um subintervalo do domínio e para cada projeção unidimensional deste ponto só haverá um e apenas um ponto em cada subintervalo (PINTO, 2014).

Considerando dez amostras e um espaço de projeto de dimensão dois, x_1 e x_2 , que é o caso do quadrado latino sendo ambas variáveis quaisquer definidas entre $[0,1]$. Como mostrado na Figura 5.14 em cada linha e coluna dos intervalos das variáveis é posicionado um e apenas um ponto e que em cada subintervalo o ponto está alocado aleatoriamente.

Figura 5.14 – LHS com dez pontos em um espaço bidimensional.



Fonte: Pinto (2014).

Dispondo dos intervalos das variáveis (pressão, diâmetro e composição) aplicou-se a técnica de amostragem hipercubo latino para obtenção dos pontos nos ranges especificados, para isso foi desenvolvido um programa na plataforma Matlab® R2014a.

Capítulo 6

Resultados e Discussões

6.1 Estudo de Independência de Malha

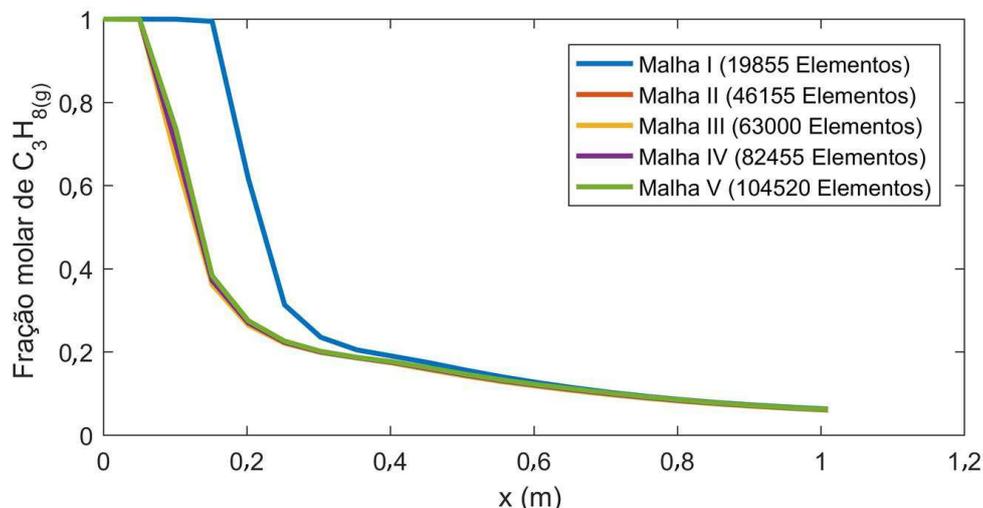
No estudo da influência da malha computacional utilizou-se cinco configurações de malhas: Malha I (19855 elementos), Malha II (46155 elementos), Malha III (63000 elementos), Malha IV (82455 elementos) e Malha V (104520 elementos). Um esquema com malha não uniforme com elementos hexahédricos mais refinados, próximo a região de liberação como mostrado na Figura 5.4 foi utilizado. O número de elementos da malha I teve como referência a malha numérica utilizada por Souza (2016) que foi de aproximadamente 20000 elementos, as gerações das malhas subsequentes foram realizadas tentando manter o passo de crescimento do número de elementos na ordem de grandeza da malha I, porém para manter a estrutura nas malhas subsequentes (II, III, IV e V) ajustes no número de elementos se mostraram necessários o que resultou em malhas com mais elementos do que se havia inicialmente planejado.

A fração molar do material inflamável foi escolhida para monitorar a influência da malha, o perfil de concentração ao longo de uma linha com origem no centro do orifício foi avaliado para diferentes tamanhos de malha para uma liberação de propano ($P = 17$ bar e $d = 1$ mm), como mostrado na Figura 6.1. A escolha da linha no centro do jato ocorreu devido ser nessa localização onde a extensão da atmosfera explosiva é obtida, sendo nesse local onde a maior extensão é observada, pois a pluma tem um formato aproximadamente elíptico.

Analisando a Figura 6.1 é possível notar que a partir da malha II a V os resultados dos perfis da fração molar de propano ao longo da linha tendo como origem o centro do

orifício são idênticos. A malha III com aproximadamente 63000 elementos hexaédricos foi utilizada.

Figura 6.1 – Perfis de concentração de gás propano para diferentes malhas.



6.2 Análise do Número de Partículas Computacionais

Um estudo de sensibilidade das variáveis de interesse extensão e volume da atmosfera explosiva com o número de partículas computacionais foi realizado ($P = 17$ bar e $d = 2$ mm). Como pode ser observado na Tabela 6.1 o número de partículas computacionais tem pouca influência nessas variáveis, sendo praticamente constante a partir de 1000 gotas computacionais.

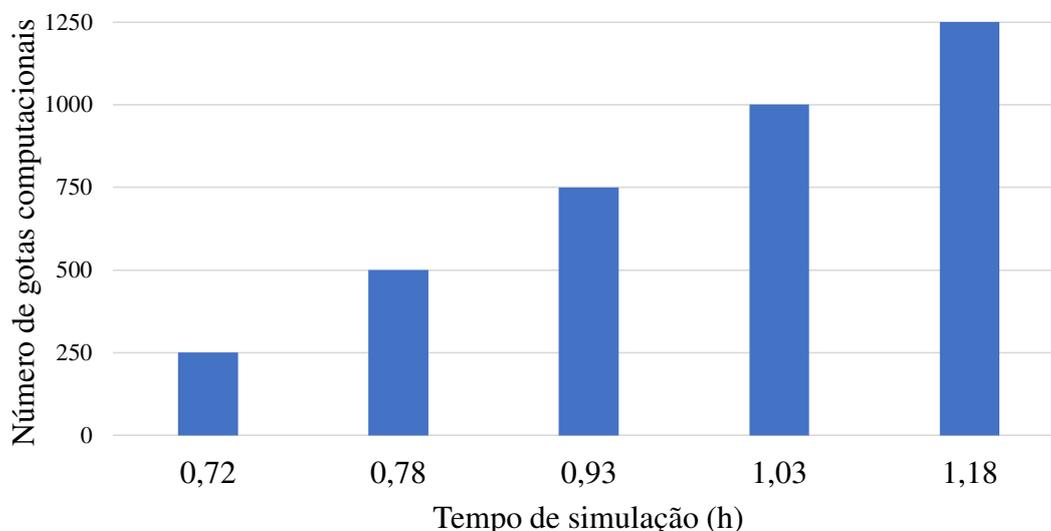
Tabela 6.1 – Efeito do número de gotas computacionais nos resultados.

| Número de Gotas Computacionais | Extensão no LIE (m) | Extensão em ½ LIE (m) | Volume no LIE (m³) | Volume em ½ LIE (m³) |
|--------------------------------|---------------------|-----------------------|--------------------|----------------------|
| 250 | 2,37360 | 4,65265 | 0,063331 | 0,397713 |
| 500 | 2,28128 | 4,53163 | 0,061186 | 0,391814 |
| 750 | 2,28128 | 4,53163 | 0,062154 | 0,393765 |
| 1000 | 2,31165 | 4,53163 | 0,062537 | 0,395231 |
| 1250 | 2,31165 | 4,53163 | 0,062524 | 0,395225 |

A Figura 6.2 mostra a influência do número de gotas computacionais no tempo de simulação para os casos descritos na Tabela 6.1, como é possível observar à medida que aumenta-se o número de gotas computacionais usadas tem-se um acréscimo no tempo de simulação. Assim, levando em consideração que há uma elevação do custo computacional com o aumento do rastreamento de gotas reais, foram utilizadas 1000 gotas computacionais para representar as possíveis trajetórias das gotas reais.

Como 1000 gotas são injetadas em uma fatia de 4 graus do domínio, isso significa para o domínio cilíndrico (360 graus) tem-se um total de 90000 partículas computacionais entrando no domínio.

Figura 6.2 – Efeito do número de partículas computacionais no tempo de simulação.



6.3 Análise da Liberação Bifásica

Com o objetivo de investigar o comportamento das diversas variáveis da fase contínua e dispersa na liberação, o propano foi utilizado no presente estudo. A Tabela 6.2 apresenta os dados e parâmetros utilizados.

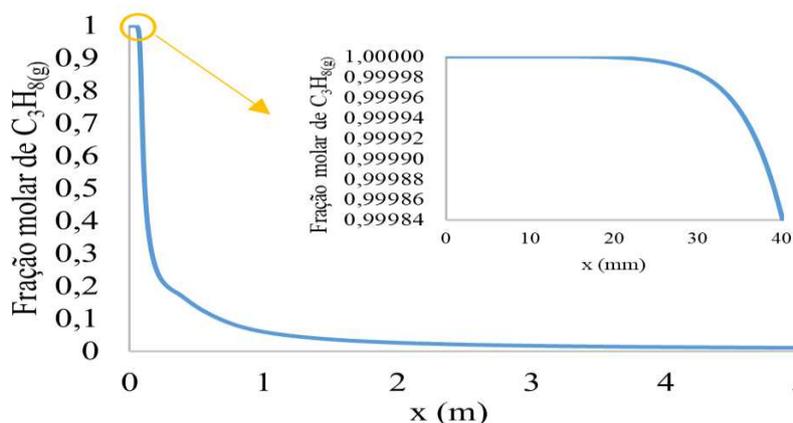
Tabela 6.2 – Dados e parâmetro da simulação.

| Parâmetro | Valor |
|--|----------------------|
| Ângulo do spray | 19 [graus] |
| Velocidade inicial | 54 [m/s] |
| Vazão mássica de líquido | 0,0139 [Kg/s] |
| Temperatura de entrada | 231 [K] |
| Diâmetro médio de partícula | 62 [μm] |
| Parâmetro de espalhamento | 2,0 |
| Pressão de armazenamento | 17 [bar] |
| Temperatura ambiente | 298,15 [K] |
| Diâmetro do orifício | 2 [mm] |
| Número de partículas computacionais rastreadas na fatia de 4 graus | 1000 |

Para o caso apresentado na Tabela 6.2, 1000 gotas computacionais foram usadas para representar as possíveis trajetórias das 2.128.671 gotas por segundo que entram na fatia de 4 graus. O número real de partículas que entram no ambiente correspondente a vazão mássica de líquido é de 191.580.429 gotas por segundo.

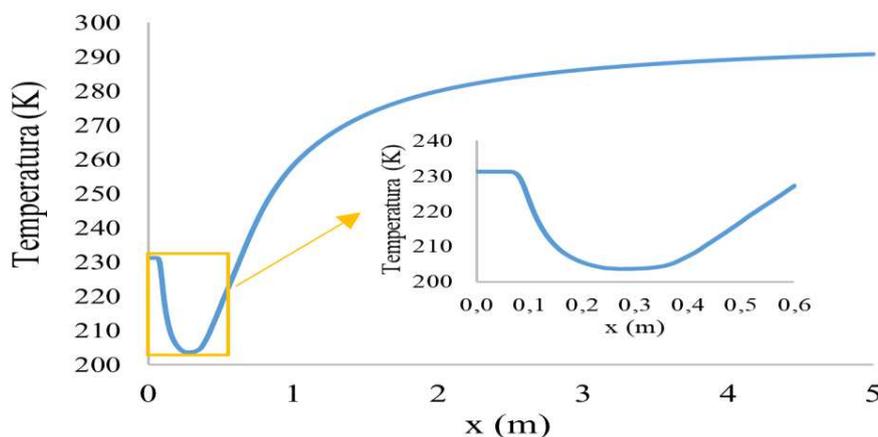
O perfil de concentração do jato na direção axial é mostrado na Figura 6.3, inicialmente na zona de expansão próximo ao orifício tem-se que a concentração do propano permanece constante devido não ocorrer *entrainment*, para o caso descrito na Tabela 6.2 a distância foi de 15 vezes o diâmetro do orifício, logo após ocorre a diluição da concentração de propano pelo contato com o ar.

Figura 6.3 – Concentração de gás propano ao longo da liberação.



Como observado na Figura 6.4 a temperatura da fase contínua reduz a uma temperatura mínima abaixo da temperatura de ebulição isso ocorre devido ao intenso processo de vaporização das gotas, após esse ponto o fenômeno de vaporização perde relevância, a temperatura da fase gás é elevada pelo ar ambiente com uma tendência de que o equilíbrio térmico seja atingido.

Figura 6.4 – Temperatura do gás propano ao longo da liberação.

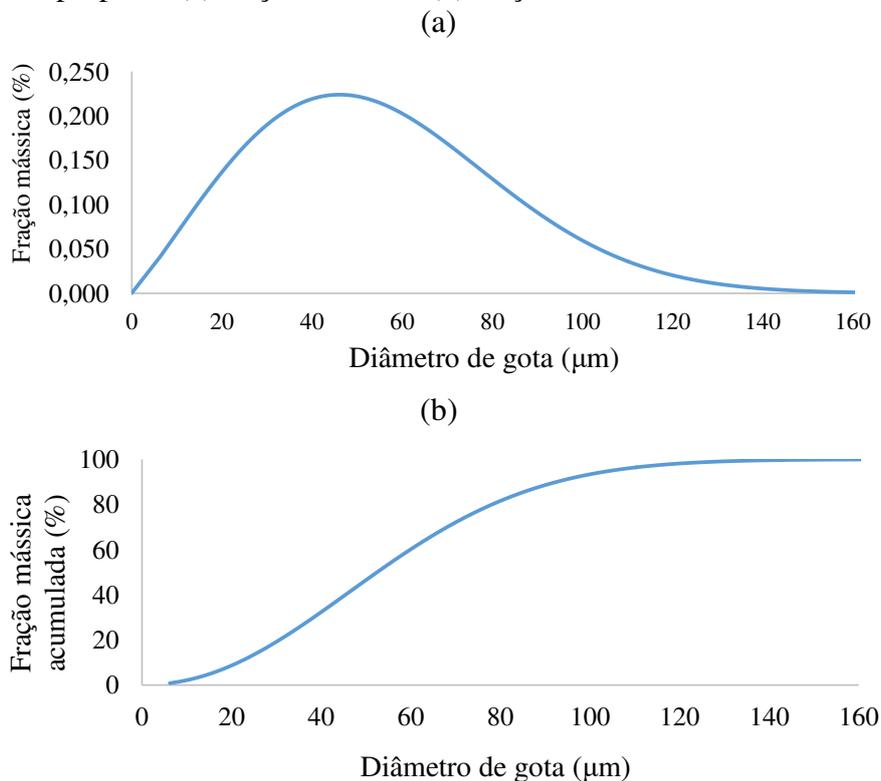


A razão x/d_0 foi calculada o que permite verificar se a liberação flashing está no intervalo $150 < x/d_0 < 170$ proposto por Polanco et al. (2010) que caracteriza a distância onde a temperatura alcança o seu valor mínimo (MTD), para o caso simulado o valor obtido de x/d_0 foi de aproximadamente 138 com valor de temperatura de 204 K como mostrado na Figura 6.4.

Gotas pequenas, evaporam-se mais rapidamente que gotas grandes, pois a sua superfície, relativamente ao volume, é maior (COSTA et al., 2018). Assim o uso de um modelo de distribuição de tamanho de gotas é de fundamental importância para uma representação mais precisa do fenômeno de liberação, e mais adequado do que a hipótese de distribuição monodispersa frequentemente utilizada.

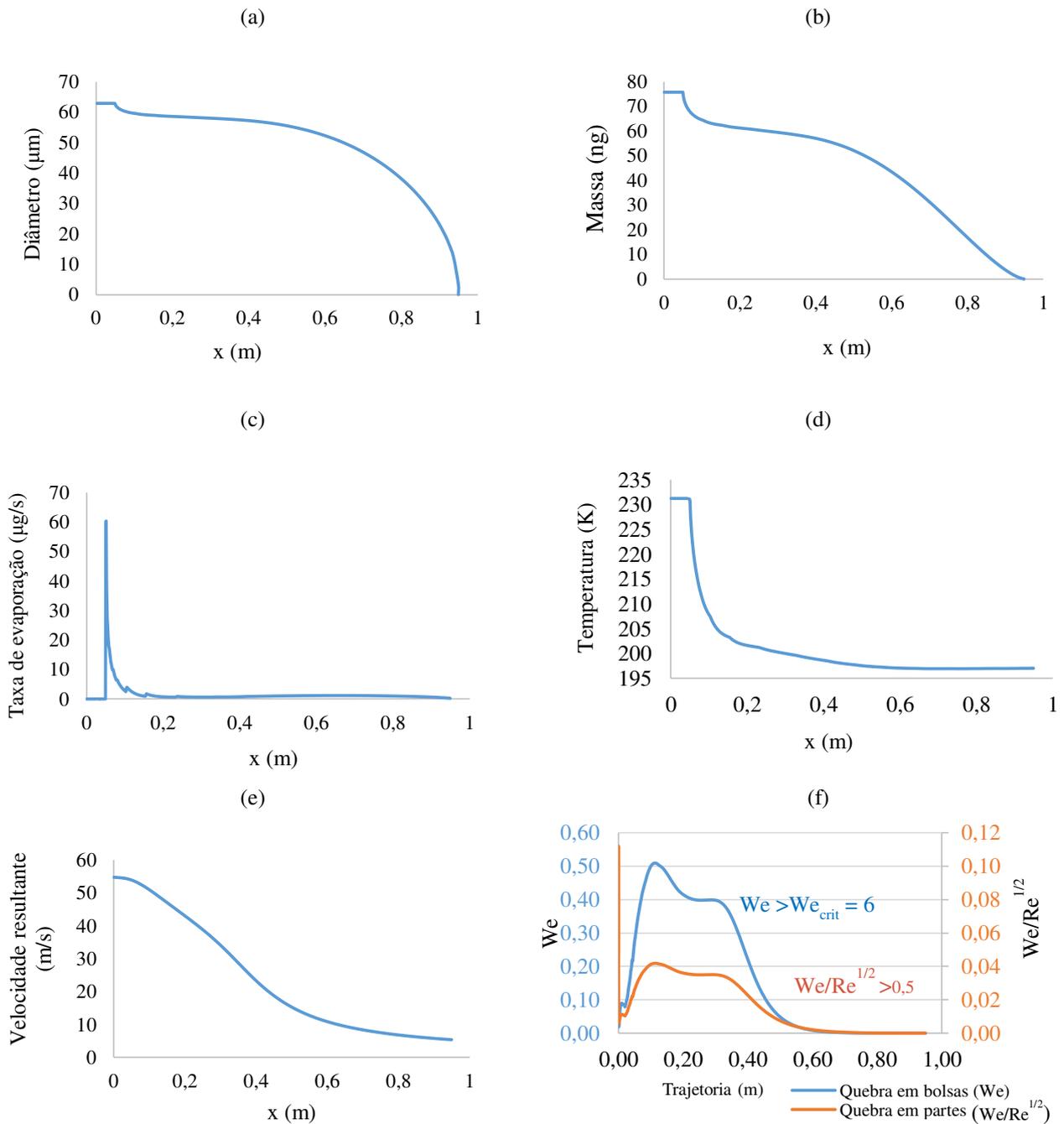
A distribuição de tamanho de partícula no orifício para o caso descrito na Tabela 6.2 é mostrado na Figura 6.5. O diâmetro mínimo de partícula previsto pela distribuição de Rosin Rammler corresponde a 10% do diâmetro médio. A Figura 6.5(a) fornece a fração mássica individual de cada gota na distribuição de tamanhos, enquanto na Figura 6.5(b) a distribuição de tamanhos é expressa em termos da fração mássica acumulada onde é obtida a concentração de partículas cujo diâmetro é menor do que o diâmetro analisado.

Figura 6.5 – Distribuição de tamanho de partícula no orifício para liberação de propano: (a) fração mássica; (b) fração mássica acumulada.



Os resultados correspondentes a fase líquida, foram obtidos a partir de uma gota com tamanho igual ao diâmetro médio especificado na Tabela 6.2 e localizada no centro do jato. A Figura 6.6 ilustra o comportamento das variáveis: diâmetro, massa, taxa de evaporação, temperatura, velocidade e regime de quebra.

Figura 6.6 – Perfis típicos para a gota de propano: (a) diâmetro; (b) massa; (c) taxa de evaporação; (d) temperatura; (e) velocidade; (f) regime de quebra.



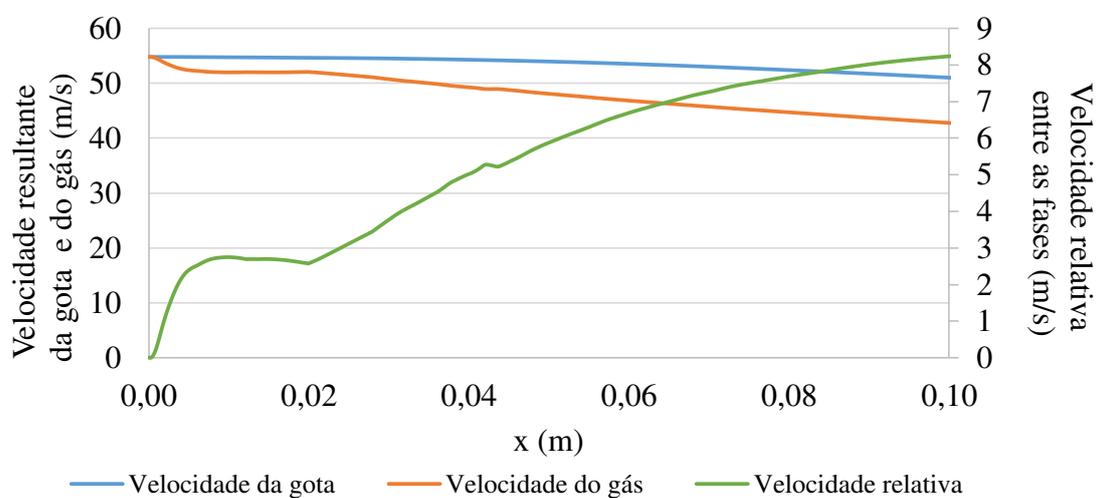
Imediatamente após a liberação não ocorre evaporação. Consequentemente a gota permanece com diâmetro e massa constante, isso ocorre devido não haver *entrainment* do ar no jato bifásico na zona de expansão. A temperatura permanece constante na zona de expansão, logo após, devido a intensa evaporação da gota evidenciada pelo pico na Figura 6.6e, ela reduz repentinamente, depois permanece aproximadamente constante, como também sua taxa de evaporação. Uma possível explicação da taxa de evaporação máxima ser alcançada logo após a gota sair da zona de expansão, como mostrado na Figura 6.6e, é que nesse ponto a área superficial dela é maior, potencializando a transferência de massa. Como observado a gota analisada atingiu uma distância de aproximadamente 0,95 metros até evaporar-se completamente.

Os perfis obtidos nas Figuras: 6.6a, 6.6c e 6.6d estão em concordância com resultados experimentais reportados por Jin et al. (2010).

Os parâmetros utilizados do modelo de quebra da partícula alcançaram valores máximos ($We_{max} = 0,5091$ e $We/Re^{1/2}_{max} = 0,1120$) inferiores aos limites estipulados no modelo de quebra de gota utilizado, como mostrado na Figura 6.6f, portanto pode-se concluir que essa gota não se quebra e todos os efeitos são atribuídos a evaporação.

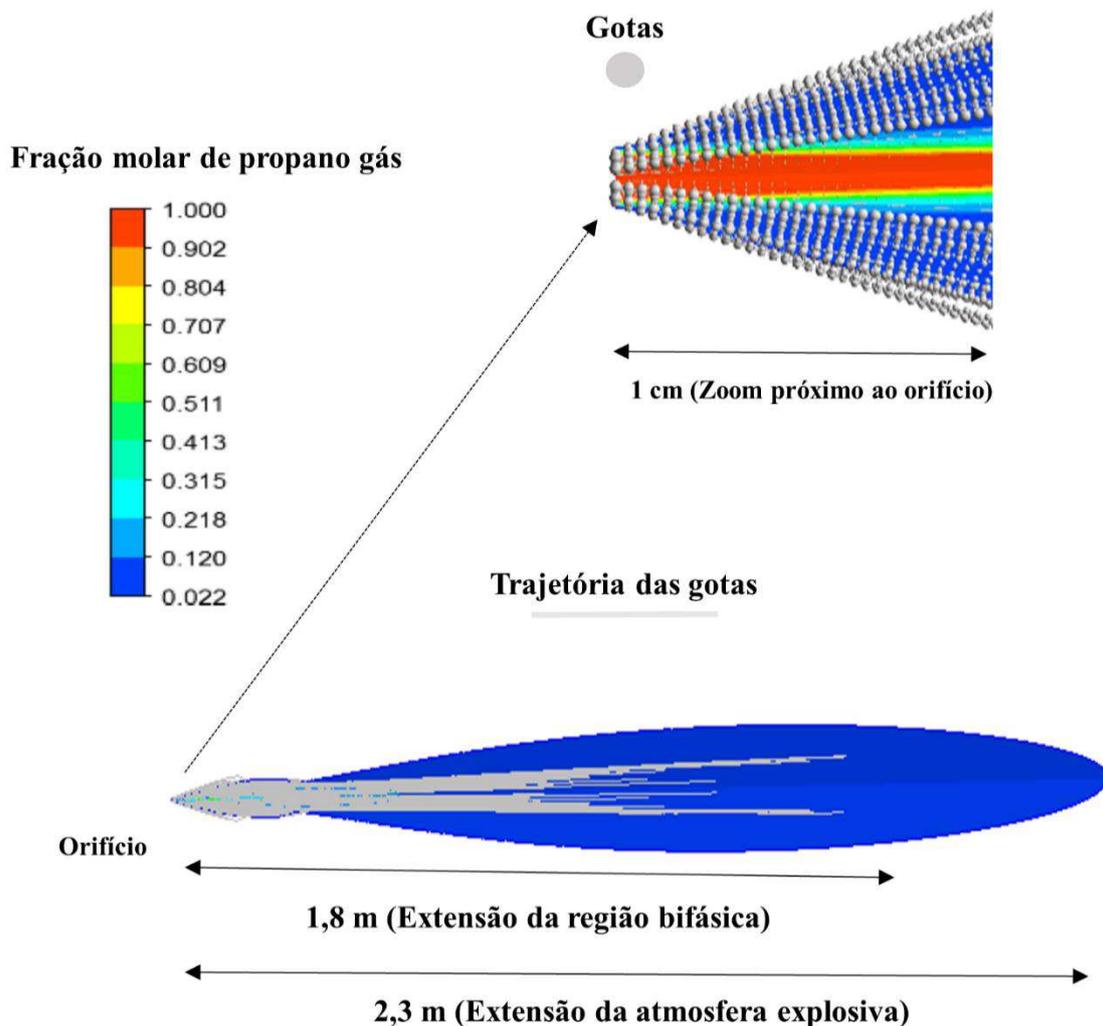
Inicialmente, ao sair do orifício tem-se um decaimento mais acentuado da fase gás em relação a velocidade da gota rastreada como mostrado na Figura 6.7, isso se deve ao fato da gota ter uma maior inércia que a fase gás acarretando em um aumento da velocidade relativa entre as fases ao qual impacta diretamente nos números de Weber e Reynolds resultando no comportamento dos parâmetros de quebra mostrados na Figura 6.6f.

Figura 6.7 – Perfis de velocidade próximo ao orifício de liberação.



A Figura 6.8 ilustra a extensão da nuvem de gás inflamável no LIE que para o propano corresponde a fração molar de 2,2 % (CARSON e MUMFORD, 2002) resultando em uma extensão de 2,3 m. Um destaque é dado a região próxima ao orifício que corresponde a 100 gotas computacionais em um faixa $\pm 20\%$ do diâmetro médio que, propositalmente, estão na cor cinza possibilitando uma melhor visualização da fase dispersa. A região bifásica para esse caso possui uma extensão de 1,8 metros, como mostrada na Figura 6.8.

Figura 6.8 – Liberação bifásica de propano.



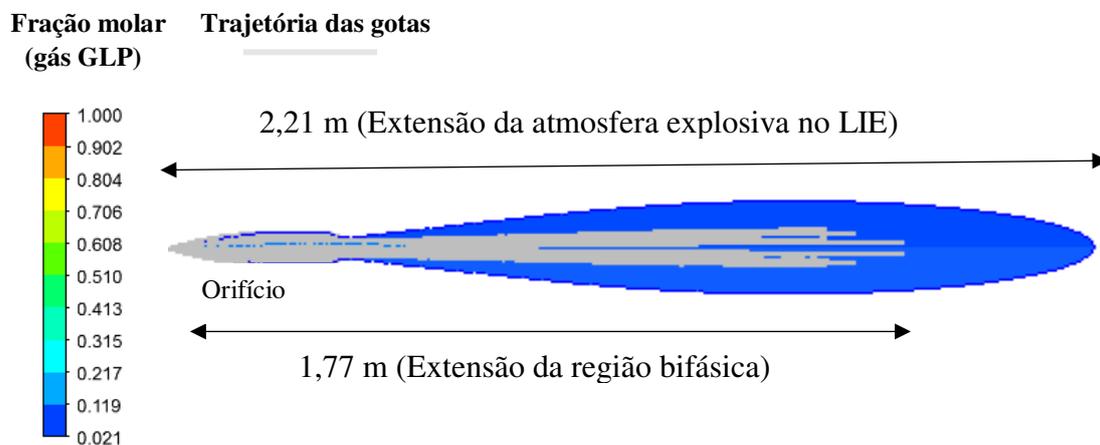
A Figura 6.9 ilustra a liberação de GLP no LIE para as condições descritas na Tabela 6.3 assim como na liberação de propano (Figura 6.8) a região bifásica ficou limitada ao contorno da pluma delimitada pelo LIE.

A extensão da pluma no LIE e da região bifásica foi semelhante comparado ao caso da liberação de propano puro devido à proximidade das propriedades do GLP com a do propano.

Tabela 6.3 – Dados e parâmetro da liberação bifásica de GLP.

| Parâmetro | Valor |
|--|-------------------------|
| Ângulo do spray | 18,8 [graus] |
| Velocidade inicial | 51,782 [m/s] |
| Vazão mássica de líquido | 0,0117 [Kg/s] |
| Temperatura de entrada | 254,60 [K] |
| Fração molar de propano na fase gás orifício | 65 [%] |
| Fração molar de propano na fase líquida orifício | 27 [%] |
| Diâmetro médio de partícula | 57,87 [μm] |
| Parâmetro de espalhamento | 2,0 |
| Pressão de armazenamento | 17 [bar] |
| Temperatura ambiente | 298,15 [K] |
| Diâmetro do orifício | 2 [mm] |
| LIE _{mist} | 2,085 [%] |
| Número de partículas computacionais rastreadas na fatia de 4 graus | 1000 |

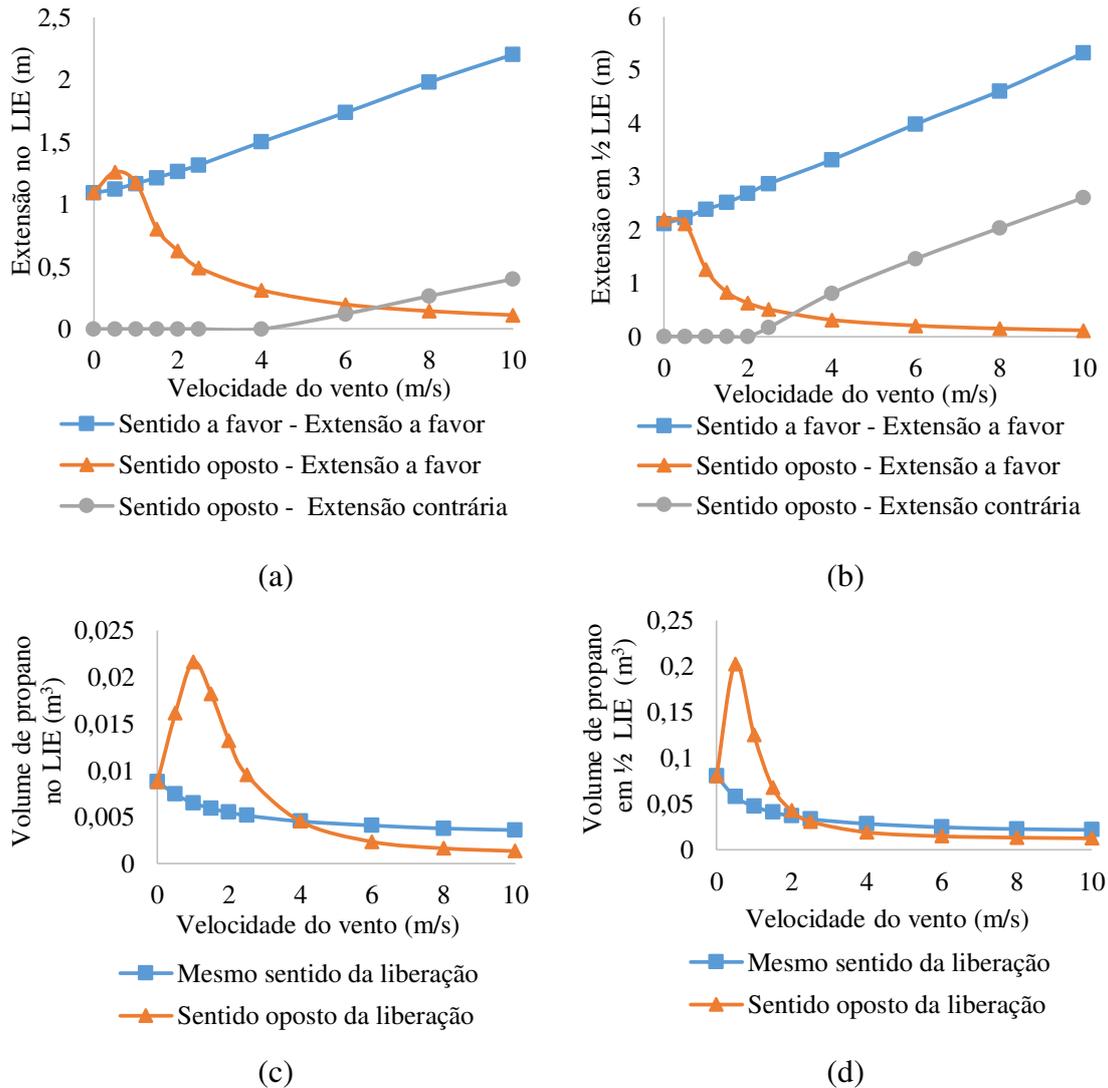
Figura 6.9 – Liberação bifásica de GLP.



6.4 Influência do Vento na Área Classificada

A influência da intensidade e sentido do vento na área classificada foi estudada, variando a intensidade do vento na faixa de 0-10 m/s, fluindo no sentido oposto e no mesmo sentido da liberação. No presente trabalho essas duas variáveis são analisadas para um caso base de liberação de propano com pressão no reservatório de 15 bar e com diâmetro de 1 mm. Os resultados obtidos são mostrados na Figura 6.9.

Figura 6.9 – Análise da influência do vento na liberação de propano liquefeito: (a) extensão no LIE; (b) extensão em ½ LIE; (c) volume no LIE; (d) volume em ½ LIE.



À medida que a velocidade do vento aumenta na mesma direção do vazamento tem-se um acréscimo da extensão da pluma e uma redução no seu volume como pode ser observado nas Figura 6.9a-b. Isso ocorre devido ao arraste do gás inflamável pelo vento que ao mesmo tempo atua diluindo a nuvem de gás inflamável liberada.

Para vento no sentido oposto ao da liberação, um aumento na extensão pode ser observado, a velocidades do vento de 0,5 e 1 m/s para o LIE e 0,5 m/s para ½ LIE como mostrado nas Figura 6.9a-b, respectivamente, como também para o volume como pode ser observado nas Figura 6.9c-d, a explicação mais razoável encontrada é que o vento com baixas velocidades atue de forma a reduzir o *entrainment* do ar no jato, para velocidades mais elevadas o vento achata a pluma reduzindo sua extensão na direção da liberação, iniciando também o processo de diluição fazendo com que o volume da pluma

seja reduzido. Para velocidades maiores do vento contrárias à liberação, observa-se a formação da pluma no sentido oposto a liberação. Para velocidades de 2 m/s, a pluma na direção contrária existe em $\frac{1}{2}$ LIE, enquanto que a partir de 4 m/s a pluma contrária existe no LIE, assim para velocidades acima destes valores em ambos os casos observa-se um aumento da extensão com o aumento da velocidade do vento, resultando em um comportamento similar à situação do vento no mesmo sentido da liberação.

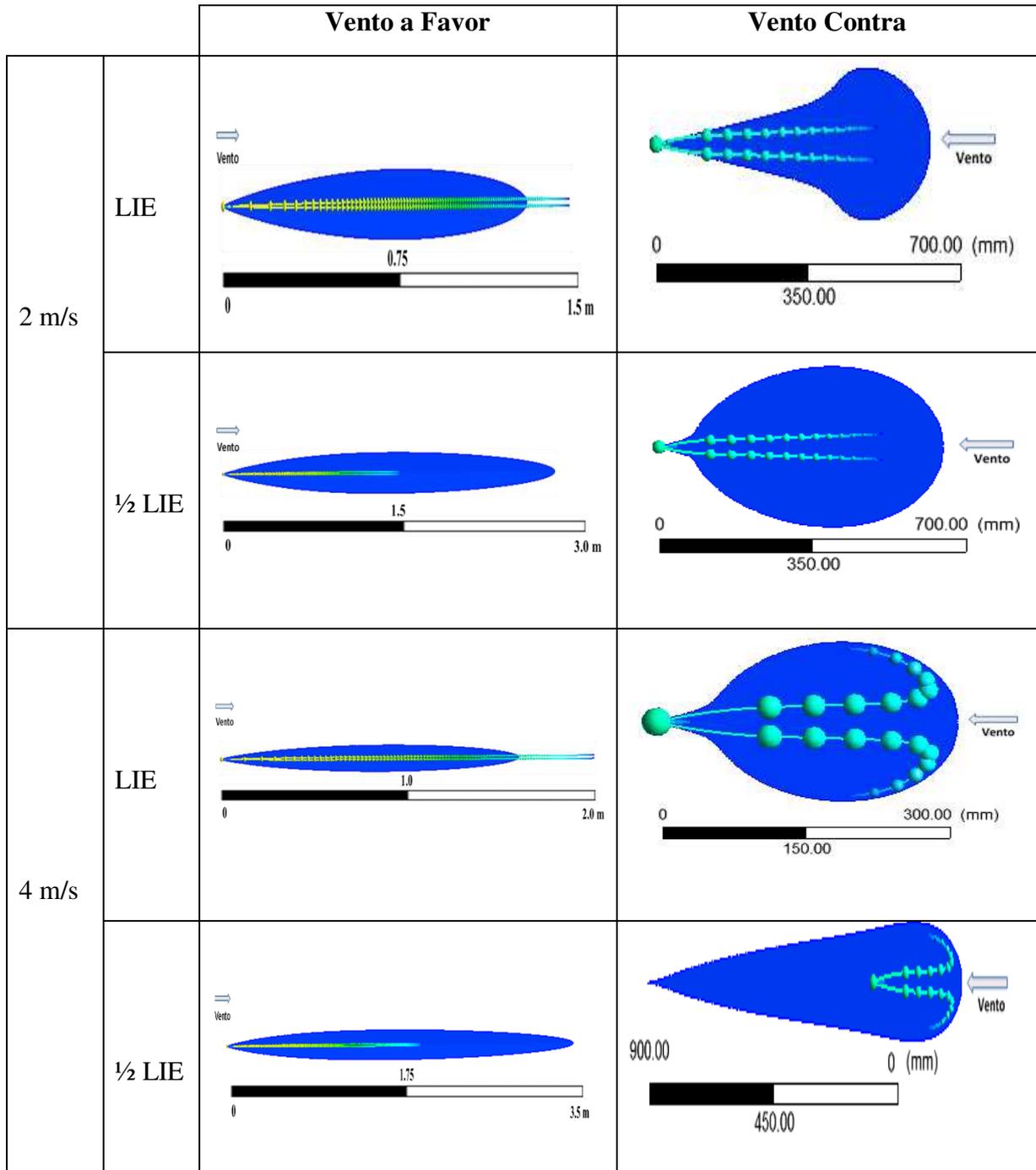
Tomando como base trabalhos reportados por Sousa (2016) e Mannan (2005), como também resultados obtidos no presente trabalho, para fins de classificação de área três situações são relevantes: a) sem vento; b) vento a favor da liberação do jato; c) vento contra a liberação do jato. O vento no sentido oposto ao jato representa a menor extensão, mas com o maior fator de risco. O vento em fluxo co-corrente com o jato representa a maior extensão, mas com um fator de risco mais baixo. Sem vento, há uma extensão e fator de risco de valor intermediário.

Ventos transversais não têm, para estudo de classificação de área, aplicação. Note-se que esta situação é completamente diferente do transporte de poluentes, por exemplo das chaminés, onde o vento cruzado é a situação de interesse porque a pluma é lançada verticalmente e o vento é horizontal, sendo o principal responsável pela dispersão de poluentes. No entanto, no estudo de classificação de área, o sentido do vazamento não é conhecido a priori, então os extremos de interesse são os ventos nos sentidos a favor e contra o jato. Os resultados obtidos com vento estão em concordância com estudo em CFD conduzidos por Souza (2016) para liberações monofásicas de gás, como também no comportamento de jatos na presença de ventos reportados por Mannan (2005).

A Figura 6.10 ilustra o comportamento do jato em situações com velocidades de vento de 2 e 4 m/s, para ventos com a mesma direção da liberação é possível observar o aumento da extensão da pluma com a elevação da velocidade, como também uma redução no volume pelo perfil mais afilado, uma gota com tamanho igual ao diâmetro médio da distribuição foi utilizada para representar a fase dispersa, como pode-se constatar a medida que aumenta-se a velocidade do vento observa-se um acréscimo na distância ocasionado pelo maior arraste.

Para vento contrário a fonte de liberação, no LIE o vento impacta diretamente no formato concentrando-a próximo a fonte de liberação para vento com velocidade de 2 m/s a gota não sofre sua influência, permanecendo sua trajetória inalterado. Para vento contrário com 4 m/s a gota tem sua trajetória alterada para o sentido inverso até sua total evaporação. Em 50 % do LIE o vento de 4 m/s causa a inversão de grande parte da pluma.

Figura 6.10 – Influência do vento no comportamento da liberação.



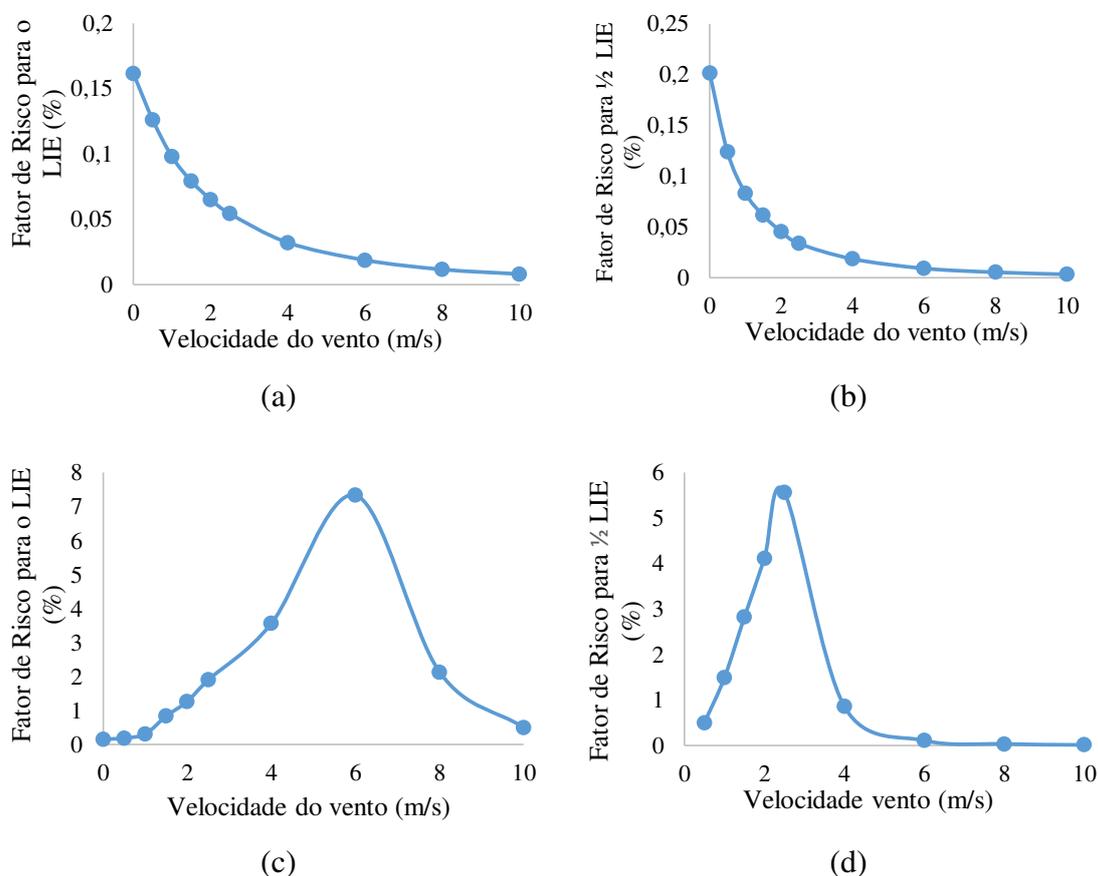
6.5 Análise do Fator de Risco

A probabilidade de ignição diminuirá à medida que a velocidade do vento aumenta no mesmo sentido da liberação como observado nas Figura 6.11a-b. Isso pode ser explicado pelo transporte convectivo do material inflamável pelo vento, resultando em maior extensão o que aumenta o volume da esfera em torno da fonte de liberação

(denominador da Equação 3.1) e simultaneamente reduz o volume da pluma (numerador da Equação 3.1) contribuindo assim para a redução do fator de risco.

Conforme observado nas Figura 6.11c-d, para os casos de ventos contrários à liberação, com o aumento da intensidade do vento, o risco de ignição aumenta até velocidades do vento de 6 m/s para o LIE e 2,5 m/s para 1/2 LIE, isso pode ser ocasionado devido à acumulação de gás inflamável perto da região de liberação que reduz a extensão diminuindo o volume da esfera em torno da fonte de liberação. Baseado nos resultados obtidos (Figura 6.9) para velocidades mais elevadas, a uma inversão da pluma com consequente redução do volume da pluma e aumento do raio da esfera, ocasionado uma redução no fator de risco.

Figura 6.11 – Influência do sentido e intensidade do vento no fator de risco: (a) e (b) vento e jato no mesmo sentido; (c) e (d) vento e jato em sentidos opostos.



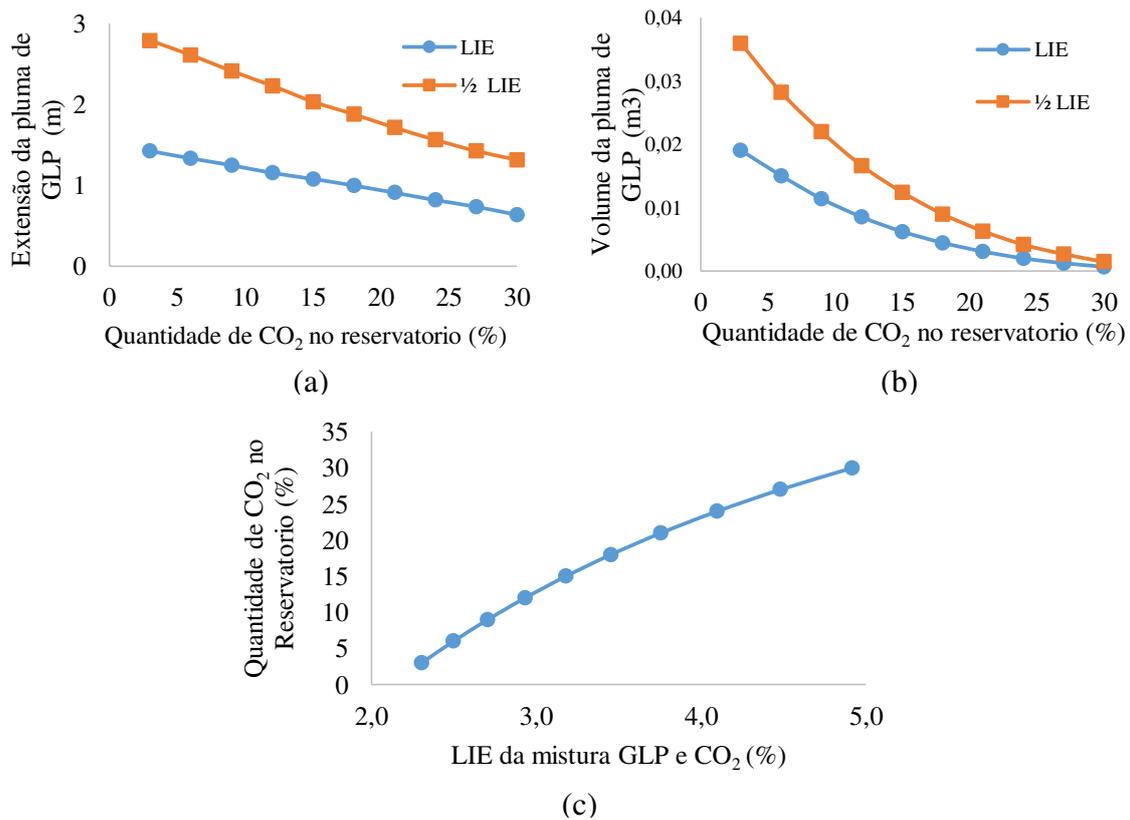
6.6 Liberação de GLP com Inerte

Na Figura 6.12a-b estão representados, respectivamente, a extensão e volume da atmosfera explosiva como função da quantidade de CO₂ nas condições de armazenamento, pode-se observar que à medida que a quantidade de CO₂ é elevada no

armazenamento tem-se uma redução acentuada na extensão e no volume da atmosfera explosiva, respectivamente. No LIE e em 50% do LIE tem-se reduções de aproximadamente 55 e 53 % na extensão comparando o caso de menor concentração de CO₂ (3%) com o máximo analisado (30%), para o volume da atmosfera explosiva a redução chega a 99 % (no LIE) e 96% (em ½ LIE).

Os resultados obtidos nas Figuras 6.12a-b retifica o observado por Wankhede (2018) onde ele afirma que o principal efeito do inerte é o aumento do limite inferior de explosividade como observado na Figura 6.12c, esse fato ocorre devido a uma maior quantidade de combustível ser necessária para que a combustão ocorra. A presença de inerte também reduz o limite superior de explosividade LSE. As alterações simultâneas no LIE e no LSE pelo inerte reduz o intervalo de concentração (Figura 3.1) onde os vapores da substância que está sendo liberada podem entrar em combustão, sendo assim como a extensão e volume diminuem com o aumento do LIE, os resultados obtidos estão alinhados com o comportamento teórico esperado por Wankhede (2018).

Figura 6.12 – Análise da influência de inerte na liberação de GLP: (a) extensão da atmosfera explosiva; (b) volume da atmosfera explosiva; (c) limite inferior de explosividade da mistura GLP e CO₂.



6.7 Validação do Modelo

Os perfis de velocidade obtidos pelo CFD são comparados aos dados experimentais da literatura obtida para liberação de propano à pressão de 770 kPa e diâmetro do orifício de 4 mm usando a técnica LDA (ALLEN, 1998a). Os perfis do modelo e experimental são representados na Figura 6.13.

Na Figura 6.13a as medidas experimentais de velocidade axial mostram a queda da velocidade axial ao longo da linha central, o decaimento de velocidade ao longo do eixo do jato foi previsto com acurácia pelo modelo.

A Figura 6.13b indica que a velocidade em uma posição radial a 0,5 m da fonte de liberação, o perfil de velocidade experimental aproxima-se de um perfil gaussiano, reforçando a hipótese de axissimetria utilizada, os resultados do modelo apresentam boa concordância quando comparados com os dados experimentais.

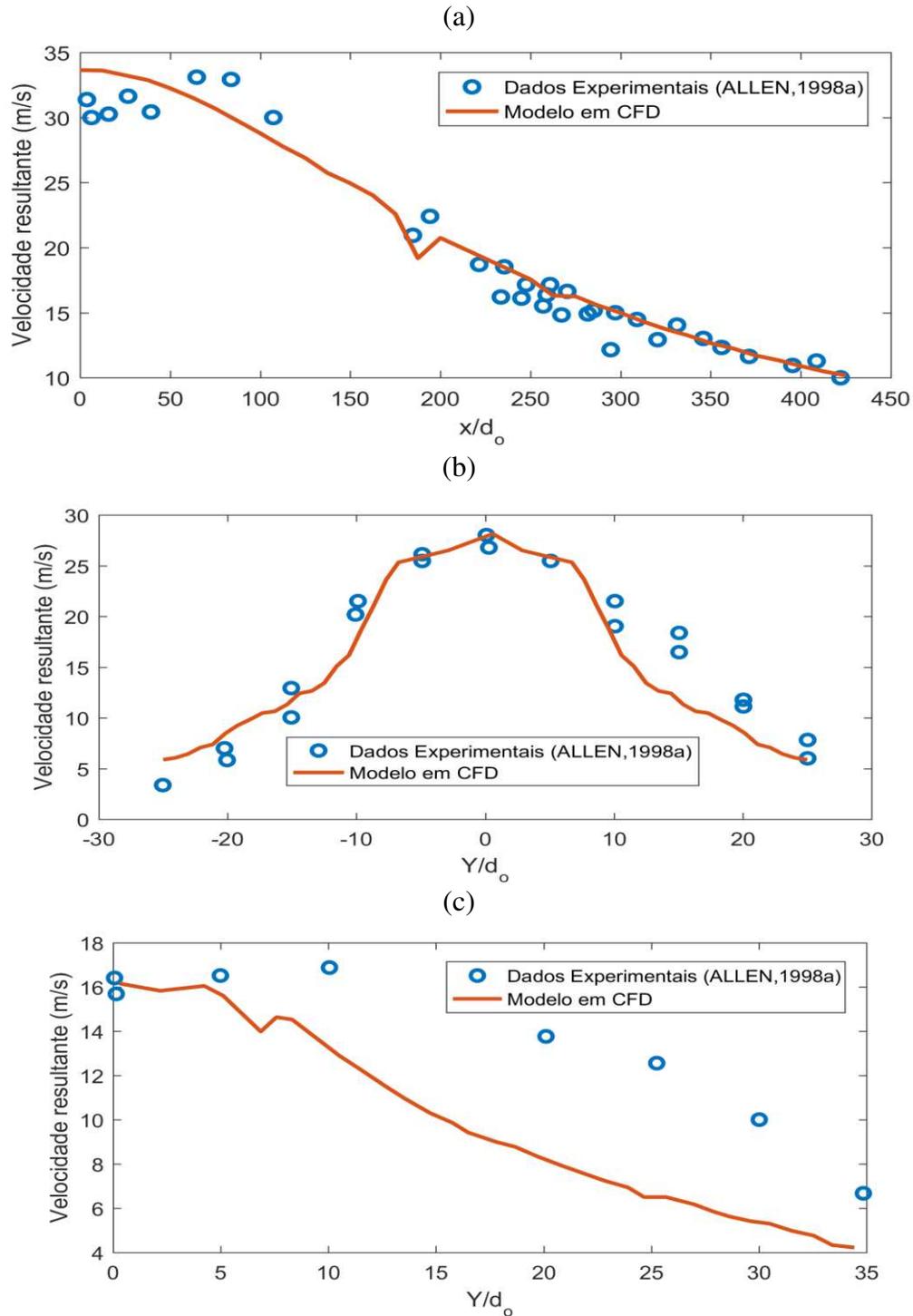
A Figura 6.13c mostra o perfil de velocidade em uma posição radial a aproximadamente 1,0 m da fonte de liberação, pode-se observar que o perfil obtido via simulação numérica subestima o experimental nessa localidade, resultados semelhantes foram obtidos por Kelsey (2001) e Aamir e Watkins (2000).

De acordo com Kelsey (2001) à medida que a distância de medição aumenta recai em regiões onde a população de gotas é dispersa, isto pode afetar os resultados do modelo dado que a abordagem utiliza um número limitado de gotas computacionais para representar milhões de gotas reais, o que pode tornar a amostra estatisticamente não representativa. Com medições experimentais de LDA como conduzidas por Allen (1998a) é possível reduzir este efeito aumentando a duração da medição para manter constante o número de gotas amostradas, porém isso não é possível de se fazer em uma simulação em estado estacionário. Obviamente, o número de gotas computacionais usadas na simulação poderia ser elevado com consequente aumento do custo computacional, porém, o efeito do número de partículas computacionais é mínimo nas variáveis de interesse (volume e extensão da atmosfera explosiva) como mostrado na Tabela 6.1, a partir de um determinado número. Segundo Kelsey (2001) isso se deve ao fato dos termos fontes que ligam a fase dispersa e contínua serem ponderados pela massa e não pelo número de partículas.

Assim, apesar da divergência entre o perfil de velocidade do modelo e o obtido experimentalmente a uma distância de 1 m mostrado na Figura 6.13c pode-se afirmar com

base no exposto anteriormente que esse resultado não acarreta em prejuízo relevante a análise proposta no presente trabalho.

Figura 6.13 – Perfis de velocidade do $C_3H_8(l)$: (a) axial; (b) radial em $x = 500$ mm; (c) radial em $x = 1028$ mm.



6.8 Desenvolvimento de uma Equação para Estimativa da Extensão da Área Classificada

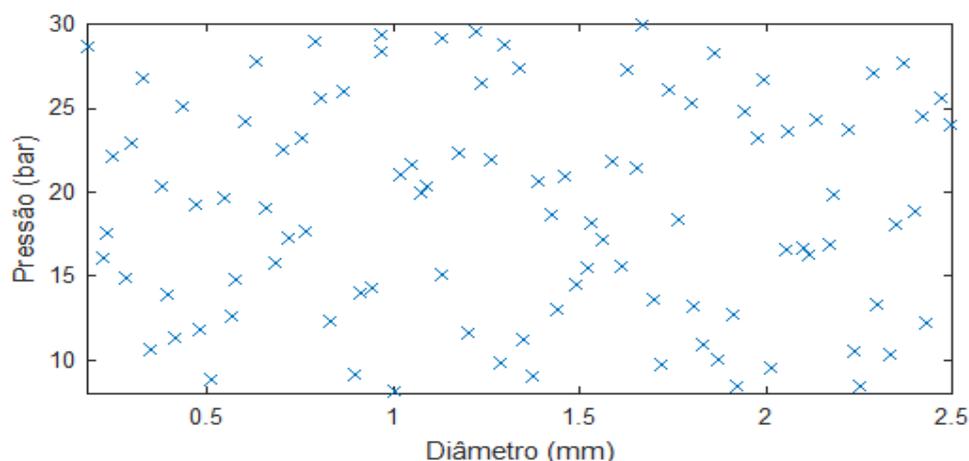
Devido ao elevado custo computacional do uso de técnicas de CFD que no presente trabalho requer um tempo de aproximadamente 1 hora para obtenção de um único resultado utilizando um servidor de alto desempenho. A elevada complexidade e custos para a realização de experimentos limita o seu uso para este fim, sendo assim o presente trabalho propõe o uso de CFD para o desenvolvimento de uma equação para o cálculo da extensão da área classificada.

Tendo como base os trabalhos desenvolvidos por Tommasini (2013) e Souza (2016) para liberação gasosa foi proposta a análise da extensão da área classificada como função das variáveis: massa molar (M), fração molar (x_n) e vazão mássica (Q_m).

$$\text{Extensão} = f(M, x_n, Q_m) \quad 6.1$$

Na análise da extensão com as variáveis descrita pela relação 6.1 o Hipercubo Latino foi utilizado para a obtenção de pontos para os experimentos computacionais, utilizou-se propano e variou-se o diâmetro em um range 0,18-2,5 mm (IEC 60079-10-1, 2015) e pressões de 8-30 bar, com esses intervalos gerou-se 100 casos como ilustrado na Figura 6.14. Os resultados desses casos estão disponíveis no apêndice do presente trabalho.

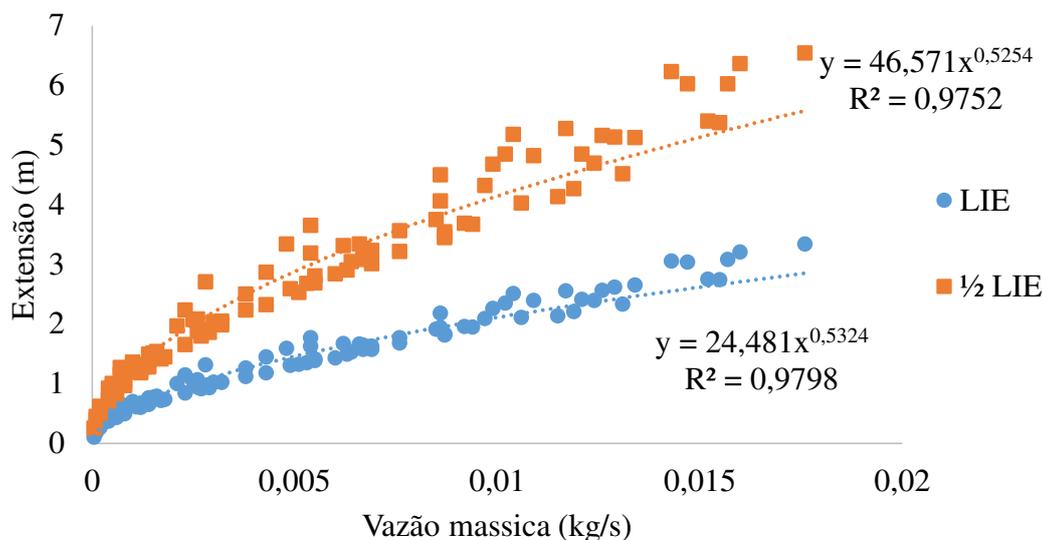
Figura 6.14 – Pontos obtidos pelo hipercubo latino para 100 casos de liberação de propano.



As extensões obtidas via CFD no LIE e $\frac{1}{2}$ do LIE para os 100 casos simulados estão representados no gráfico da extensão em função da quantidade material liberado (Figura 6.15) se ajustam a uma função potência com expoente em torno de $\frac{1}{2}$, assim para

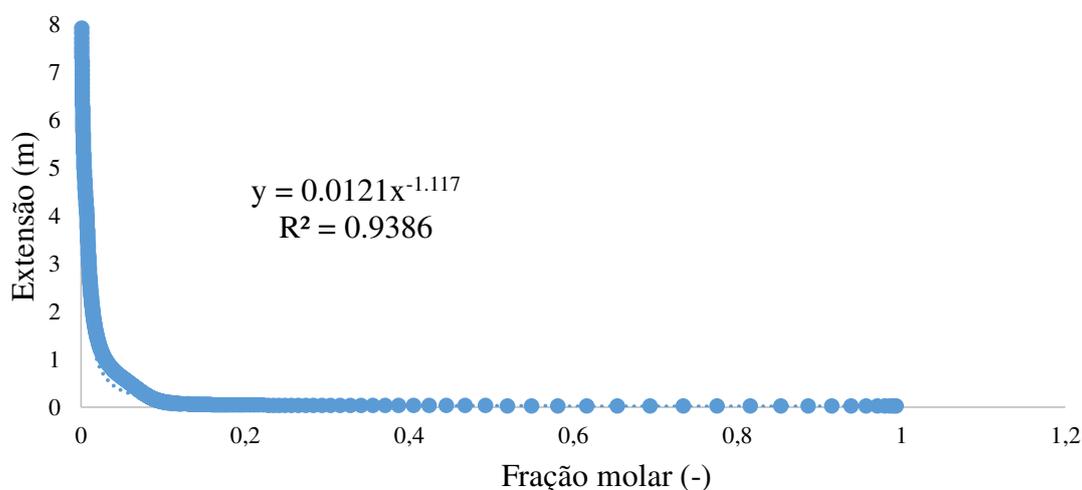
diferentes concentrações as extensões são proporcionais a aproximadamente a raiz quadrada.

Figura 6.15 – Comportamento da extensão com a taxa de liberação de propano para os 100 casos simulados.



De acordo com a Figura 6.16 o comportamento da extensão da atmosfera explosiva é inversamente proporcional a fração molar do gás inflamável, como pode ser observado pela potência da função ser aproximadamente -1.

Figura 6.16 – Extensão em função da fração molar para a liberação de propano a 20,64 bar e 1,4 mm.



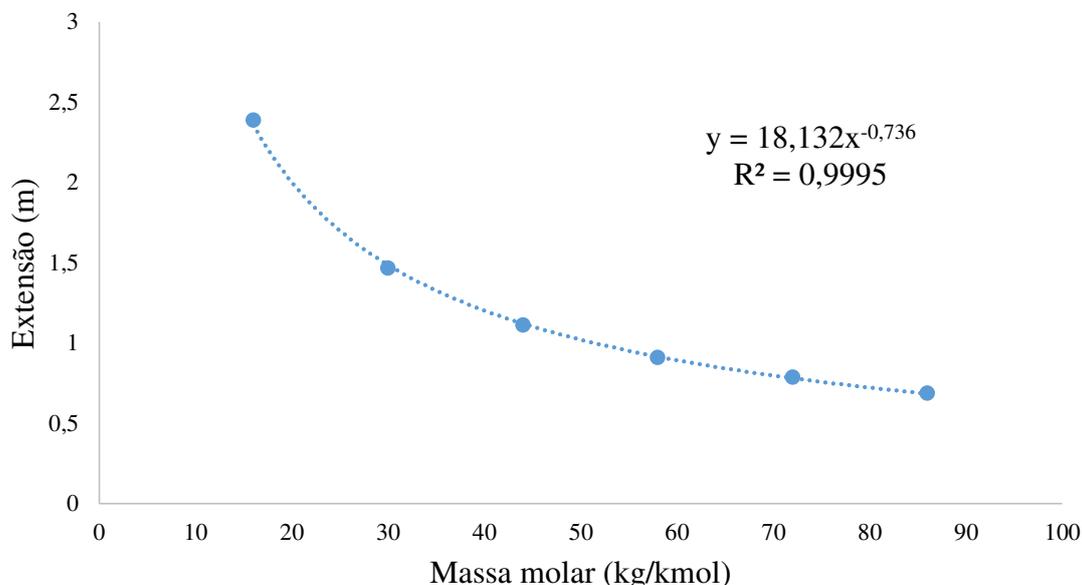
O estudo da influência da massa molar do material inflamável na extensão foi conduzido realizando simulações para um conjunto de alcanos descritos na Tabela 6.4, variando a massa molecular e mantendo constantes as demais propriedades. As condições de simulação foram de diâmetro de 1 mm e pressão de 15 bar.

Tabela 6.4 – Alcanos utilizados na análise da influência da massa molecular do material inflamável na extensão da atmosfera explosiva.

| Nome do alcano | Fórmula molecular | Massa Molecular (kg/kmol) |
|----------------|--------------------------------|---------------------------|
| Metano | CH ₄ | 16 |
| Etano | C ₂ H ₆ | 30 |
| Propano | C ₃ H ₈ | 44 |
| Butano | C ₄ H ₁₀ | 58 |
| Pentano | C ₅ H ₁₂ | 72 |
| Hexano | C ₆ H ₁₄ | 86 |

O ajuste dos pontos dispostos na Figura 6.17 indica que a extensão se ajusta a uma função potência com expoente de aproximadamente -0,7.

Figura 6.17 – Extensão em função da massa molecular do componente para liberação de propano a 15 bar e 1 mm.



Baseado nos resultados obtidos anteriormente tem-se que a extensão varia com a raiz quadrada da taxa de liberação e inversamente com a fração molar e massa molecular elevada a 0,7, sendo assim tem-se que:

$$Extensão \propto K \frac{\sqrt{Taxa\ de\ Liberação}}{(Massa\ Molar)^{0,7} (Fração\ Molar)} \quad 6.2$$

A variável fração molar para estudos de classificação de áreas corresponde ao limite inferior de explosividade (LIE), porém devido às incertezas experimentais na

obtenção do LIE, um fator de segurança (k_s) que segundo a norma IEC 60079-10-1 (2015) está compreendido no intervalo entre: 0,5-1,0 foi inserindo, portanto a Equação 6.2 por ser escrita como:

$$Extensão \propto K \frac{\sqrt{Taxa\ de\ Liberação}}{(Massa\ Molar)^{0,7} (k_s \cdot LIE)} \tag{6.3}$$

De acordo como os resultados representados nas Figuras 6.18 e 6.19 a extensão obtida via CFD no LIE e em $\frac{1}{2}$ LIE, e o termo corresponde ao lado direito da Equação 6.3 com unidades no SI se ajusta a uma reta com coeficiente angular aproximado de 0,05.

Figura 6.18 – Extensões no LIE para liberação de propano.

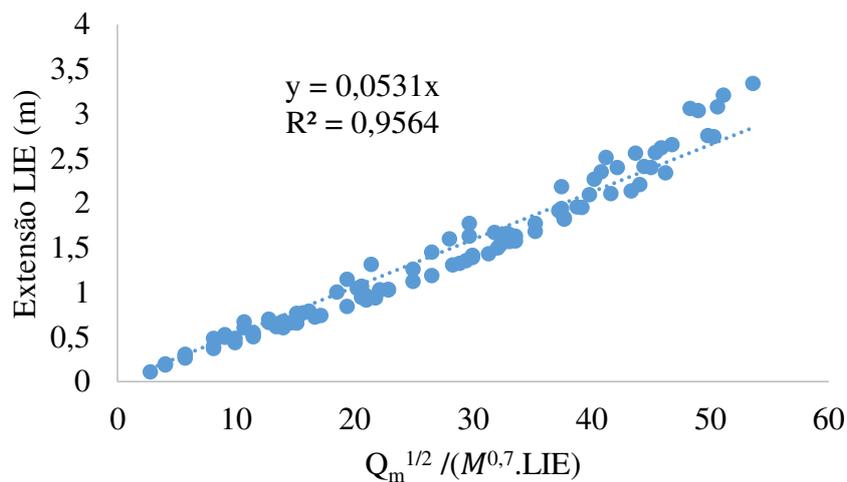
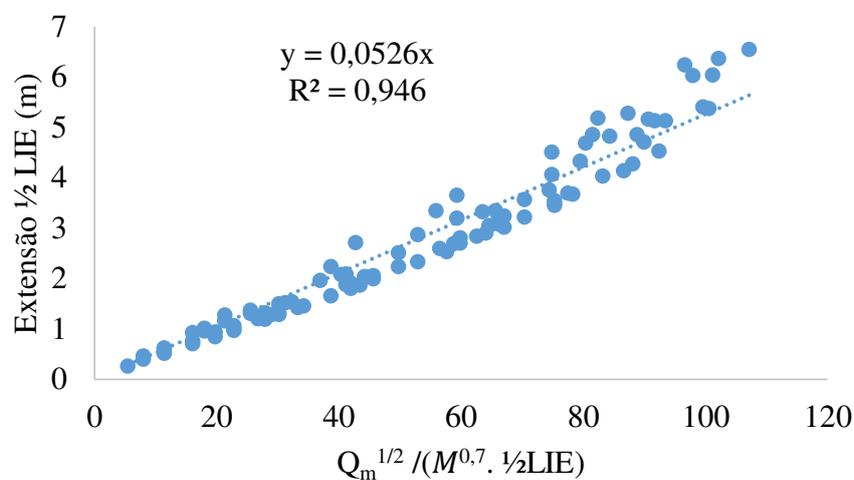


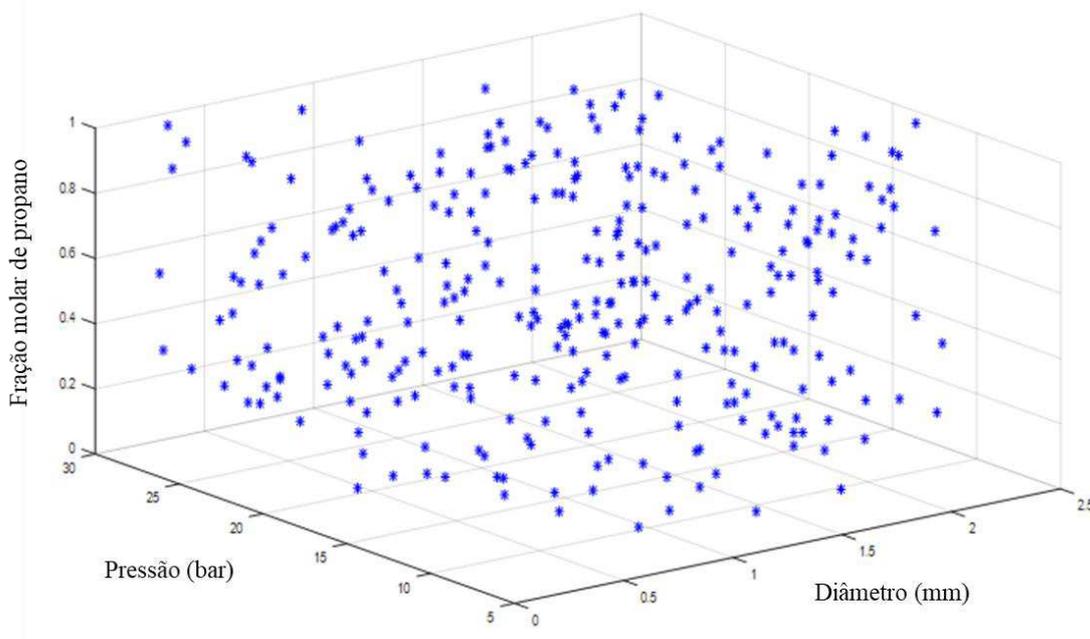
Figura 6.19 – Extensões em $\frac{1}{2}$ LIE para liberação de propano.



Para verificar se a relação encontrada para os 100 casos de propano continuaria válida para mistura realizou-se um conjunto de 300 simulações com GLP (propano +

butano), os pontos gerados pelo hipercubo latino utilizados para obtenção das entradas necessárias do modelo em CFD são mostrados na Figura 6.20, o mesmo range de diâmetro e pressão utilizados para obtenção dos casos para liberação de propano puro foram utilizados, como se trata de mistura a variável composição do propano foi adicionada.

Figura 6.20 – Pontos obtidos pelo hipercubo latino para os 300 casos de liberação de GLP.



A relação proposta pela equação para os casos simulados em CFD ajusta-se a uma reta com coeficiente angular de aproximadamente 0,05 como mostrados nas Figuras 6.21 e 6.22, o mesmo obtido para os casos simulados com propano.

Figura 6.21 – Extensões no LIE para liberação de GLP.

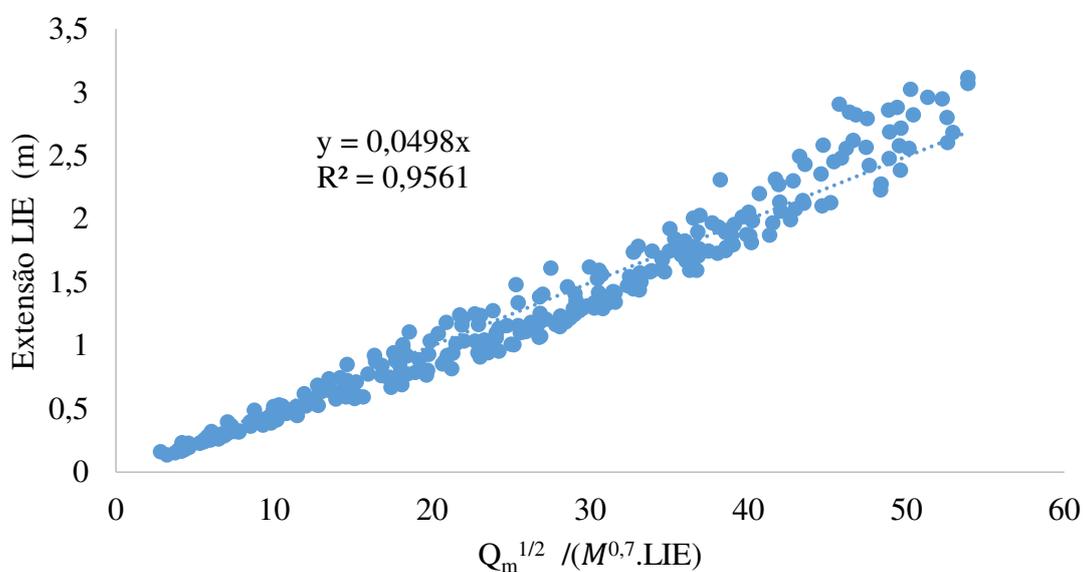
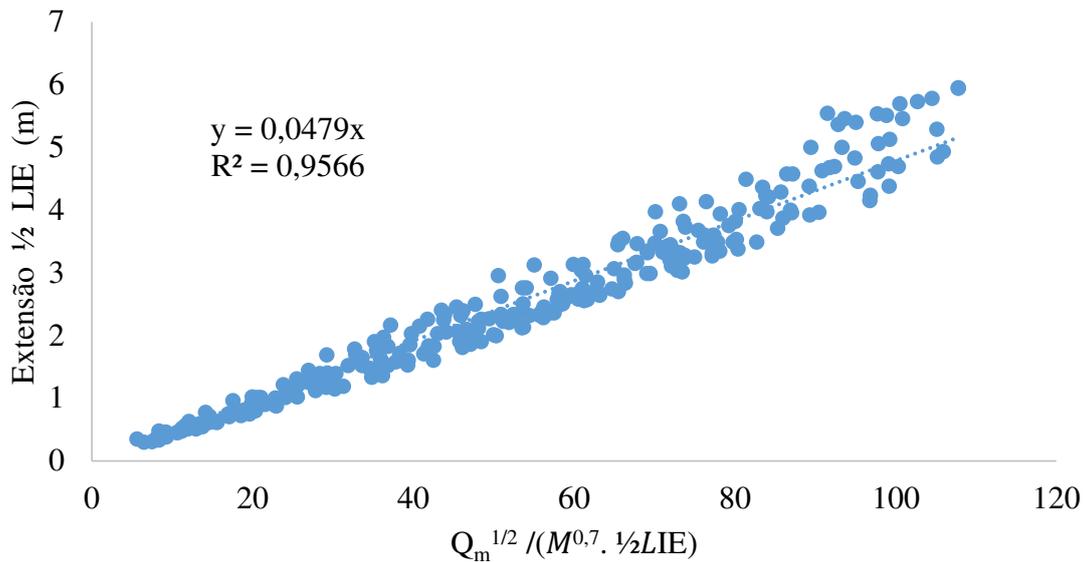


Figura 6.22 – Extensões em 1/2 LIE para liberação de GLP.



Assim, pode-se substituir a constante K pelo coeficiente angular da reta 0,05 obtido anteriormente, resultando na Equação 6.4.

$$Extensão = 0,05 \frac{\sqrt{Q_m}}{M^{0,7} \cdot k_s \cdot LIE} \quad 6.4$$

Inserindo a Equação 4.30 utilizada para a taxa de liberação (Q_m) na expressão da extensão obtida, tem-se que:

$$Extensão = 0,05 \cdot \frac{\sqrt{C_D \cdot A \cdot \sqrt{2 \cdot \rho_m \cdot \Delta P}}}{M^{0,7} \cdot k_s \cdot LIE} \quad 6.5$$

Realizando algumas manipulações algébricas considerando a área do orifício circular, e sendo $C_D = 0,65$ e $\Delta P = 0,45P_{res}$ (McMILLAN, 1998) obtêm-se:

$$Extensão = 0,03 \cdot \frac{d_o \cdot (\rho_m \cdot P_{res})^{1/4}}{M^{0,7} \cdot k_s \cdot LIE} \quad 6.6$$

Inserindo um fator (k_d) obtido pelo maior desvio padrão para os casos simulados de propano (Figuras 6.20 e 6.21) e GLP (Figuras 6.23 e 6.24), assim o valor de k_d utilizado foi de 1,4 a qual corresponde ao desvio padrão da Figura 6.24, logo a Equação 6.6 pode ser escrita como:

$$\text{Extensão} = 0,03 \cdot \frac{k_d \cdot d_o \cdot (\rho_m \cdot P_{res})^{1/4}}{M^{0,7} \cdot k_s \cdot \text{LIE}} \quad 6.7$$

onde:

d_o – Diâmetro do orifício de vazamento. (m)

ρ_m – Densidade de mistura obtida pela Equação (4.32). (Kg/m³)

P_{res} – Pressão no reservatório. (Pa)

M – Massa molar. (kg/mol)

k_d – Coeficiente de segurança devido a dispersão dos dados. (1,4)

k_s – Coeficiente de segurança devido as incertezas do LIE. (0,5-1,0)

6.9 Comparação do Modelo em CFD com Normas Vigentes

O modelo em CFD definido no presente trabalho é utilizado para se estimar a extensão da área classificada para liberações bifásicas de GLP nas situações descritas pelas seguintes normas:

- i. NFPA 497;
- ii. API-505;
- iii. N-2918;
- iv. OISD-113.

6.9.1 Extensão da Área Classificada em Torno de uma Bomba

As pressões de operação e diâmetros de orifícios utilizados nos casos em estudo para bombas foram 8-24 bar (BLACKMER, 2010) e 1,1-2,5 mm (IEC 60079-10-1, 2015), respectivamente, a fração molar de propano da corrente também foi variada. Assim gerou-se um total de 30 casos dentro desses intervalos utilizando o hipercubo latino conforme mostrados na Tabela 6.5.

Na primeira coluna da Tabela 6.5 contém os diâmetros de liberação típico do equipamento em estudo, na segunda coluna a pressão de operação e na última coluna a composição de propano.

Tabela 6.5 – Casos simulados para liberação em torno de uma bomba.

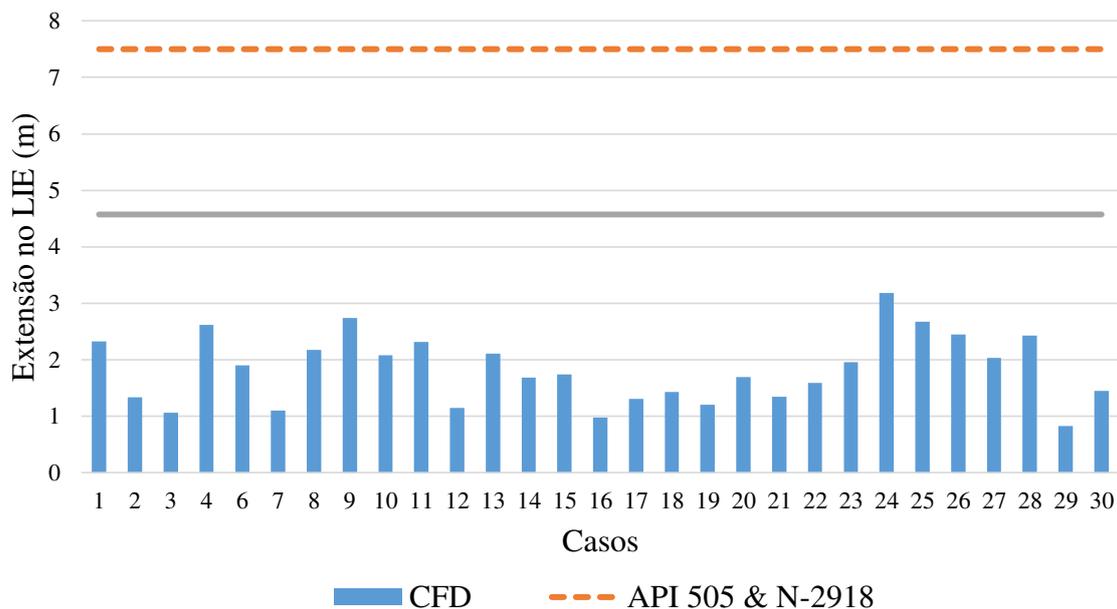
| Casos | d_o(mm) | P (bar) | X_{propano} |
|--------------|--------------------------|----------------|----------------------------|
| 1 | 2,1855 | 9,4818 | 0,3468 |
| 2 | 1,5548 | 16,9579 | 0,2138 |
| 3 | 1,1539 | 18,8671 | 0,7344 |
| 4 | 2,3349 | 12,9466 | 0,1473 |
| 5 | 1,4775 | 15,0217 | 0,9967 |
| 6 | 2,0170 | 10,6566 | 0,0278 |
| 7 | 1,2430 | 13,7589 | 0,0633 |
| 8 | 2,1300 | 22,1498 | 0,8618 |
| 9 | 2,2859 | 16,3315 | 0,8776 |
| 10 | 2,1219 | 21,6851 | 0,5120 |
| 11 | 2,0629 | 18,0993 | 0,7876 |
| 12 | 1,4605 | 23,0606 | 0,4612 |
| 13 | 1,9276 | 9,9186 | 0,5537 |
| 14 | 1,7428 | 12,4404 | 0,1733 |
| 15 | 1,7999 | 14,1061 | 0,3867 |
| 16 | 1,3850 | 19,7059 | 0,0748 |
| 17 | 1,9655 | 22,7693 | 0,1235 |
| 18 | 1,3063 | 8,5518 | 0,3120 |
| 19 | 1,1319 | 11,2365 | 0,5705 |
| 20 | 1,6603 | 14,7317 | 0,9263 |
| 21 | 1,5674 | 21,0039 | 0,6507 |
| 22 | 1,6150 | 15,7000 | 0,6962 |
| 23 | 1,8622 | 20,3570 | 0,7289 |
| 24 | 2,4194 | 11,7559 | 0,8312 |
| 25 | 2,4844 | 18,6264 | 0,6307 |
| 26 | 2,2423 | 17,1264 | 0,4791 |
| 27 | 1,8339 | 8,2334 | 0,2863 |
| 28 | 2,3731 | 20,1630 | 0,9454 |
| 29 | 1,2037 | 23,8819 | 0,2381 |
| 30 | 1,3762 | 10,8236 | 0,4079 |

Os resultados obtidos dos casos em estudo para as extensões da área classificada no LIE e em suas frações (50 e 25%) são apresentados nas Figuras 6.25-6.27. Dos 30 casos da Tabela 6.5 apenas o caso 5 não resultou em uma liberação bifásica sendo sua fração vaporizada na saída de 100 %.

Os resultados das extensões obtidos via CFD para os casos em estudo avaliadas no LIE para uma bomba são inferiores aos valores disponíveis nas respectivas figuras da API 505, N-2918 e NFPA 497 para este equipamento como observado na Figura 6.23.

Baseado nos resultados obtidos das extensões para este tipo de equipamento as normas atenderiam com segurança os requisitos de proteção, porém o sobredimensionamento acarretaria em custo adicionais com equipamentos especiais para áreas classificadas.

Figura 6.23 – Casos simulados em CFD para liberação em torno de uma bomba limitado ao LIE.

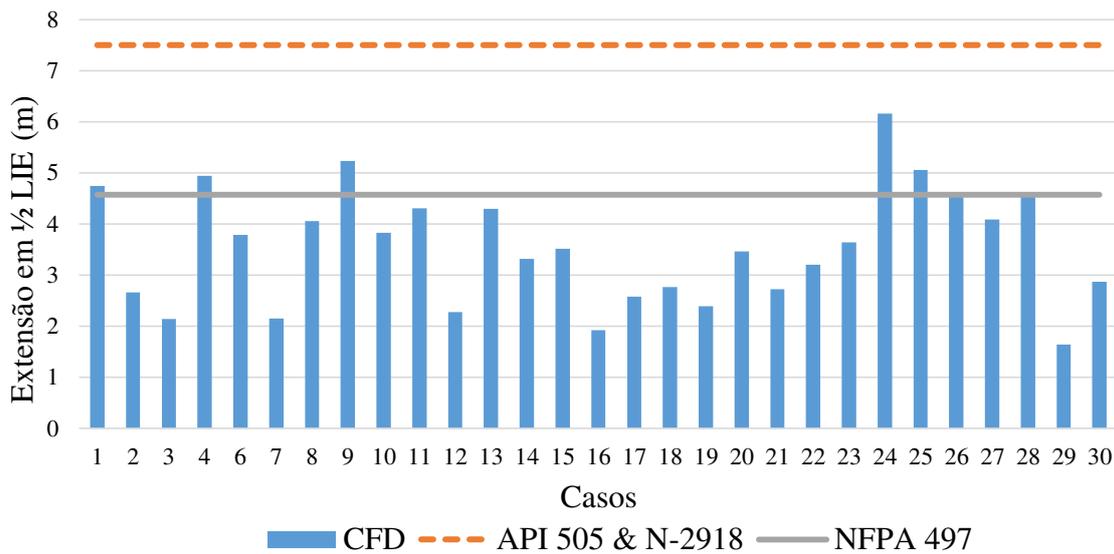


Aplicando um fator de segurança de 50 % ao LIE para os casos em estudo, conforme observado na Figura 6.24 que 7 casos (aproximadamente 24 % dos casos simulados) ultrapassam a extensão apresentada na NFPA 497 para bomba, mas ainda assim apresenta valores inferiores as distâncias apresentadas na API 505 e N-2918.

Como descrito na norma NFPA 497 as distâncias de riscos são para concentrações avaliadas no LIE o que foi comprovado via CFD que para um fator de segurança de 50 % do LIE a extensão da área classificada é ultrapassada para um relevante número de casos.

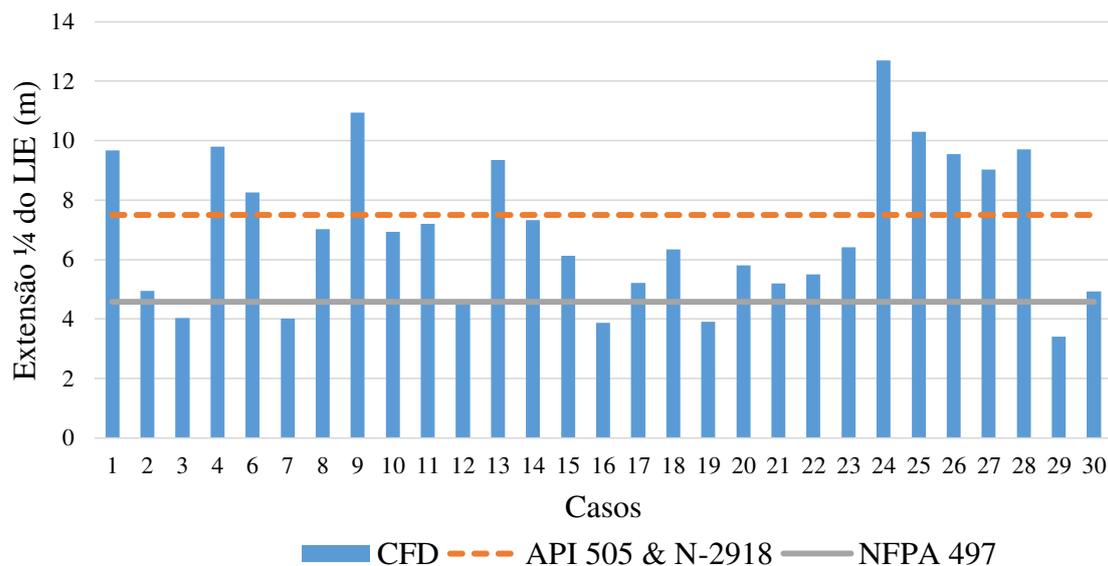
A norma API 505 assim como a N-2918 atende aos requisitos de segurança para valores avaliados em 50% do LIE garantindo os requisitos de segurança, porém é valido ressaltar o sobredimensionamento de ambas as normas para a extensão da área classificada avaliada nessa concentração.

Figura 6.24 – Casos simulados em CFD para liberação em torno de uma bomba limitado a 1/2 LIE.



A Figura 6.25 ilustra as distâncias avaliadas em 1/4 do LIE, 76 % dos casos estão fora do raio de segurança especificado pela NFPA 497, para as normas API 505 e N-2918 tem-se que aproximadamente 34 % das distâncias obtidas estão fora do valor especificado para a área classificada.

Figura 6.25 – Casos simulados em CFD para liberação em torno de uma bomba limitado a 1/4 do LIE.

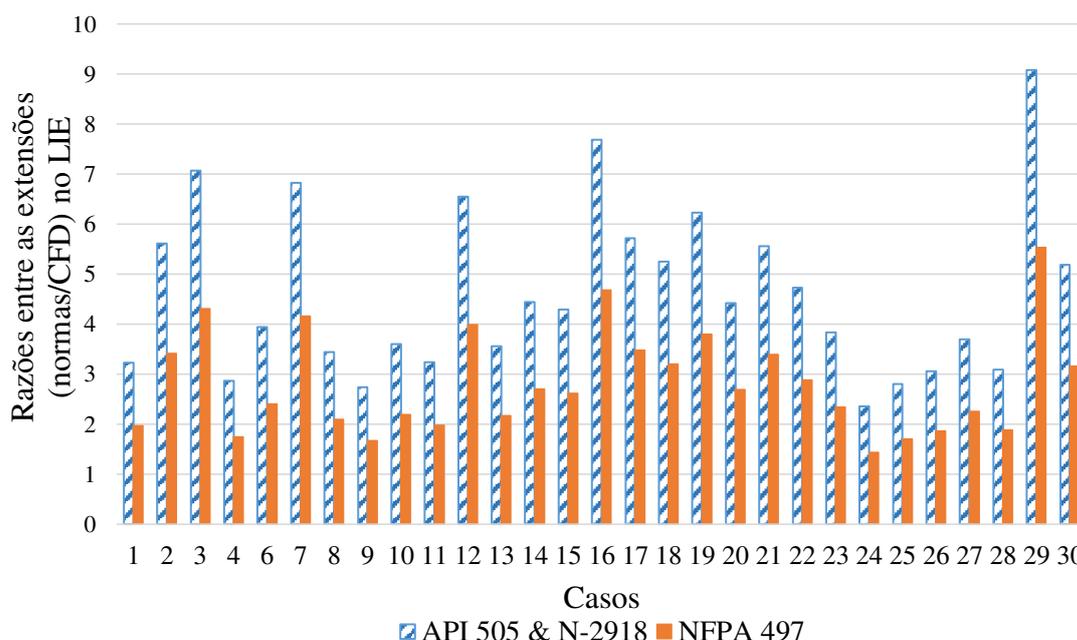


Para uma melhor comparação entre a extensão fornecida pelas normas e a obtida via CFD os resultados obtidos anteriormente são expressos como a razão entre a extensão da norma e a extensão obtida pelo modelo.

As razões entre as extensões das normas em estudo e o modelo em CFD no LIE para os diversos casos simulados são ilustradas na Figura 6.26. Os resultados obtidos em CFD quando comparados com as normas API 505 e N-2918 mostram que para os casos em estudo o valor da extensão da área classificada da norma é em média 4,6 vezes maior que os resultados obtidos via CFD, alcançando um valor máximo de 9 vezes o valor obtido via CFD.

Para a norma NFPA 497 as discrepâncias foram menores quando comparadas com a API 505, apresentando valores em média 2,8 vezes maiores, o valor máximo obtido foi de 5,5 vezes maior que os resultados obtidos via CFD.

Figura 6.26 – Razões entre as extensões (normas/CFD) avaliadas no LIE para liberação em torno de uma bomba.

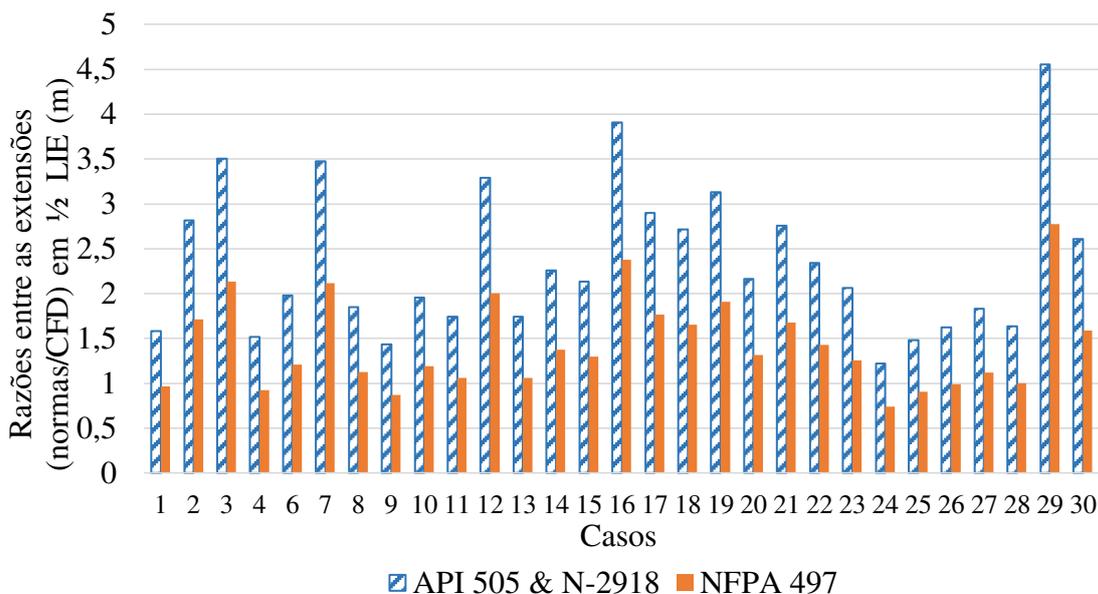


Em 50% do LIE a diferença entre as extensões obtidas para ambas as normas diminui como ilustrado na Figura 6.27. A extensão apresentada nas normas API 505 e N-2918 foi em média 2,35 vezes maior quando comparada com os resultados de CFD, atingindo um valor máximo de 4,5 vezes a extensão do modelo.

Analisando a norma NFPA 497 pela Figura 6.27 para liberação em torno de uma bomba o valor médio das razões é de 1,43 com valor máximo de 2,77 obtido no caso 29.

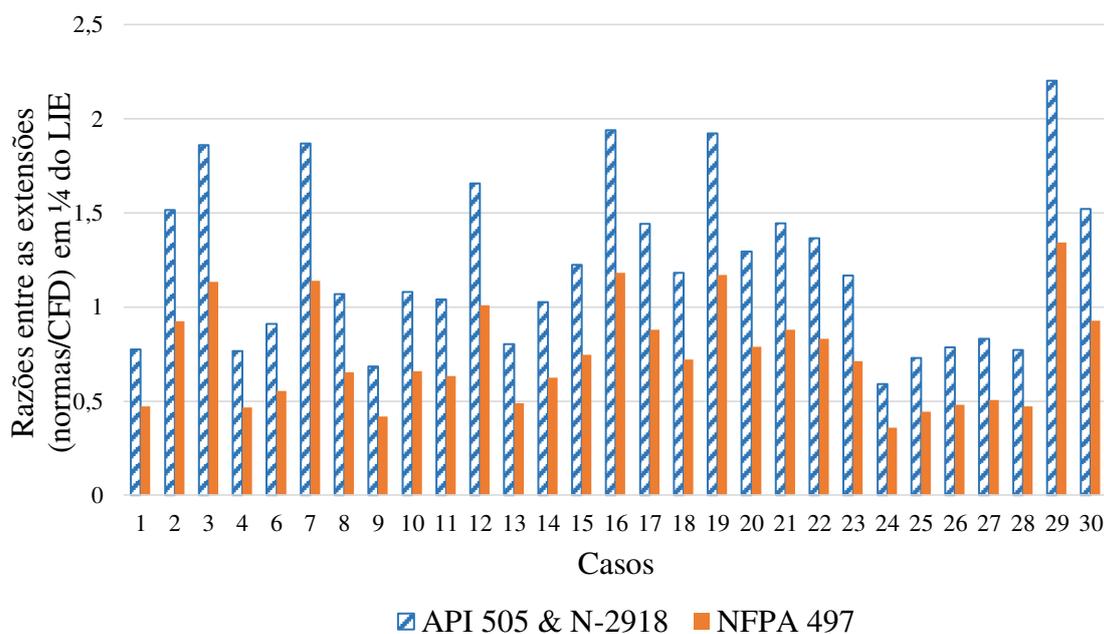
Como mostrada na Figura 6.27 para os casos: 1, 4, 9, 24, 25, 26 e 28 as razões possuem valores inferiores a unidade, sendo assim a extensão do modelo ultrapassa a extensão especificada na norma.

Figura 6.27 – Razões entre as extensões (normas/CFD) avaliadas em 1/2 LIE para liberação em torno de uma bomba.



Analisando os resultados da Figura 6.28 para a norma Petrobras e API 505 tem-se que aproximadamente 34 % dos casos apresentaram razões menores que a unidade, para a NFPA 497 as razões menores que a unidade corresponde a 79 % dos casos simulados.

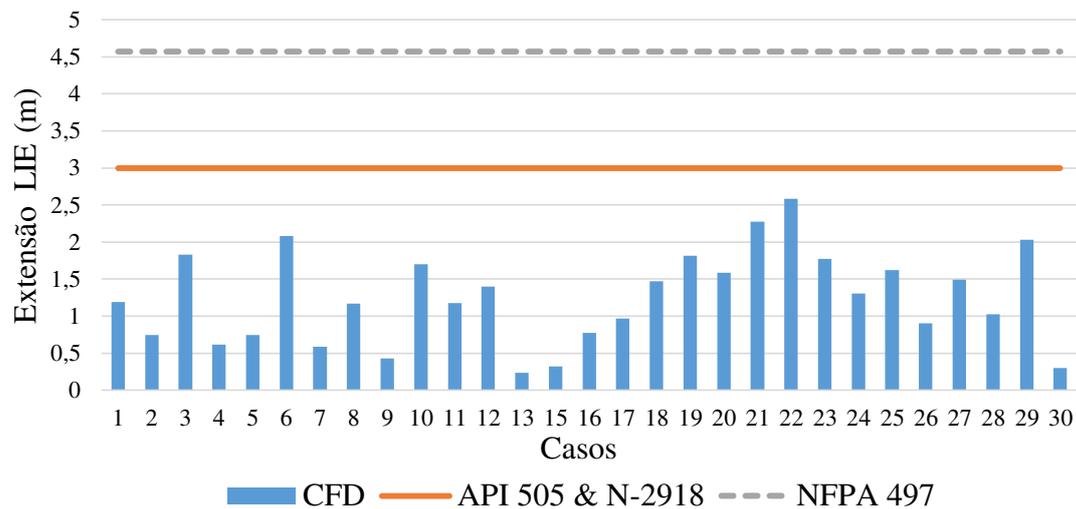
Figura 6.28 – Razões entre as extensões (normas/CFD) avaliada em 1/4 do LIE para liberação em torno de uma bomba.



6.9.2 Extensão da Área Classificada em Torno de um Flange

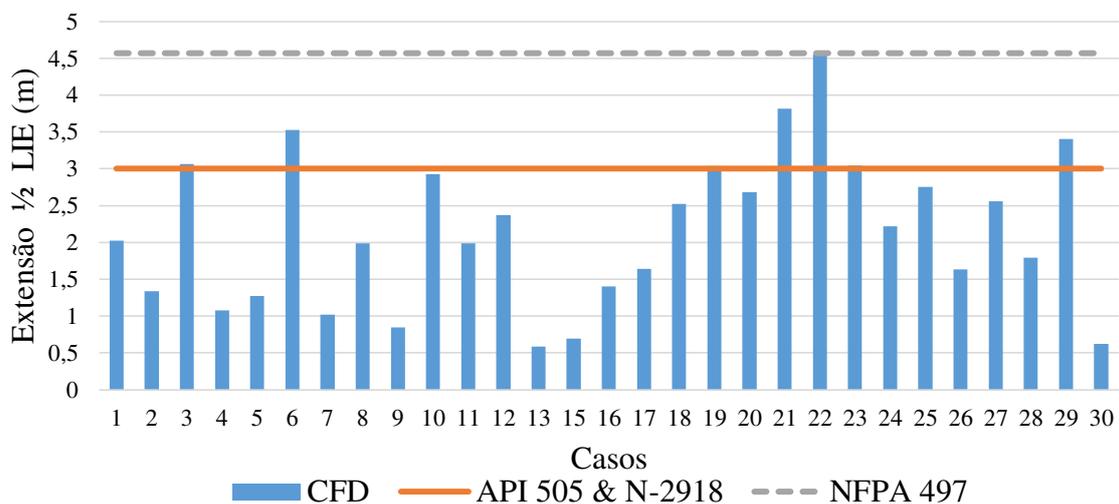
Assim como na análise da estimativa da área classificada em torno de uma bomba as extensões das áreas classificadas em torno de um flange avaliadas no LIE apresentaram valores menores quando comparados com as normas americanas e da Petrobras como pode ser observado na Figura 6.29, o sobredimensionamento das normas é evidente para extensões avaliadas no LIE.

Figura 6.29 – Casos simulados em CFD para liberação em torno de um flange limitada ao LIE.



Os resultados das extensões em 50 % do LIE para a liberação em torno de um flange (Figura 6.30) mostraram que 24 % dos casos simulados ultrapassaram a extensão de 3 metros sugerida pela API 505 e N-2918, sendo que todos os casos ficaram dentro do limite estabelecido pela NFPA 497 que é 4,57 m.

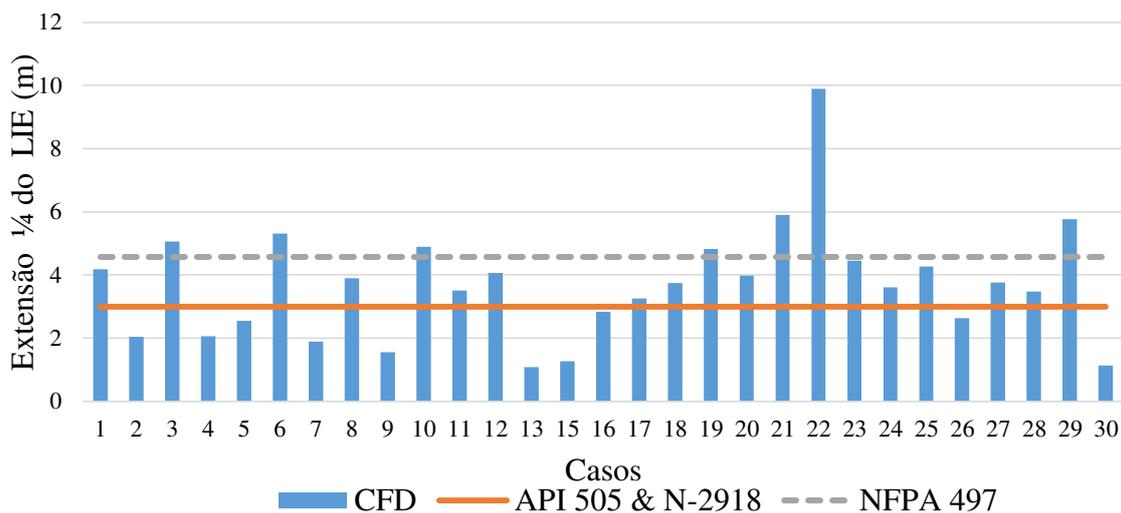
Figura 6.30 – Casos simulados em CFD para liberação em torno de um flange limitado a ½ LIE.



A Figura 6.31 ilustra as distâncias avaliadas em ¼ do LIE, aproximadamente 24% dos casos estão fora do raio de segurança especificado pela NFPA 497, para as normas API 505 e N-2918 tem-se que aproximadamente 65,5 % das distâncias obtidas estão fora do valor especificado para a área classificada.

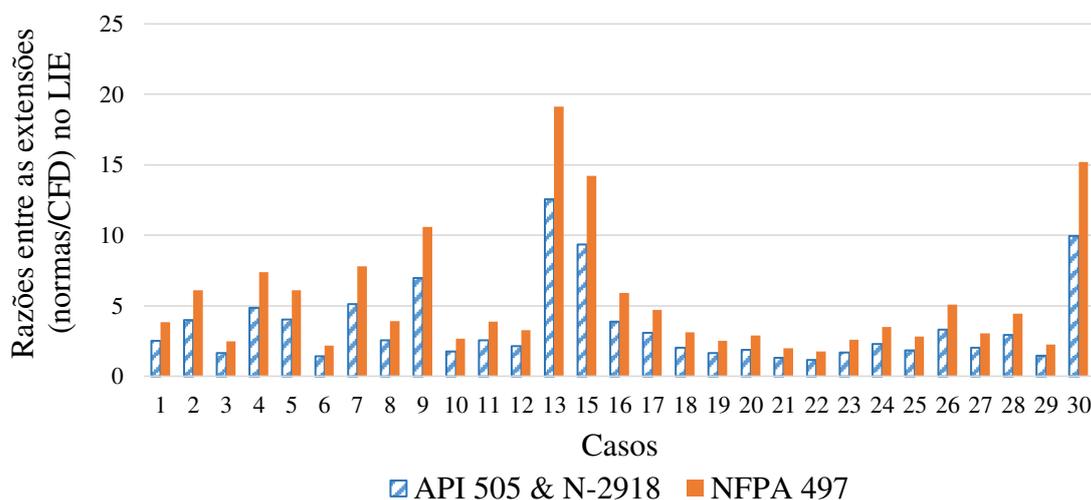
Em 25% do LIE onde é afirmado pela norma da Petrobras falha na grande maioria dos casos não confirmando a relação distância e concentração (¼ LIE) descrita pela mesma.

Figura 6.31 – Casos simulados em CFD para liberação em torno de um flange limitado a ¼ do LIE.



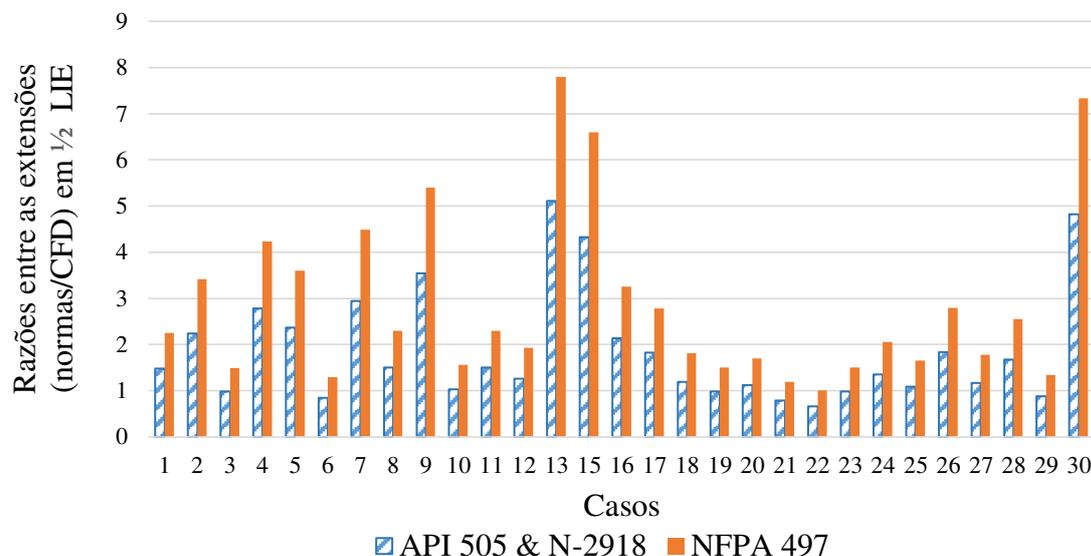
De acordo com a Figura 6.32 para extensões avaliadas no LIE para as normas API 505 e N-2918 apresentam-se em média 3,5 vezes maiores que as obtidas via CFD, enquanto que para a NFPA 497 esse valor é de 5 vezes.

Figura 6.32 – Razões entre as extensões (normas/CFD) para liberação em torno de um flange no LIE.



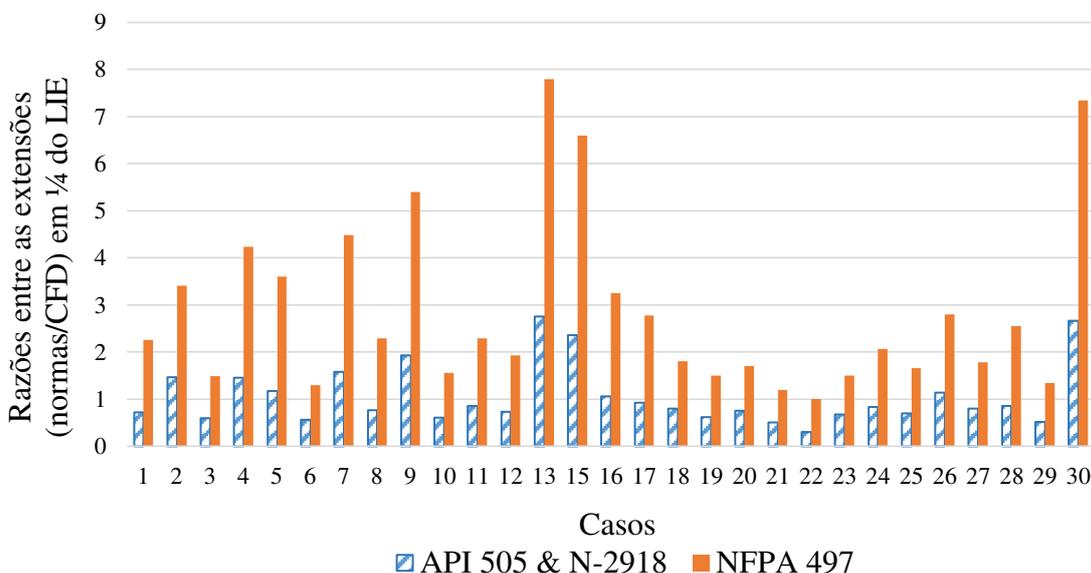
De acordo com os resultados mostrados na Figura 6.33 avaliados em 1/2 LIE a extensão da norma NFPA 497 é em média 3 vezes maior que a dos casos simulados e para as normas API 505 e N-2918 o valor médio foi de aproximadamente 2.

Figura 6.33 – Razões entre as extensões (normas/CFD) para liberação em torno de um flange em 1/2 LIE.



Para as normas N-2918/API 505 e NFPA 497 em 1/4 do LIE, as razões médias obtidas foram de aproximadamente 1 e 1,6, respectivamente, no entanto um elevado número de casos apresentou razões menores que a unidade, como mostrado na Figura 6.34.

Figura 6.34 – Razões entre as extensões (normas/CFD) para a liberação em torno de um flange em 1/4 do LIE.



6.9.3 Área Classificada em Torno de um Vaso de Pressão Esférico

Para se avaliar o dimensionamento da área classificada em torno de um vaso de pressão utilizado para armazenamentos de gases liquefeitos foram utilizados intervalos de 8-24 bar e 0,56-1,78 mm, a composição da mistura também foi variada como mostrada na Tabela 6.6.

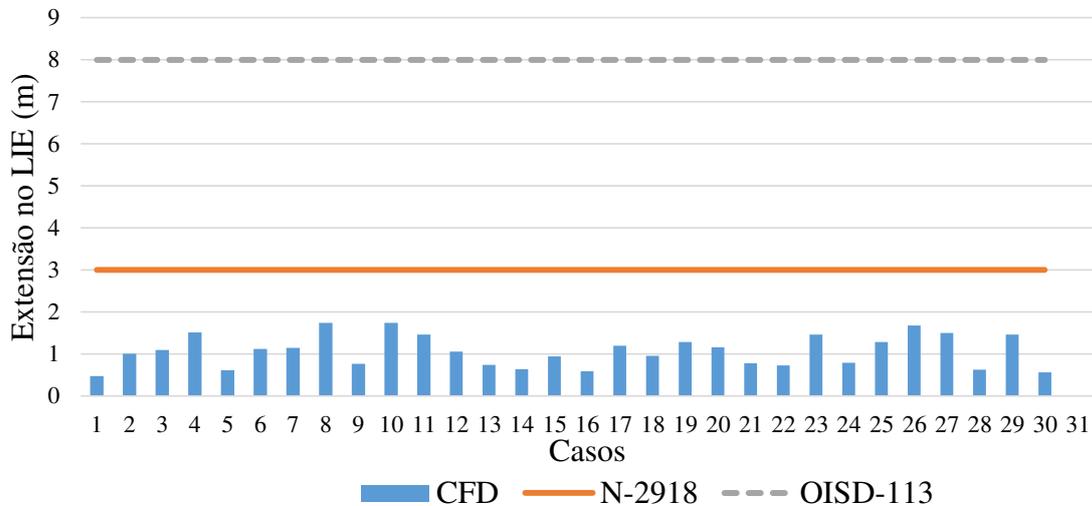
Tabela 6.6 – Casos simulados para liberação em torno de um vaso de pressão esférico.

| Casos | d_o (mm) | P (bar) | X_{prop} |
|-------|------------|---------|------------|
| 1 | 0,5634 | 23,1213 | 0,8152 |
| 2 | 1,2920 | 22,5712 | 0,4118 |
| 3 | 1,6799 | 21,5276 | 0,0819 |
| 4 | 1,5187 | 11,7626 | 0,2426 |
| 5 | 0,7446 | 17,4886 | 0,1159 |
| 6 | 1,0167 | 8,1550 | 0,2669 |
| 7 | 1,1976 | 15,3407 | 0,4594 |
| 8 | 1,7074 | 12,7363 | 0,5631 |
| 9 | 0,7035 | 10,8761 | 0,4963 |
| 10 | 1,6565 | 11,4933 | 0,9312 |
| 11 | 1,4882 | 14,6887 | 0,5198 |
| 12 | 1,0593 | 9,7803 | 0,9517 |
| 13 | 0,7847 | 17,7225 | 0,6211 |
| 14 | 1,1638 | 15,8132 | 0,9745 |
| 15 | 1,2375 | 19,9136 | 0,1791 |
| 16 | 0,6573 | 20,5780 | 0,7409 |
| 17 | 1,4062 | 18,7510 | 0,3022 |
| 18 | 0,8146 | 8,6224 | 0,6676 |
| 19 | 1,1195 | 9,4632 | 0,7936 |
| 20 | 1,2954 | 13,0062 | 0,0620 |
| 21 | 0,8744 | 16,2228 | 0,2101 |
| 22 | 0,9355 | 19,4449 | 0,1635 |
| 23 | 1,4470 | 13,936 | 0,6492 |
| 24 | 0,9143 | 22,2588 | 0,8823 |
| 25 | 1,6136 | 21,1637 | 0,3380 |
| 26 | 1,7566 | 23,9364 | 0,8505 |
| 27 | 1,5489 | 16,5654 | 0,7202 |
| 28 | 0,9851 | 13,5224 | 0,0110 |
| 29 | 1,3560 | 10,4110 | 0,5753 |
| 30 | 0,6151 | 18,3257 | 0,3827 |

As normas Petrobras (N-2918) e indiana (OISD-113) atendem aos requisitos como representado na Figura 6.35 sendo todas as extensões obtidas via CFD compreendidas

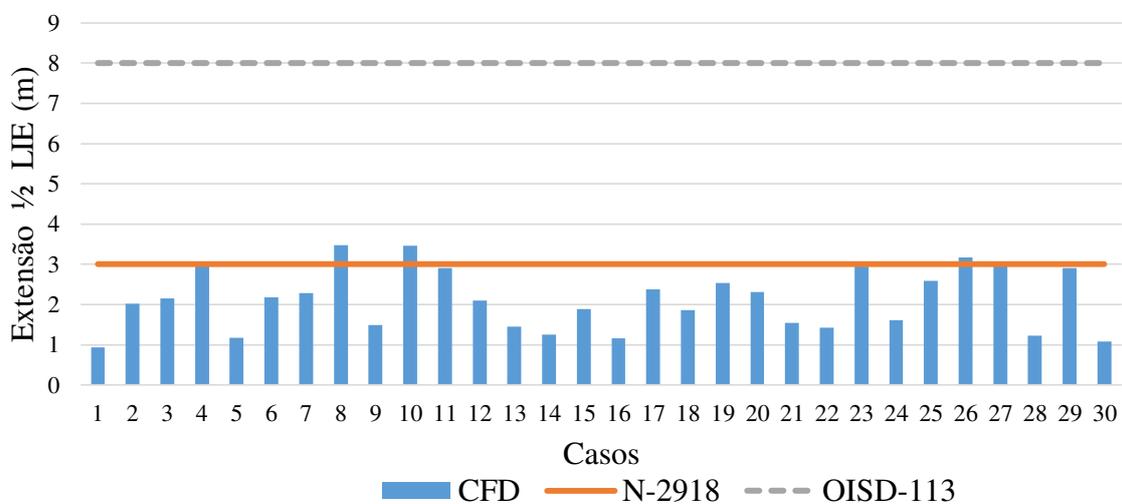
dentro da extensão apresentada nas normas, porém como obtido nos estudos anteriores para bombas e flanges fica evidenciado o sobredimensionamento das normas.

Figura 6.35 – Casos simulados em CFD para liberação em torno de um vaso de pressão no LIE.



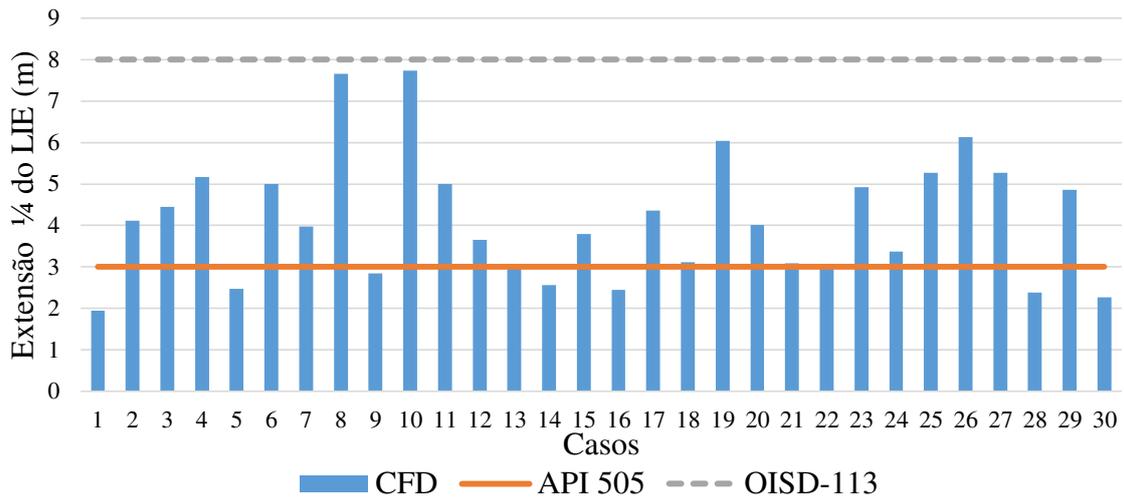
Em 1/2 LIE como representado na Figura 6.36 algumas extensões obtidas via simulação extrapolam a distância imposta pela norma Petrobras, para a norma OISD-113 todas as distâncias contidas no valor determinado na norma. Mesmo em um valor avaliado em 50 % do LIE fica evidente a discrepância entre o valor obtido via simulação e a norma indiana.

Figura 6.36 – Casos simulados em CFD para liberação em torno de um vaso de pressão em 1/2 LIE.



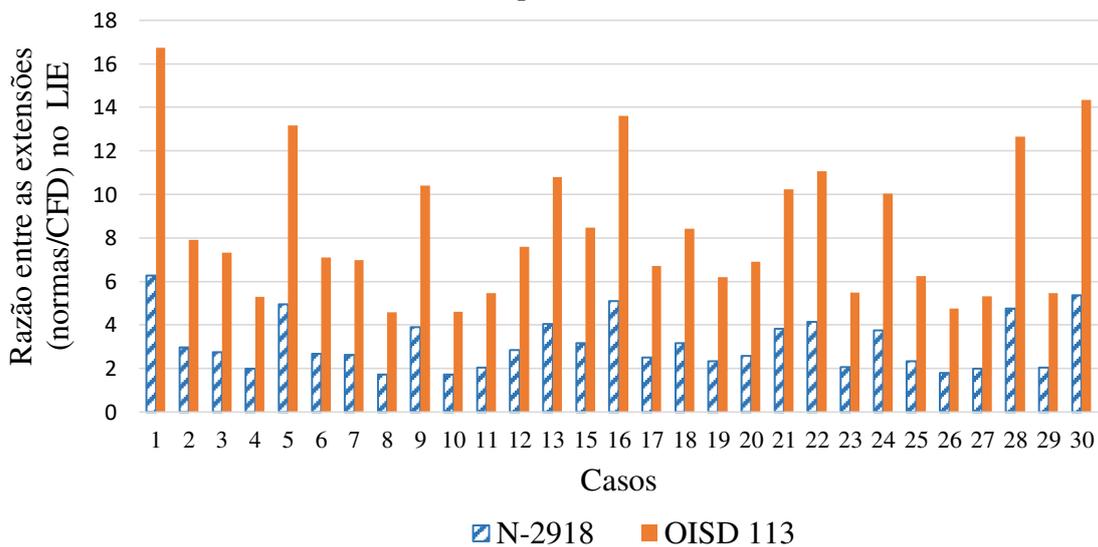
A análise em 1/4 do LIE mostra que a distância especificada pela norma Petrobras é excedida na maioria dos casos como mostrado na Figura 6.37. Porém para a norma indiana as extensões obtidas via simulação numérica são inferiores.

Figura 6.37 – Casos simulados em CFD para liberação em torno de um vaso de pressão em ¼ do LIE.



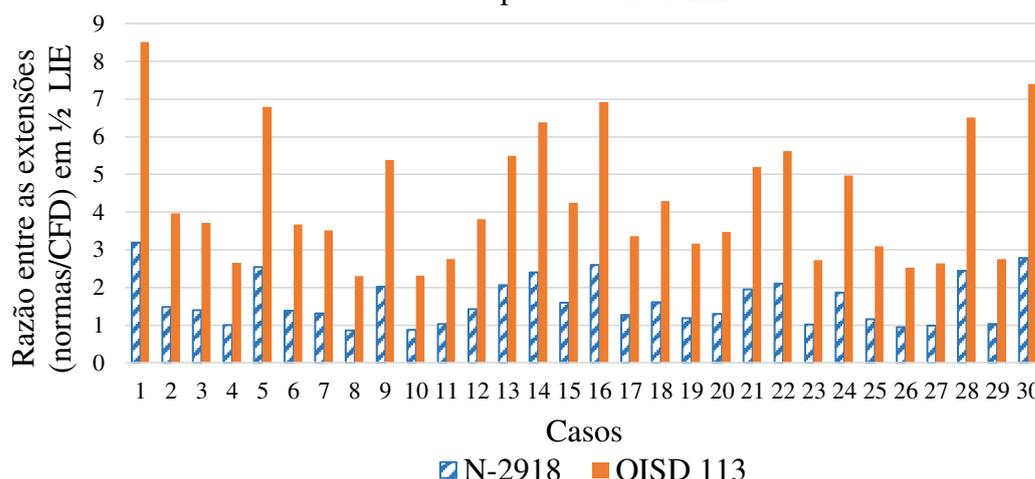
Na análise das normas Petrobras (N-2918) e OISD-113 ilustrado na Figura 6.38, são em média 3,0 e 8,5 vezes maiores que as distâncias obtidas via simulação, respectivamente.

Figura 6.38 – Razões entre as extensões (normas/CFD) para liberação em torno de um vaso de pressão no LIE.



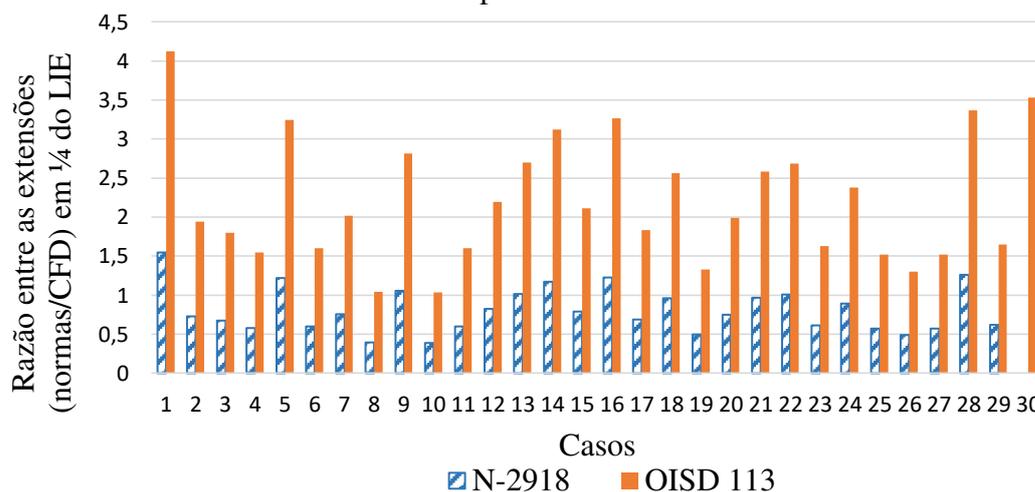
De acordo com os resultados mostrados pela Figura 6.39 houve uma redução nas discrepâncias das extensões avaliadas em ½ LIE entre os resultados obtidos via simulação numérica e a norma OISD 113 que ficou em média 4 vezes maior que a extensão simulada, para a norma N-2918 a razão média foi de 1,5.

Figura 6.39 – Razões entre as extensões (normas/CFD) para liberação em torno de um vaso de pressão em 1/2 LIE.



A partir dos resultados das razões obtidas em 1/4 do LIE (Figura 6.40) foi possível verificar que as extensões da norma OISD - 113 são em média duas vezes maiores que as distâncias obtidas via CFD. Para a norma Petrobras obteve-se o valor de 0,8 para a média das razões, como mostrado na Figura 6.40.

Figura 6.40 – Razões entre as extensões (normas/CFD) para liberação em torno de um vaso de pressão em 1/4 do LIE.



A Tabela 6.7 reúne os resultados obtidos das razões médias entre as extensões (normas/CFD) para os equipamentos analisados mostrados anteriormente, sendo possível verificar que para a maioria dos casos os valores das extensões mostrados pelas normas ultrapassam os valores obtidos via CFD.

Analisando os resultados apresentados na Tabela 6.7, tem-se que em média no LIE (1ª coluna) as extensões da área classificada ao redor dos equipamentos das normas analisadas são aproximadamente 5 vezes maiores que as extensões do modelo, para 1/2

LIE (2ª coluna) as extensões das normas são aproximadamente 2 vezes maiores que a do modelo e em ¼ do LIE (3ª coluna) na média as extensões da norma e do modelo são iguais pois a razão média foi de aproximadamente 1.

De acordo com a Tabela 6.7 os casos para o vaso de pressão na norma OISD-113 com extensão avaliada no LIE apresentou o valor máximo, onde a norma alcançou um valor de 8 vezes a extensão do CFD. Apenas para dois casos as extensões do modelo foram em média maiores que as das normas, estes casos ocorreram para bomba na NFPA 497 e vaso de pressão na N-2918 ambos os casos em ¼ do LIE.

Tabela 6.7 – Razões médias entre as extensões (normas/CFD) com seus respectivos desvios padrões.

| Equipamento | Normas | LIE | ½ LIE | ¼ do LIE |
|------------------------|------------------|-------------|--------------|-----------------|
| Bomba | API 505 e N-2918 | 4,6 ± 1,69 | 2,35 ± 0,83 | 1,22 ± 0,44 |
| | NFPA 497 | 2,82 ± 1,03 | 1,43 ± 0,5 | 0,75 ± 0,27 |
| Flange | API 505 e N-2918 | 3,52 ± 2,8 | 1,88 ± 1,22 | 1,06 ± 0,65 |
| | NFPA 497 | 5,36 ± 4,34 | 2,86 ± 1,85 | 1,62 ± 0,98 |
| Vaso de Pressão | N-2918 | 3,21 ± 1,25 | 1,63 ± 0,64 | 0,82 ± 0,30 |
| | OISD-113 | 8,55 ± 3,32 | 4,34 ± 1,71 | 2,2 ± 0,80 |
| Média | | 5 | 2 | 1 |

Nas diversas simulações realizadas no presente trabalho a fração volumétrica média no orifício foi de 8,6 % com valor máximo de aproximadamente 15 %.

Baseado nos resultados apresentados na Tabela 6.8 recomenda-se que as extensões para as figuras analisadas das normas sejam revisadas, dado que ficou comprovado sobredimensionamento da área classificada para grande maioria das situações analisadas, assim baseado em estudos de CFD como o realizado no presente trabalho uma extensão deve ser especificada para cada equipamento na qual sua concentração corresponda a um valor de ½ LIE, garantindo assim a segurança da área e simultaneamente reduzindo o impacto do alto custo da instalação de equipamentos Ex que se tem ao utilizar-se as normas vigentes abordadas no presente trabalho.

Capítulo 7

Conclusões

7.1 Conclusões

No presente trabalho, CFD se mostrou uma poderosa ferramenta que pode ser usada para o estudo de classificação de áreas de liberações bifásicas, um fenômeno complexo.

A abordagem Euleriana-Lagrangeana utilizada juntamente com modelos que represente a distribuição de tamanho de partículas, quebra de partículas e evaporação da fase líquida mostrou-se adequada na predição do comportamento das fases contínua e dispersa.

Os perfis de velocidades obtidos pelo modelo estão em concordância quando comparado com dados experimentais.

O parâmetro denominado fator de risco utilizado no presente estudo mostrou-se adequado e de grande ajuda para o estudo de áreas classificadas, pois considera duas variáveis importantes: a extensão e o volume da atmosfera explosiva.

Os resultados obtidos mostraram que o vento impacta diretamente na extensão e no volume da pluma liberada, afetando assim as dimensões da área classificada. Velocidade do vento baixa na direção oposta a liberação contribui para o aumento do fator de risco, afetando a classificação da área.

No geral, para os casos analisados das normas foi constatado um sobredimensionamento da área classificada, o que implica em custos adicionais devido ao alto preço dos equipamentos elétricos especiais utilizados, foi constatado que em média as distâncias apresentadas nas normas correspondem a uma concentração de $\frac{1}{4}$ do LIE.

O uso de modelos rigorosos disponíveis em simuladores comerciais de processos como o Aspen Plus® V.8.4 utilizado no presente trabalho viabiliza o estudo da dinâmica do fenômeno de liberação bifásica multicomponente em CFD, proporcionando a obtenção de resultados mais acurados.

As análises numéricas mostraram que o uso de inertes reduz de forma significativa a área classificada, mostrando ser uma excelente alternativa para redução nos riscos de acidentes ocasionados por liberação de gás liquefeito inflamável em plantas industriais.

A expressão desenvolvida proporciona a estimativa da extensão da atmosfera explosiva para liberações bifásicas de gases liquefeitos com maior precisão que as normas vigentes e sem o alto custo computacional requerido pelo modelo em CFD. A utilização dessa equação prática auxilia a classificação de áreas podendo ser adotada por normas em substituição as figuras predefinidas atualmente usadas, pois foi obtida com base em modelos rigorosos utilizando técnicas de CFD, validado com dados experimentais da literatura.

7.2 Sugestões para Estudos Futuros

- Desenvolver uma correlação que leve em consideração a intensidade e o sentido do vento para estimativa da área classificada.
- Comparar o desempenho de outros inertes (e.g. nitrogênio) para processos de inertização utilizando CFD.
- Aplicar o modelo em CFD desenvolvido no presente trabalho para liberação bifásica de gases liquefeitos tóxicos (e.g. amônia, cloro e dióxido de enxofre).
- Desenvolver um modelo tridimensional em CFD para liberações bifásicas de gases liquefeitos na presença de obstáculos.

Referências Bibliográficas

ANJOS, D. A. **Determinação da Extensão de Áreas Classificadas para Liberações Bifásicas**. Dissertação (Mestrado), Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2017.

AAMIR, M. A.; WATKINS, A. P. **Numerical Analysis of Depressurisation of Highly Pressurised Liquid Propane**, International Journal of Heat and Fluid Flow, 21, p. 420–431, 2000.

ANANDHARAMAKRISHNAN, C.; ISHWARYA, S. P. **Spray Drying Techniques for Food Ingredient Encapsulation**. Wiley, p. 232, 2015.

ALLEN, J. T. **Laser Based Measurements in Two-phase Flashing Propane Jets. Part One: velocity profiles**. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, v.11, p. 291–297, 1998a.

ALLEN, J. T. **Conventional Temperature Measurements in Small Scale Two-phase Flashing Propane Jet Releases**, HSL report IR/L/FR95/5, 1995.

ALLEN, J.T. **Laser Based Measurements in Two-phase Flashing Propane Jets. Part Two: Droplet Size Distribution**, Journal of Loss Prevention in the Process Industries, v. 11, p. 299–306, 1998b.

API RP 505. **Recommended Practice for Classification of Locations for Electrical Installations at Petroleum Facilities Classified as Class I, Zone 0, Zone 1, and Zone 2**, API STANDARD 505, American Petroleum Institute, Washington D.C., 1997.

ANSYS Inc. **ANSYS CFX-Solver Theory Guide, Release 16.1**, Canonsburg, United States, 2015.

Ansyes CFX 16.1, ANSYS, Canonsburg, 2015.

ARAI, M.; TABATA, M.; HIROYASU, H., SHIMIZU, M. **Disintegrating Process and Spray Characterization of Fuel Jet Injected by a Diesel Nozzle**. SAE International, SAE paper 840275, 1984.

ASPEN TECHNOLOGY, Inc., Aspen Physical Property System. V 8.4. **Physical Property Methods**, 2013.

AZEVEDO, E. G.; ALVES, A. M. **Engenharia de Processos de Separação**. Lisboa: IST Press, 2009.

BARTZIS, J. G. **ADREA-HF: A Three-Dimensional Finite Volume Code for Vapour Cloud Dispersion in Complex Terrain**, EUR 13580 EN, 1991.

BENYAHIA S.; GALVIN J. E. **Estimation of Numerical Errors Related to Some Basic Assumptions in Discrete Particle Methods**. Ind. Eng. Chem. Res., V.49, p. 10588–10605, 2010.

BJÖRNHAM, O. **Source Model of an Adiabatic Jet**. Technical Report, Report no.: FOI-R--4247—SE, Swedish Defence Research Agency, 2016.

BLACKMER INC. **Blackmer Liquefied Gas Pumps**. INSTRUCTIONS NO. 501-C00, 2010.

BOSCH, C. J. H.V. D.; WETERINGS, R. A. P. M. **Methods for the Calculation of Physical Effects: due to Releases of Hazardous Materials (liquids and gases) ‘Yellow Book’**. 3^a ed., 2005.

BOSSERT, J. A. **Hazardous Locations - A Guide for the Design, Construction and Installation of Equipment in Explosive Atmospheres**. 3^aed. Toronto: Canadian Standards Association, 2001. 157p.

BOSTON, J. F.; BRITT, H. I. **A Radically Different Formulation and Solution of the Single Stage Flash Problem**, Computers and Chemical Engineering, v.2, p. 109-122, 1978.

BRICARD, P.; FRIEDEL, L. **Two-Phase Jet Dispersion**. Journal of Hazardous Materials, v. 59, pages 287-310, 1998.

BRITTER, R.; WEIL, J.; LEUNG, J., HANNA, S. **Toxic Industrial Chemical (TIC) Source Emissions Modeling for Pressurized Liquefied Gases**. Atmospheric Environment , v. 45, p. 1–25, 2011.

BULGARELLI, R. **Novos Requisitos para Classificação de Áreas Contendo Gases Inflamáveis – Parte 1**. Revista o Setor Elétrico, 120^a Ed., p. 90, 2016.

BULGARELLI, R. **Requisitos para Automação de Projetos e para Estudos de Classificação de Áreas – Parte 2**. Revista o Setor Elétrico, 42^a Ed., p. 39, 2009.

BS EN ISO 10156. **Gases and gas mixtures - Determination of Fire Potential and Oxidizing Ability for the Selection of Cylinder Valve Outlets**, p.7, 2010.

CALAY, R. K. ; HOLDO, A. E. **Modelling the Dispersion of Flashing Jets Using CFD**, Journal of Hazardous Materials, v. 154, p.1198-1209, 2008.

CARSON, P.; MUMFORD, C. **Hazardous Chemicals Handbook**, 1st edition, Elsevier, Woburn, p.194, 2002.

CEI 31-35. **Electrical Apparatus for Explosive Atmospheres – Guide for Classification of Hazardous Areas**. Comitato Elettrotecnico Italiano, Milan, 2007.

CHEREMISINOFF, N. P.; DAVLETSHINA, T. A. **Fire and Explosion Hazards Handbook of Industrial Chemicals**. Elsevier, Noyes Publications, New Jersey, 1998.

CROWE, C.; SOMMERFELD, M.; TSUJI, Y. **Multiphase Flows with Droplets and Particles**. Florida: CRC Press LLC, p. 29, 1998.

CROWE C.T.; SHARMA M. P.; STOCK D.E. **The Particle Source in Cell (PSI-Cell) Model for Gas-Droplet Flows**. ASME Journal of Fluids engineering, v.99, p. 325-332, 1977.

CRUZ, S. R. A. **Análise Comparativa das Metodologias Utilizadas para Classificação de Áreas Potencialmente Explosivas em Unidades de Refino de Petróleo**. Dissertação (Mestrado em Tecnologia de Processos Químicos e Bioquímicos) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Escola de Química, Rio de Janeiro, 2012.

COLDRICK, S. **Modelling Small-Scale Flashing Propane Jets**. Chemical Engineering Transactions, v. 48, p.73-78, 2016.

COSTA, A. Z. M.; PEREIRA, J. L.; CÉSAR, J. DE O.; LIMA, L. C. **Tecnologia de Aplicação de Agroquímicos**. Disponível em: <http://www.ceplac.gov.br/radar/Artigos/artigo1.htm>. acesso em: 01/06/2018.

COX, A. W. Studies in Support of a Quantitative Approach to Hazardous Area Classification. **PhD thesis, Loughborough University**, United Kingdom, 1989.

COX, A. W.; LEES, F. P.; ANG, M. L. **Classification of Hazardous Locations**. Institute of Chemical Engineers, United Kingdom, 1990.

EL-KHOLY, A. H. E. **Study for the Effect of Flash Evaporation on Droplets and Sprays Under Different Operating Conditions**. Master Thesis of Science in Mechanical Engineering, Hewan University, Helwan, 2009.

ERTHAL, L., **Atmosferas Potencialmente Explosivas: Um Estudo de Caso como Contribuição para a Classificação de Áreas na Atividade da Indústria do Petróleo, Química e Petroquímica**. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal Fluminense, Niterói, 2004.

ESCALANTE, E. S. R. **Estudo dos Limites de Inflamabilidade em Mistura Etanol ar diluente**. Dissertação (Mestrado), Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, 2016.

EUROPEAN LPG ASSOCIATION, Disponível em: <http://www.aegpl.eu/>, acesso em: 17/08/2017.

EPSTEIN, M. ; FAUSKE, H. K., HAUSER, G.M. **A Model of the Dilution of a Forced Two-Phase Chemical Plume in a Horizontal Wind**, J. Loss Prev. Process Ind. 280–290, 1990.

FALCONE, A. M.; CATALDO J. C. **Entrainment Velocity in an Axisymmetric Turbulent Jet**. *Journal of Fluids Engineering*. v. 125, p. 620-627, 2003.

FAUSKE, H. K.; EPSTEIN, M. **Source Term Considerations in Connection with Vapour Cloud Modelling**. *J Loss Prev Proc Ind.*, 1988.

GANT, S.E. and IVINGS, M. J. **CFD Modelling of Low Pressure Jets for Area Classification**. Report HSL/2005/11, Health & Safety Laboratory, Buxton, 2005.

GARCIA, J., CRESPO, A. **A Model of Turbulent Two-Phase Flashing Jets**, *ASME Fluids Engineering*. Division Summer Meeting, pp. 1–6, 1997.

HSE (Health and Safety Executive). **Hazardous Area Classification and Control of Ignition Sources**. Disponível em: <http://www.hse.gov.uk/comah/sragtech/techmeasareaclas.htm>. Acesso em: 05/01/2018.

Hervieu, E.; Veneau, T. **Experimental Determination of the Droplet Size and Velocity Distributions at the Exit of the Bottom Discharge Pipe of a Liquefied Propane Storage Tank During a Sudden Blowdown**. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, v.9, p. 413–425, 1996.

IBARS, F. E.; TORRENT, J.G. **Manual Práctico Clasificación de Zonas em Atmosferas explosivas**. Colegio de Ingenieros Tecnicos Industriales de Barcelona – CETIB, Espanha, 2005.

IANELLO, V.; ROTHE, P.H.; WALLIS, G.B.; DIENER, R. SCHREIBER, S. **Aerosol Research Program: Improved Source Term Definition for Modeling the Ambient Impact of Accidental Release of Hazardous Liquids**, in: Proc. 6th Int. Symp. Loss Prevention and Safety Promotion in the Process Industries, pp. 58/1–58/30., 1989.

INTERNACIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION. **IEC 60079-10-1/Ed2: Explosive atmospheres – Part 10-1: Classification of Areas – Explosive Gas Atmospheres**. Geneva, 2015.

INTERNACIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION. **IEC 60079-10-1/Ed1: Explosive atmospheres – Part 10-1: Classification of Areas – Explosive Gas Atmospheres**. Geneva, 2008.

JIN, G.; TIAN, R.; SONG, X.; WU, W. **Theoretical and Experimental Studies of Droplet Evaporation in High-Temperature Air**. *Proceedings of The Second China Energy Scientist Forum*. p. 218-223, 2010.

JORDÃO, D. M. **Manual de Instalações Elétricas em Indústrias Químicas, Petroquímicas e de Petróleo: Atmosferas Explosivas**. 3^aed. Rio de Janeiro: Qualitymark, 2002.

KELSEY, A. **CFD Modelling of Two Phase Flashing jets: Simulation of Evaporating Sprays to Inform Modelling of Flashing Jet.** Health and safety laboratory: Report number: 56. 1999.

KELSEY, A. **CFD Modelling of Two Phase Flashing Jets: Simulation of Flashing Propane Jets.** Health & Safety Laboratory Report: 61, 2001.

KHOURY, F. M. **Predicting the Performance of Multistage Separation Processes.** 2nd, CRC Press LLC, 1999.

KUKKONEN, J. **Modelling Source Terms for the Atmospheric Dispersion of Hazardous Substances,** Commentationes Physico-Mathematicae 115/1990, Finnish Society of Sciences and Letters, Helsinki, 1990.

LACOME, J. M.; LEMOFACK, C.; REVEILLON, J.; DEMOULIN, F. X. **Numerical Modelling of Flashing Liquid Jets Due to Leakage of Liquefied Gas Storage.** 43^o Esreda Seminar on Land Use Planning and Risk-Informed Decision Making, Rouen, France, 2012.

LE CHATELIER, H. **Estimation of Firedamp by Flammability Limits.** Journal et Annales des mines, v. 19, p. 388-395, 1891.

LONG, V. D. **Estimation of the Extent of Hazard Areas Around a Vent.** Chem. Process Hazard II, p.6, 1963.

McMILLAN, A. **Electrical Installations in Hazardous Area.** Elsevier Science, LTD, 1998.

MANNAN, S. **Lees' Loss Prevention in the Process Industries: Hazard Identification, Assessment, and Control.** Amsterdam: Elsevier Butterworth-Heinemann, p. 133, v. 1, Third Edition, 2005.

McDONELL, V. G.; SAMUELSEN, G. S. **An Experimental Data Base for The Computational Fluid Dynamics of Reacting and Nonreacting Methanol Sprays.** Journal of Fluids Engineering, v. 117, p. 145-153, 1995.

MENTER, F. R.; Kuntz M.; LANGTRY, R. **Ten Years of Industrial Experience with the SST Turbulence Model.** Proceedings of the 4th International Symposium on Turbulence, Heat and Mass Transfer, p. 624-632. New York, 2003.

MONTAREZI, H.; BLOCKEN, B.; HENSEN, J. L. M. **Evaporative Cooling by Water Spray Systems: CFD simulation, Experimental Validation and Sensitivity Analysis. Building and Environment.** Elsevier, 2015.

MURRONE, A.; VILLEDIEU, P. **Numerical Modeling of Dispersed Two-Phase Flows.** AerospaceLab Journal, Issue 13, 2017.

NFPA 497. **Recommended Practice for the Classification of Flammable Liquids, Gases, or Vapours and of Hazardous (Classified) Locations for Electrical Installations in Chemical Process Areas.** National Fire Protection Association, 2017.

NOHLÁS, K.; TRYGGVADOTTIR, S. **Effect of Different Oil Droplet Sizes in a Flow of Natural Gas around a Compressor Blade:** Numerical Simulations of Multiphase Flow using Computational Fluid Dynamics. Master's thesis, Chalmers University of Technology, 2015.

N-2918. **Norma Técnica Petrobras: Atmosferas Explosivas - Classificação de Áreas.** CONTEC, 2017.

Nielsen, M. and Ott, S. **Fladis Field Experiments—Final Report.** Risoe-R-898 EN , Risoe National Laboratory. Roskilde, Denmark, 1996.

OISD 113. **Classification of Areas for Electrical Installations at Hydrocarbon Processing and Handling Facilities.** Oil Industry Safety Directorate (OISD), India, 2012.

PERSSON, T. **Eulerian-Lagrangian Modeling of Multicomponent Spray for Aseptic Treatment of Carton Bottles in the Food Process and Packaging Industry.** Master's Thesis in Applied Mechanics. Chalmers University of Technology, 2013.

PETROBRAS. **Gás Liquefeito de Petróleo Informações Técnicas (versão 1.2).** Disponível em: Sites.petrobras.com.br, acesso em: 05/01/2018.

PINTO, J. W. O. **Uso da Otimização Sequencial Aproximada a Problemas Uni e Multiobjetivos de Gerenciamento de Reservatórios.** Dissertação, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2014.

POLANCO, G. C.; HOLDO, A. E. ; MUNDAY, G., **General Review of Flashing Jet Studies,** Journal of Hazardous Materials, v. 173, p. 2-18, 2010.

RANGEL, E. **A Nova Diretriz Atex 2014/34.** Revista o Setor Elétrico, 108ª Ed., p. 70, 2015.

RANZ, W. E.; MARSHALL, W. R. **Evaporation from Drops: Part I.** Chemical Engineering Progress, v. 48, p.141–146, 1952.

REITZ, R. D.; Diwakar, R., **Structure of High-Pressure Fuel Sprays.** SAE Technical Paper, 870598, 1987.

SÁNCHEZ, I. F. H., **Quadrados Latinos com Aplicações em Engenharia de Software.** Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2011.

SENAI (Serviço Nacional de Aprendizagem Industrial). **Instrumentação Geral.** Editora Senai-SP, 1ª edição, p.563, São Paulo, 2015.

SCHROEDER, V. **Calculation of Flammability and Lower Flammability Limits of Gas Mixtures for Classification Purposes**. Bundesanstalt für Materialforschung und–prüfung (BAM), Division Gases, 2016.

SCHILLER L., NAUMANN A. **Über die grundlegenden Berechnungen bei der Schwerkraftaufbereitung**. Z. Ver. Deut. Ing., v. 77, p. 318–320, 1933.

SCHOSKER, R. **Intrinsic safety 101 - Hazardous Locations: Protection Methods, Containment, Segregation, and Prevention**. InTech Magazine, 2013.

SCHUMANN, S. **An experimental and modelling study of two-phase flashing jets**, Final Report, CEC: Environment Programme, 1997.

SMITH, J. M.; VAN NESS, H. C. ; ABBOTT, M. M. **Introdução à Termodinâmica da Engenharia Química**. 7ª Ed., LTC, Rio de Janeiro, 2007.

SIURANA, A. G.; FONT, A. E.; PAYÁ, J. B. **Métodos Aproximados para El Cálculo de Operaciones de Separación Multicomponente**. Departamento de Ingeniería Química, Universidad de Alicante. Disponível em: http://iq.ua.es/MetAprox/233_destilacin_sbita_adiabtica.html. acesso em: 27/06/2018.

SOARES, G. J.; GOMES, V. M.; CHAVES, F. S.; ELER, E. O. **Instalações Elétricas em Atmosfera Explosiva**. Revista Científica Semana Acadêmica, Vol. 01, 2015.

SOUZA, A. O. **Estudo e Inovação em Classificação de Áreas de Atmosfera Explosiva Via Fluidodinâmica Computacional**. Tese de Doutorado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2016.

STIESCH, G. **Modeling Engine Spray and Combustion Processes**. Springer, v.1, p.154, New York, 2003.

TILTON, J. N.; FARLEY, C. W. **Predicting Liquid Jet Breakup and the Aerosol Formation during the Accidental Release of Pressurized Hydrogen Fluoride**. Process Safety Progress, v. 9, p.120-124, 1990.

TOMMASINI, R. **The Classification of Hazardous Areas Where Explosive Gas Atmospheres May be Present**. Safety Science, v.58, p. 53–58, 2013.

TELLES, P. C. S. **Vasos de Pressão**. LTC, 2ª edição, Rio de Janeiro, 1996.

UZEDA, R.; SANTANA, R. P.; ZAED, S. **Reclassificação de Áreas da Tancagem Criogênica de Etileno e Propileno da Copene Petroquímica do Nordeste**. III EPIAEx, Fortaleza, 2002.

WHEATLEY C.J. **Factors Affecting Cloud Formation from Releases of Liquefied Gases**, in: Proc. IChemE. Symposium on Refinement of Estimates of the Consequences of Heavy Toxic Vapour Releases, UMIST, 1986.

WANKHEDE, A. **Technical Article: What is an Inert Gas or IG System on Ships?**. <https://www.marineinsight.com/marine-safety/protection-against-explosion-the-i-g-system/>. Acesso: 02/06/2018.

WITLOX, H. V. M.; HARPER, M.; TOPALIS, P.; WILKINSON, S. **Modelling the Consequence of Hazardous Multicomponent Two-Phase Releases to the Atmosphere**. IChemE Symposium series no. 151, 2006.

WITLOX H. W. M. AND BOWEN, P. J. **Flashing liquid Jets and Two-Phase Dispersion**. contract research report 403/2002, Health and Safety Executive, Norwich, 2002.

WURTZ, J.; BARTZIS, J.; VENETSANOS, A.; ANDRONOPOULOS, S.; STATHARAS, J.; NIJSING, R. **A Dense Vapour Dispersion Code Package for Applications in the Chemical and Process Industry**, J. Hazard. Mater. , p. 273–284, 1996.

YAWS, C. L.. **Chemical Properties Handbook**, McGrawHill, New York, 1999.

ZHAO, F., **Inert Gas Dilution Effect on Flammability Limits of Hydrocarbon Mixture**. Dissertation (Doctor of Philosophy), Texas A&M University, Texas, 2011.

Apêndice

i) Simulações de 100 casos de vazamento de propano liquefeito

| Caso | d_o (mm) | Q_m (kg/s) | v (m/s) | D_m (μm) | θ ($^\circ$) | Extensão LIE (m) | Extensão $\frac{1}{2}$ LIE (m) | Volume LIE (m^3) | Volume $\frac{1}{2}$ LIE (m^3) |
|------|---------------|-----------------|--------------|----------------------------|--------------------------|------------------------|--------------------------------------|-----------------------------------|---|
| 1 | 1,3908 | 0,0049 | 56,3749 | 61,9781 | 16,9648 | 1,30073 | 2,5859 | 0,014937 | 0,125371 |
| 2 | 0,5492 | 0,0008 | 57,8699 | 60,0323 | 10,522 | 0,548796 | 1,06233 | 0,000885138 | 0,0072001 |
| 3 | 0,2506 | 0,0001 | 54,4059 | 64,7608 | 7,3304 | 0,184597 | 0,3925 | 1,7010-5 | 0,000241771 |
| 4 | 1,2005 | 0,0043 | 76,8469 | 43,1565 | 13,4998 | 1,44372 | 2,86732 | 0,0198326 | 0,173607 |
| 5 | 1,5203 | 0,0067 | 65,6922 | 51,6457 | 16,4311 | 1,64474 | 3,26784 | 0,0305603 | 0,267229 |
| 6 | 2,2554 | 0,0143 | 91,6224 | 35,4858 | 16,9461 | 3,05491 | 6,22677 | 0,145966 | 0,956844 |
| 7 | 1,3018 | 0,0023 | 47,3712 | 77,5644 | 17,905 | 0,839596 | 1,65055 | 0,00384162 | 0,031051 |
| 8 | 2,4955 | 0,0131 | 52,0285 | 68,5142 | 23,6547 | 2,33389 | 4,51907 | 0,0597807 | 0,391162 |
| 9 | 0,3975 | 0,0005 | 69,5183 | 48,3711 | 8,1673 | 0,49084 | 0,949405 | 0,000484777 | 0,00426032 |
| 10 | 1,6987 | 0,0086 | 70,2605 | 47,7849 | 16,7943 | 1,93761 | 4,05724 | 0,0444934 | 0,292262 |
| 11 | 1,8748 | 0,0102 | 83,0658 | 39,5525 | 16,2265 | 2,34584 | 4,84614 | 0,0729589 | 0,485526 |
| 12 | 2,4717 | 0,0115 | 50,3422 | 71,4919 | 23,9327 | 2,13494 | 4,13534 | 0,0470785 | 0,307844 |
| 13 | 0,4731 | 0,0006 | 58,4872 | 59,2665 | 9,7142 | 0,479052 | 0,927274 | 0,000556407 | 0,00455569 |
| 14 | 0,9133 | 0,0025 | 69,3865 | 48,4768 | 12,3916 | 1,04175 | 2,06937 | 0,00701954 | 0,0584721 |
| 15 | 2,1018 | 0,0126 | 63,1249 | 54,1142 | 19,7086 | 2,56126 | 5,15405 | 0,0737167 | 0,462634 |
| 16 | 2,35 | 0,0152 | 60,5669 | 56,833 | 21,2753 | 2,75235 | 5,3953 | 0,0908409 | 0,574154 |
| 17 | 1,8637 | 0,0051 | 47,8688 | 76,4602 | 21,3119 | 1,31921 | 2,52436 | 0,0134224 | 0,110873 |
| 18 | 1,4437 | 0,0062 | 72,0455 | 46,4329 | 15,2895 | 1,66867 | 3,31455 | 0,0312719 | 0,275175 |
| 19 | 0,2839 | 0,0002 | 67,1277 | 50,3647 | 7,0241 | 0,303101 | 0,61833 | 8,1110 ⁻⁵ | 0,000883227 |
| 20 | 1,9816 | 0,0087 | 53,0493 | 66,8443 | 20,8751 | 1,82888 | 3,54143 | 0,0364736 | 0,292431 |
| 21 | 1,2389 | 0,0027 | 49,5326 | 73,0317 | 17,0817 | 0,912599 | 1,79264 | 0,00504451 | 0,0413558 |
| 22 | 2,3686 | 0,0087 | 48,3834 | 75,3585 | 23,8978 | 1,81565 | 3,47282 | 0,0307343 | 0,20352 |
| 23 | 2,0136 | 0,0117 | 85,7043 | 38,2014 | 16,5556 | 2,55303 | 5,27393 | 0,0938112 | 0,623905 |

| Caso | d_o (mm) | Q_m (kg/s) | v (m/s) | D_m (μm) | θ (°) | Extensão LIE (m) | Extensão ½ LIE (m) | Volume LIE (m ³) | Volume ½ LIE (m ³) |
|-------------|------------------------------|--------------------------------|-------------------|------------------------------|-----------------|--------------------------------|----------------------------------|--|--|
| 24 | 2,4208 | 0,0119 | 69,4394 | 51,4868 | 23,4202 | 2,20482 | 4,26966 | 0,0513693 | 0,329844 |
| 25 | 1,946 | 0,0076 | 69,8687 | 51,2409 | 21,0486 | 1,68087 | 3,21312 | 0,0279353 | 0,225867 |
| 26 | 2,239 | 0,0147 | 40,769 | 80,8417 | 17,975 | 3,0327 | 6,0208 | 0,131963 | 0,832268 |
| 27 | 2,4308 | 0,0176 | 44,4993 | 74,7917 | 19,4719 | 3,33627 | 6,53657 | 0,156414 | 0,967733 |
| 28 | 1,0929 | 0,003 | 61,4825 | 56,746 | 14,9893 | 1,02212 | 2,03202 | 0,00694272 | 0,0577868 |
| 29 | 0,2214 | 0,0001 | 52,8412 | 64,4176 | 6,3321 | 0,196373 | 0,45145 | 1,7010 ⁻⁵ | 0,000287559 |
| 30 | 0,6622 | 0,0012 | 58,809 | 58,8642 | 11,4559 | 0,670531 | 1,31513 | 0,00173737 | 0,0142226 |
| 31 | 2,3349 | 0,016 | 40,153 | 81,951 | 18,2313 | 3,20465 | 6,36192 | 0,153543 | 0,966766 |
| 32 | 0,6866 | 0,0014 | 52,2751 | 65,0135 | 11,0997 | 0,762717 | 1,4954 | 0,00254478 | 0,0212371 |
| 33 | 1,5867 | 0,006 | 64,25 | 54,7534 | 18,3866 | 1,42611 | 2,83568 | 0,019585 | 0,16429 |
| 34 | 2,2215 | 0,0106 | 67,8224 | 52,4445 | 22,2296 | 2,10534 | 4,02289 | 0,0449625 | 0,288722 |
| 35 | 0,7642 | 0,0016 | 56,1684 | 61,1681 | 12,0726 | 0,784126 | 1,53785 | 0,00287884 | 0,0237374 |
| 36 | 0,3782 | 0,0004 | 61,3296 | 56,8618 | 8,8087 | 0,393232 | 0,751108 | 0,00026393 | 0,00226402 |
| 37 | 1,4283 | 0,0055 | 58,1263 | 59,4386 | 16,7431 | 1,40848 | 2,79946 | 0,0194251 | 0,164463 |
| 38 | 1,9248 | 0,0104 | 35,4406 | 91,7287 | 15,6459 | 2,5058 | 5,1759 | 0,0856264 | 0,565914 |
| 39 | 1,9121 | 0,0109 | 45,6835 | 73,0816 | 17,4707 | 2,39251 | 4,81405 | 0,0694388 | 0,446835 |
| 40 | 0,9434 | 0,0026 | 49,1959 | 68,5051 | 12,6749 | 1,06194 | 2,08197 | 0,00738912 | 0,0611788 |
| 41 | 0,9711 | 0,0014 | 76,6293 | 47,7914 | 15,3963 | 0,651801 | 1,28104 | 0,00175915 | 0,0142631 |
| 42 | 1,809 | 0,0097 | 46,8075 | 71,5403 | 17,1753 | 2,09089 | 4,32069 | 0,0544302 | 0,361794 |
| 43 | 0,8065 | 0,0012 | 71,4064 | 50,3884 | 13,6646 | 0,618224 | 1,21412 | 0,00144957 | 0,0116371 |
| 44 | 2,0607 | 0,0092 | 67,5998 | 52,5805 | 21,3823 | 1,95294 | 3,6828 | 0,0398687 | 0,315274 |
| 45 | 1,7679 | 0,0085 | 57,4908 | 59,9863 | 18,5422 | 1,91261 | 3,75029 | 0,0368069 | 0,241225 |
| 46 | 1,6124 | 0,0076 | 51,8412 | 65,4796 | 16,949 | 1,76761 | 3,55837 | 0,0341342 | 0,227702 |

| Caso | d_o (mm) | Q_m (kg/s) | v (m/s) | D_m (μm) | θ (°) | Extensão LIE (m) | Extensão ½ LIE (m) | Volume LIE (m ³) | Volume ½ LIE (m ³) |
|-------------|------------------------------|--------------------------------|-------------------|------------------------------|-----------------|--------------------------------|----------------------------------|--|--|
| 47 | 1,3747 | 0,0054 | 37,0286 | 88,1526 | 13,488 | 1,76616 | 3,64828 | 0,0303333 | 0,198387 |
| 48 | 1,0508 | 0,0027 | 63,7989 | 55,0653 | 14,9204 | 0,95705 | 1,90288 | 0,00568843 | 0,0466514 |
| 49 | 1,2899 | 0,0048 | 39,1029 | 83,9234 | 13,3905 | 1,59279 | 3,33424 | 0,0243712 | 0,160025 |
| 50 | 0,484 | 0,0007 | 43,7537 | 75,917 | 8,6241 | 0,597652 | 1,15601 | 0,00101047 | 0,00892218 |
| 51 | 2,4016 | 0,0155 | 58,4696 | 59,148 | 21,7641 | 2,73936 | 5,37035 | 0,0915444 | 0,576911 |
| 52 | 1,9969 | 0,0069 | 73,4331 | 49,3281 | 21,7315 | 1,5719 | 3,00618 | 0,0227331 | 0,184096 |
| 53 | 0,3526 | 0,0004 | 40,9882 | 80,4553 | 7,1503 | 0,477593 | 0,923513 | 0,000399887 | 0,00390361 |
| 54 | 0,2988 | 0,0002 | 66,3587 | 53,3571 | 8,0827 | 0,272142 | 0,534003 | 7,0110 ⁻⁵ | 0,000644716 |
| 55 | 1,077 | 0,003 | 60,6417 | 57,3905 | 14,7961 | 1,02068 | 2,02904 | 0,00710893 | 0,0585301 |
| 56 | 1,338 | 0,0029 | 74,8988 | 48,6036 | 17,9206 | 0,934596 | 1,86082 | 0,00552064 | 0,0452708 |
| 57 | 1,671 | 0,0032 | 79,8019 | 46,4159 | 20,4934 | 1,02185 | 1,98315 | 0,00649898 | 0,0522683 |
| 58 | 0,8991 | 0,0023 | 37,2329 | 87,7149 | 10,9352 | 1,13996 | 2,23402 | 0,00901235 | 0,0766424 |
| 59 | 1,5641 | 0,0069 | 55,1693 | 62,1007 | 17,1413 | 1,62627 | 3,23163 | 0,0295549 | 0,25284 |
| 60 | 2,1186 | 0,0129 | 53,2395 | 64,0062 | 19,6505 | 2,61608 | 5,12726 | 0,0775273 | 0,482901 |
| 61 | 2,0552 | 0,0121 | 53,8964 | 63,3415 | 19,4555 | 2,40708 | 4,84447 | 0,068906 | 0,431673 |
| 62 | 1,6544 | 0,0067 | 63,4303 | 55,3238 | 18,6777 | 1,56789 | 3,07601 | 0,024466 | 0,202823 |
| 63 | 1,0199 | 0,0026 | 62,7828 | 55,7859 | 14,6041 | 0,941296 | 1,87145 | 0,00540742 | 0,0444708 |
| 64 | 1,222 | 0,0018 | 79,0261 | 46,7393 | 17,4644 | 0,737399 | 1,45027 | 0,00265169 | 0,0211489 |
| 65 | 0,8664 | 0,0014 | 72,2432 | 49,9421 | 14,2261 | 0,655382 | 1,3043 | 0,00181165 | 0,0147036 |
| 66 | 2,3009 | 0,0157 | 47,1098 | 71,1387 | 19,4248 | 3,07564 | 6,02641 | 0,12156 | 0,763246 |
| 67 | 0,8317 | 0,0021 | 44,8168 | 74,3242 | 11,4256 | 1,0002 | 1,96047 | 0,00597903 | 0,049642 |
| 68 | 0,9686 | 0,0012 | 78,6425 | 46,9022 | 15,5216 | 0,600256 | 1,18034 | 0,0013961 | 0,0112454 |
| 69 | 0,5102 | 0,0007 | 36,4205 | 89,4848 | 8,1556 | 0,664205 | 1,26771 | 0,00130464 | 0,0119347 |

| Caso | d_o (mm) | Q_m (kg/s) | v (m/s) | D_m (μm) | θ (°) | Extensão LIE (m) | Extensão ½ LIE (m) | Volume LIE (m ³) | Volume ½ LIE (m ³) |
|-------------|------------------------------|--------------------------------|-------------------|------------------------------|-----------------|--------------------------------|----------------------------------|--|--|
| 70 | 0,2349 | 0,0002 | 55,9438 | 61,3747 | 6,682 | 0,293918 | 0,607189 | 6,9510-5 | 0,000712865 |
| 71 | 0,6032 | 0,0008 | 68,822 | 51,8465 | 11,6501 | 0,514154 | 0,99597 | 0,000768519 | 0,0061817 |
| 72 | 0,7201 | 0,0015 | 55,2923 | 61,9839 | 11,6417 | 0,768803 | 1,50756 | 0,00266918 | 0,0219097 |
| 73 | 2,1362 | 0,0094 | 69,0346 | 51,7218 | 21,9505 | 1,94561 | 3,66959 | 0,0401648 | 0,320127 |
| 74 | 1,3517 | 0,0054 | 42,2707 | 78,2755 | 14,1934 | 1,62555 | 3,1862 | 0,0290931 | 0,251401 |
| 75 | 0,5803 | 0,001 | 50,1813 | 67,3394 | 10,0265 | 0,661914 | 1,29764 | 0,00155768 | 0,0131612 |
| 76 | 1,8324 | 0,0099 | 41,7018 | 79,2257 | 16,4262 | 2,26268 | 4,67456 | 0,0647861 | 0,429889 |
| 77 | 0,755 | 0,0013 | 66,8594 | 53,0399 | 12,8864 | 0,652134 | 1,27995 | 0,0017096 | 0,0139278 |
| 78 | 1,6275 | 0,0043 | 74,5437 | 48,776 | 19,7295 | 1,18303 | 2,32403 | 0,0101973 | 0,084585 |
| 79 | 1,4612 | 0,0053 | 62,4712 | 56,0121 | 17,4451 | 1,34859 | 2,6812 | 0,016732 | 0,141613 |
| 80 | 0,3311 | 0,0002 | 73,6845 | 49,2014 | 8,8603 | 0,260632 | 0,50507 | 7,0110-5 | 0,00058908 |
| 81 | 1,1325 | 0,0038 | 50,7758 | 66,6588 | 14,0783 | 1,25805 | 2,49929 | 0,0128334 | 0,108551 |
| 82 | 2,1851 | 0,0124 | 60,4551 | 57,5362 | 21,0487 | 2,39544 | 4,6968 | 0,0639307 | 0,404179 |
| 83 | 1,1305 | 0,0017 | 78,2095 | 47,0886 | 16,7354 | 0,719482 | 1,41454 | 0,00236315 | 0,0192159 |
| 84 | 0,7898 | 0,0008 | 77,928 | 47,2112 | 13,97 | 0,496008 | 0,962452 | 0,000748832 | 0,00589849 |
| 85 | 1,7184 | 0,0086 | 38,7024 | 84,7042 | 15,384 | 2,17875 | 4,50075 | 0,0574678 | 0,381721 |
| 86 | 0,4379 | 0,0004 | 70,4431 | 50,9174 | 10,0164 | 0,36834 | 0,704202 | 0,0002366 | 0,00190475 |
| 87 | 0,57 | 0,001 | 45,5057 | 73,3326 | 9,5224 | 0,694603 | 1,36141 | 0,0017615 | 0,0150168 |
| 88 | 0,1822 | 0,000046 | 77,2991 | 47,4891 | 6,6902 | 0,102863 | 0,256764 | 2,2910-6 | 5,8910-5 |
| 89 | 1,176 | 0,0032 | 65,2838 | 54,0563 | 15,9309 | 1,02933 | 2,04697 | 0,00720763 | 0,059556 |
| 90 | 2,1735 | 0,0134 | 54,5329 | 62,7135 | 20,1075 | 2,64863 | 5,12333 | 0,0805618 | 0,504618 |
| 91 | 1,4927 | 0,0066 | 49,5008 | 68,1392 | 15,9863 | 1,65818 | 3,33791 | 0,0319457 | 0,273966 |
| 92 | 1,5326 | 0,0064 | 57,2103 | 60,2322 | 17,229 | 1,53147 | 3,04376 | 0,0250069 | 0,211269 |

| Caso | d_o (mm) | Q_m (kg/s) | v (m/s) | D_m (μm) | θ (°) | Extensão LIE (m) | Extensão ½ LIE (m) | Volume LIE (m ³) | Volume ½ LIE (m ³) |
|-------------|------------------------------|--------------------------------|-------------------|------------------------------|-----------------|--------------------------------|----------------------------------|--|--|
| 93 | 1,802 | 0,0063 | 70,8511 | 50,6913 | 20,3643 | 1,49578 | 2,89786 | 0,0201662 | 0,163553 |
| 94 | 2,2886 | 0,0087 | 74,2366 | 48,9267 | 23,3599 | 1,82558 | 3,44531 | 0,0335988 | 0,267695 |
| 95 | 0,4156 | 0,0005 | 42,6204 | 77,7043 | 7,899 | 0,520018 | 1,0058 | 0,000585299 | 0,00547732 |
| 96 | 0,7047 | 0,0011 | 65,648 | 53,8166 | 12,3596 | 0,608688 | 1,19468 | 0,00135372 | 0,0110693 |
| 97 | 1,2641 | 0,0038 | 64,4206 | 54,6366 | 16,4289 | 1,12121 | 2,22954 | 0,00961715 | 0,0802168 |
| 98 | 0,6327 | 0,0006 | 75,665 | 48,2384 | 12,3698 | 0,43035 | 0,834637 | 0,000469616 | 0,00379032 |
| 99 | 1,74 | 0,0055 | 72,3512 | 49,8854 | 20,1719 | 1,38797 | 2,68952 | 0,0158849 | 0,129289 |
| 100 | 1,0066 | 0,0028 | 34,6365 | 93,6656 | 11,1969 | 1,31044 | 2,70681 | 0,0122343 | 0,0809693 |

ii) Simulações de 291 casos de vazamento de GLP

| Caso | d _o (mm) | Q _m (kg/s) | T _s (K) | v (m/s) | D _m (μm) | θ (°) | Y _{prop} | X _{prop} | LIE | Extensão LIE (m) | Extensão ½ LIE (m) | Volume LIE (m ³) | Volume ½ LIE (m ³) |
|------|------------------------|--------------------------|-----------------------|------------|------------------------|----------|-------------------|-------------------|-------|------------------------|--------------------------|------------------------------------|--------------------------------------|
| 1 | 0,9207 | 0,001 | 267,006 | 66,915 | 43,917 | 14,380 | 0,210 | 0,056 | 0,020 | 0,575 | 1,118 | 0,001 | 0,009 |
| 2 | 1,6555 | 0,006 | 246,399 | 70,624 | 42,787 | 19,588 | 0,777 | 0,388 | 0,021 | 1,350 | 2,551 | 0,013 | 0,093 |
| 3 | 0,848 | 0,002 | 237,387 | 56,842 | 53,302 | 12,908 | 0,929 | 0,681 | 0,022 | 0,790 | 1,593 | 0,004 | 0,027 |
| 4 | 2,0845 | 0,010 | 240,114 | 67,569 | 44,847 | 21,725 | 0,889 | 0,575 | 0,022 | 1,865 | 3,524 | 0,033 | 0,250 |
| 5 | 2,0759 | 0,012 | 251,057 | 58,482 | 51,452 | 20,184 | 0,675 | 0,285 | 0,021 | 2,122 | 3,952 | 0,045 | 0,336 |
| 6 | 2,4535 | 0,015 | 248,850 | 65,841 | 45,802 | 23,112 | 0,725 | 0,330 | 0,021 | 2,225 | 4,148 | 0,054 | 0,417 |
| 7 | 1,3075 | 0,005 | 233,958 | 33,521 | 90,229 | 12,673 | 0,972 | 0,845 | 0,022 | 1,609 | 3,116 | 0,030 | 0,217 |
| 8 | 1,3441 | 0,005 | 258,011 | 54,708 | 54,517 | 15,786 | 0,493 | 0,167 | 0,021 | 1,187 | 2,364 | 0,012 | 0,093 |
| 9 | 1,6387 | 0,007 | 262,658 | 44,786 | 66,114 | 16,004 | 0,353 | 0,105 | 0,020 | 1,588 | 3,162 | 0,030 | 0,232 |
| 10 | 2,1648 | 0,014 | 246,486 | 48,440 | 62,377 | 19,011 | 0,775 | 0,386 | 0,021 | 2,560 | 4,829 | 0,073 | 0,463 |
| 11 | 0,2723 | 9,20E-5 | 265,473 | 72,552 | 40,616 | 8,064 | 0,262 | 0,073 | 0,020 | 0,147 | 0,301 | 1,28010-5 | 1,31110-4 |
| 12 | 0,669 | 0,001 | 245,983 | 42,920 | 70,425 | 10,011 | 0,785 | 0,398 | 0,021 | 0,721 | 1,397 | 0,002 | 0,018 |
| 13 | 2,4118 | 0,010 | 271,455 | 55,665 | 52,351 | 21,710 | 0,054 | 0,013 | 0,019 | 1,966 | 3,668 | 0,039 | 0,294 |
| 14 | 1,328 | 0,004 | 267,260 | 58,808 | 49,949 | 16,357 | 0,202 | 0,054 | 0,020 | 0,986 | 1,967 | 0,007 | 0,054 |
| 15 | 2,1129 | 0,009 | 252,669 | 73,263 | 40,997 | 22,395 | 0,636 | 0,254 | 0,021 | 1,590 | 3,008 | 0,021 | 0,156 |
| 16 | 2,3894 | 0,016 | 258,600 | 38,922 | 76,561 | 18,070 | 0,476 | 0,159 | 0,021 | 3,019 | 5,694 | 0,111 | 0,725 |
| 17 | 1,8197 | 0,007 | 247,837 | 72,174 | 41,820 | 20,700 | 0,747 | 0,353 | 0,021 | 1,445 | 2,695 | 0,015 | 0,110 |
| 18 | 1,124 | 0,003 | 271,988 | 38,452 | 75,706 | 12,566 | 0,035 | 0,008 | 0,019 | 1,089 | 2,140 | 0,008 | 0,069 |
| 19 | 1,2133 | 0,004 | 269,829 | 41,383 | 70,641 | 13,437 | 0,112 | 0,028 | 0,019 | 1,160 | 2,310 | 0,011 | 0,087 |
| 20 | 1,2811 | 0,004 | 235,195 | 63,009 | 48,043 | 16,655 | 0,958 | 0,781 | 0,022 | 1,102 | 2,224 | 0,010 | 0,076 |
| 21 | 1,846 | 0,008 | 269,224 | 38,815 | 75,400 | 16,077 | 0,134 | 0,034 | 0,019 | 1,837 | 3,657 | 0,043 | 0,292 |

| Caso | d_o (mm) | Q_m (kg/s) | T_s (K) | v (m/s) | D_m (μm) | θ (°) | Y_{prop} | X_{prop} | LIE | Extensão LIE (m) | Extensão ½ LIE (m) | Volume LIE (m³) | Volume ½ LIE (m³) |
|-------------|------------------------------|--------------------------------|-----------------------------|-------------------|------------------------------|-----------------|-------------------------|-------------------------|------------|---------------------------------|-----------------------------------|---|---|
| 22 | 1,3722 | 0,005 | 259,358 | 37,017 | 80,411 | 13,388 | 0,454 | 0,148 | 0,020 | 1,459 | 2,904 | 0,022 | 0,179 |
| 23 | 2,4385 | 0,015 | 255,410 | 62,943 | 47,556 | 22,574 | 0,565 | 0,207 | 0,021 | 2,271 | 4,233 | 0,057 | 0,433 |
| 24 | 1,0919 | 0,003 | 262,717 | 33,731 | 87,774 | 11,475 | 0,351 | 0,105 | 0,020 | 1,208 | 2,341 | 0,011 | 0,089 |
| 25 | 1,0547 | 0,002 | 256,077 | 72,717 | 41,127 | 15,773 | 0,547 | 0,196 | 0,021 | 0,686 | 1,351 | 0,002 | 0,017 |
| 26 | 2,2946 | 0,015 | 241,490 | 57,085 | 53,068 | 21,153 | 0,867 | 0,528 | 0,022 | 2,473 | 4,606 | 0,073 | 0,567 |
| 27 | 1,5396 | 0,007 | 253,879 | 51,150 | 58,635 | 16,383 | 0,606 | 0,232 | 0,021 | 1,434 | 2,893 | 0,022 | 0,173 |
| 28 | 1,9647 | 0,009 | 234,823 | 64,646 | 46,815 | 20,870 | 0,962 | 0,800 | 0,022 | 1,904 | 3,595 | 0,036 | 0,270 |
| 29 | 0,4993 | 1,904E-4 | 269,140 | 71,506 | 40,936 | 10,922 | 0,137 | 0,035 | 0,019 | 0,229 | 0,441 | 6,57010-5 | 0,001 |
| 30 | 1,3354 | 0,005 | 258,185 | 51,667 | 57,711 | 15,345 | 0,488 | 0,164 | 0,021 | 1,227 | 2,444 | 0,013 | 0,103 |
| 31 | 0,392 | 2,993E-4 | 265,071 | 63,898 | 46,150 | 9,176 | 0,275 | 0,077 | 0,020 | 0,284 | 0,551 | 1,11510-4 | 0,001 |
| 32 | 1,7888 | 0,009 | 251,227 | 60,651 | 49,602 | 19,033 | 0,671 | 0,281 | 0,021 | 1,757 | 3,274 | 0,026 | 0,195 |
| 33 | 1,8846 | 0,002 | 272,081 | 66,157 | 43,994 | 20,703 | 0,032 | 0,008 | 0,019 | 0,842 | 1,621 | 0,004 | 0,029 |
| 34 | 2,3678 | 0,008 | 270,653 | 59,590 | 48,979 | 22,116 | 0,083 | 0,021 | 0,019 | 1,782 | 3,326 | 0,030 | 0,223 |
| 35 | 1,7795 | 0,009 | 262,393 | 51,272 | 57,777 | 17,712 | 0,362 | 0,109 | 0,020 | 1,593 | 3,214 | 0,030 | 0,238 |
| 36 | 1,8805 | 0,003 | 270,101 | 68,486 | 42,662 | 20,874 | 0,103 | 0,026 | 0,019 | 0,935 | 1,823 | 0,006 | 0,042 |
| 37 | 2,1895 | 0,012 | 267,024 | 43,187 | 68,045 | 18,308 | 0,210 | 0,056 | 0,020 | 2,488 | 4,572 | 0,075 | 0,549 |
| 38 | 1,3889 | 0,004 | 262,082 | 67,139 | 44,144 | 17,573 | 0,371 | 0,112 | 0,020 | 0,952 | 1,900 | 0,006 | 0,048 |
| 39 | 2,1027 | 0,013 | 243,484 | 46,740 | 64,766 | 18,486 | 0,833 | 0,466 | 0,022 | 2,553 | 4,691 | 0,079 | 0,595 |
| 40 | 2,1353 | 0,011 | 249,108 | 64,644 | 46,638 | 21,390 | 0,720 | 0,325 | 0,021 | 1,989 | 3,706 | 0,038 | 0,285 |
| 41 | 0,6951 | 0,001 | 268,314 | 63,464 | 46,194 | 12,249 | 0,165 | 0,043 | 0,020 | 0,458 | 0,890 | 0,001 | 0,005 |
| 42 | 0,2434 | 1,166E-4 | 270,47 | 52,694 | 55,410 | 6,717 | 0,090 | 0,022 | 0,019 | 0,193 | 0,406 | 2,030E-5 | 2,599E-4 |
| 43 | 0,3238 | 2,854E-4 | 259,38 | 55,223 | 53,899 | 7,786 | 0,453 | 0,148 | 0,020 | 0,294 | 0,577 | 1,053E-4 | 0,001 |
| 44 | 0,584 | 0,001 | 259,30 | 71,623 | 41,562 | 11,679 | 0,456 | 0,149 | 0,020 | 0,385 | 0,738 | 3,363E-4 | 0,003 |

| Caso | d _o (mm) | Q _m (kg/s) | T _s (K) | v (m/s) | D _m (µm) | θ (°) | Y _{prop} | X _{prop} | LIE | Extensão LIE (m) | Extensão ½ LIE (m) | Volume LIE (m ³) | Volume ½ LIE (m ³) |
|------|------------------------|--------------------------|-----------------------|------------|------------------------|----------|-------------------|-------------------|-------|------------------------|--------------------------|------------------------------------|--------------------------------------|
| 45 | 0,6495 | 3,740E-4 | 268,20 | 72,044 | 40,701 | 12,473 | 0,169 | 0,044 | 0,020 | 0,314 | 0,613 | 1,918E-4 | 0,001 |
| 46 | 1,6831 | 0,007 | 239,12 | 65,641 | 46,167 | 19,309 | 0,904 | 0,611 | 0,022 | 1,568 | 2,960 | 0,019 | 0,145 |
| 47 | 0,2582 | 1,976E-4 | 249,65 | 52,090 | 57,848 | 6,769 | 0,707 | 0,313 | 0,021 | 0,254 | 0,511 | 5,950E-5 | 0,001 |
| 48 | 1,4002 | 0,003 | 272,41 | 34,811 | 83,555 | 13,410 | 0,019 | 0,005 | 0,019 | 1,237 | 2,399 | 0,012 | 0,092 |
| 49 | 1,839 | 0,009 | 236,50 | 60,049 | 50,442 | 19,499 | 0,941 | 0,720 | 0,022 | 1,930 | 3,595 | 0,036 | 0,268 |
| 50 | 0,4962 | 0,001 | 258,01 | 58,683 | 50,824 | 9,889 | 0,493 | 0,167 | 0,021 | 0,427 | 0,828 | 4,304E-4 | 0,003 |
| 51 | 0,7667 | 0,001 | 270,68 | 49,849 | 58,547 | 11,637 | 0,082 | 0,020 | 0,019 | 0,642 | 1,246 | 0,002 | 0,013 |
| 52 | 0,8678 | 0,001 | 269,73 | 69,328 | 42,174 | 14,239 | 0,116 | 0,029 | 0,019 | 0,426 | 0,819 | 4,822E-4 | 0,004 |
| 53 | 1,0181 | 0,003 | 238,71 | 62,065 | 48,826 | 14,668 | 0,911 | 0,627 | 0,022 | 0,875 | 1,744 | 0,005 | 0,036 |
| 54 | 2,0947 | 0,013 | 247,35 | 47,898 | 63,041 | 18,596 | 0,758 | 0,365 | 0,021 | 2,477 | 4,673 | 0,067 | 0,426 |
| 55 | 0,9097 | 0,002 | 272,14 | 36,322 | 80,122 | 11,016 | 0,030 | 0,007 | 0,019 | 0,918 | 1,778 | 0,004 | 0,036 |
| 56 | 2,0216 | 0,011 | 261,93 | 47,375 | 62,576 | 18,217 | 0,376 | 0,114 | 0,020 | 2,267 | 4,222 | 0,052 | 0,335 |
| 57 | 1,5661 | 0,007 | 254,78 | 44,326 | 67,585 | 15,499 | 0,582 | 0,217 | 0,021 | 1,580 | 3,144 | 0,028 | 0,226 |
| 58 | 1,5722 | 0,006 | 269,09 | 49,297 | 59,383 | 16,527 | 0,138 | 0,035 | 0,019 | 1,352 | 2,693 | 0,018 | 0,141 |
| 59 | 1,9449 | 0,008 | 254,09 | 68,378 | 43,850 | 20,877 | 0,600 | 0,229 | 0,021 | 1,629 | 3,037 | 0,021 | 0,160 |
| 60 | 2,0133 | 0,011 | 260,64 | 40,262 | 73,784 | 16,870 | 0,416 | 0,131 | 0,020 | 2,058 | 4,204 | 0,061 | 0,414 |
| 61 | 2,3087 | 0,016 | 254,80 | 40,153 | 74,606 | 17,991 | 0,582 | 0,217 | 0,021 | 2,879 | 5,501 | 0,103 | 0,660 |
| 62 | 0,5647 | 0,001 | 251,43 | 55,580 | 54,116 | 10,295 | 0,666 | 0,277 | 0,021 | 0,519 | 1,006 | 0,001 | 0,006 |
| 63 | 2,0614 | 0,006 | 270,46 | 60,584 | 48,193 | 20,774 | 0,090 | 0,022 | 0,019 | 1,413 | 2,747 | 0,018 | 0,133 |
| 64 | 0,685 | 0,001 | 270,64 | 40,348 | 72,340 | 9,997 | 0,083 | 0,021 | 0,019 | 0,682 | 1,304 | 0,002 | 0,014 |
| 65 | 0,2514 | 1,342E-4 | 264,30 | 62,211 | 47,465 | 7,258 | 0,301 | 0,086 | 0,020 | 0,189 | 0,387 | 2,440E-5 | 2,535E-04 |
| 66 | 0,5068 | 0,001 | 257,08 | 68,341 | 43,700 | 10,660 | 0,520 | 0,181 | 0,021 | 0,367 | 0,712 | 2,824E-4 | 0,002 |
| 67 | 0,5333 | 0,001 | 254,80 | 66,668 | 44,935 | 10,817 | 0,582 | 0,217 | 0,021 | 0,407 | 0,790 | 3,869E-4 | 0,003 |
| 68 | 0,5163 | 0,001 | 264,97 | 45,750 | 64,467 | 9,096 | 0,279 | 0,078 | 0,020 | 0,507 | 0,983 | 0,001 | 0,006 |

| Caso | d _o (mm) | Q _m (kg/s) | T _s (K) | v (m/s) | D _m (μm) | θ (°) | Y _{prop} | X _{prop} | LIE | Extensão LIE (m) | Extensão ½ LIE (m) | Volume LIE (m ³) | Volume ½ LIE (m ³) |
|------|------------------------|--------------------------|-----------------------|------------|------------------------|----------|-------------------|-------------------|-------|------------------------|--------------------------|------------------------------------|--------------------------------------|
| 69 | 2,3935 | 0,017 | 234,86 | 48,907 | 61,883 | 20,362 | 0,962 | 0,798 | 0,022 | 2,945 | 5,779 | 0,123 | 0,755 |
| 70 | 0,8329 | 0,002 | 237,96 | 41,393 | 73,204 | 11,084 | 0,921 | 0,657 | 0,022 | 0,934 | 1,858 | 0,005 | 0,042 |
| 71 | 2,3998 | 0,016 | 257,79 | 53,954 | 55,297 | 20,963 | 0,500 | 0,170 | 0,021 | 2,552 | 4,691 | 0,078 | 0,599 |
| 72 | 1,7485 | 0,002 | 233,14 | 49,632 | 60,895 | 17,567 | 0,982 | 0,891 | 0,022 | 0,968 | 1,910 | 0,007 | 0,050 |
| 73 | 2,2378 | 0,015 | 249,52 | 46,380 | 64,979 | 18,923 | 0,710 | 0,316 | 0,021 | 2,682 | 5,058 | 0,083 | 0,534 |
| 74 | 1,1099 | 0,001 | 267,16 | 71,112 | 41,314 | 16,191 | 0,205 | 0,055 | 0,020 | 0,590 | 1,165 | 0,001 | 0,011 |
| 75 | 0,7733 | 0,002 | 239,94 | 52,748 | 57,448 | 11,882 | 0,892 | 0,581 | 0,022 | 0,760 | 1,512 | 0,003 | 0,022 |
| 76 | 0,6778 | 0,001 | 256,85 | 51,520 | 57,987 | 10,912 | 0,526 | 0,184 | 0,021 | 0,640 | 1,240 | 0,002 | 0,012 |
| 77 | 1,5452 | 0,005 | 265,75 | 59,850 | 49,213 | 17,735 | 0,253 | 0,070 | 0,020 | 1,163 | 2,319 | 0,012 | 0,090 |
| 78 | 0,8054 | 0,001 | 233,06 | 36,425 | 82,968 | 10,352 | 0,982 | 0,896 | 0,022 | 0,845 | 1,682 | 0,004 | 0,031 |
| 79 | 0,9414 | 0,002 | 267,76 | 42,559 | 68,955 | 11,940 | 0,185 | 0,049 | 0,020 | 0,912 | 1,816 | 0,005 | 0,038 |
| 80 | 0,2266 | 1,213E-4 | 257,07 | 64,983 | 45,959 | 6,978 | 0,520 | 0,181 | 0,021 | 0,175 | 0,359 | 1,870E-5 | 1,993E-04 |
| 81 | 1,5995 | 0,003 | 233,53 | 59,719 | 50,628 | 18,231 | 0,977 | 0,869 | 0,022 | 1,012 | 2,021 | 0,008 | 0,058 |
| 82 | 2,4645 | 0,018 | 244,74 | 42,201 | 71,683 | 19,087 | 0,809 | 0,431 | 0,021 | 3,114 | 5,951 | 0,133 | 0,855 |
| 83 | 2,1743 | 0,011 | 251,40 | 68,176 | 44,119 | 22,056 | 0,667 | 0,278 | 0,021 | 1,870 | 3,486 | 0,032 | 0,242 |
| 84 | 0,2017 | 1,167E-4 | 256,30 | 53,052 | 56,354 | 6,029 | 0,541 | 0,193 | 0,021 | 0,188 | 0,400 | 1,990E-5 | 2,292E-04 |
| 85 | 1,7409 | 0,008 | 252,02 | 57,657 | 52,133 | 18,366 | 0,652 | 0,266 | 0,021 | 1,779 | 3,315 | 0,027 | 0,200 |
| 86 | 1,1 | 0,003 | 235,53 | 56,811 | 53,294 | 14,741 | 0,954 | 0,765 | 0,022 | 1,038 | 2,094 | 0,008 | 0,062 |
| 87 | 0,4872 | 0,001 | 258,25 | 41,141 | 72,470 | 8,367 | 0,487 | 0,164 | 0,021 | 0,525 | 1,004 | 0,001 | 0,006 |
| 88 | 1,5161 | 0,006 | 264,59 | 37,145 | 79,456 | 14,169 | 0,291 | 0,083 | 0,020 | 1,591 | 3,125 | 0,027 | 0,190 |
| 89 | 1,2522 | 0,004 | 258,63 | 54,526 | 54,649 | 15,220 | 0,476 | 0,158 | 0,021 | 1,106 | 2,202 | 0,010 | 0,074 |
| 90 | 1,4782 | 0,006 | 261,80 | 34,093 | 86,972 | 13,405 | 0,380 | 0,116 | 0,020 | 1,614 | 3,128 | 0,029 | 0,218 |
| 91 | 2,2757 | 0,015 | 257,53 | 53,819 | 55,456 | 20,389 | 0,507 | 0,174 | 0,021 | 2,420 | 4,449 | 0,067 | 0,510 |
| 92 | 0,6014 | 0,001 | 248,71 | 58,254 | 51,773 | 10,856 | 0,728 | 0,333 | 0,021 | 0,531 | 1,044 | 0,001 | 0,007 |

| Caso | d _o (mm) | Q _m (kg/s) | T _s (K) | v (m/s) | D _m (μm) | θ (°) | Y _{prop} | X _{prop} | LIE | Extensão LIE (m) | Extensão ½ LIE (m) | Volume LIE (m ³) | Volume ½ LIE (m ³) |
|------|------------------------|--------------------------|-----------------------|------------|------------------------|----------|-------------------|-------------------|-------|------------------------|--------------------------|------------------------------------|--------------------------------------|
| 93 | 1,2597 | 0,004 | 255,27 | 62,428 | 47,957 | 16,168 | 0,569 | 0,209 | 0,021 | 1,000 | 1,993 | 0,007 | 0,056 |
| 94 | 0,3405 | 3,207E-4 | 256,20 | 34,504 | 86,660 | 6,446 | 0,544 | 0,194 | 0,021 | 0,392 | 0,770 | 2,238E-4 | 0,002 |
| 95 | 1,1516 | 0,003 | 238,63 | 64,752 | 46,799 | 15,890 | 0,912 | 0,630 | 0,022 | 0,939 | 1,896 | 0,006 | 0,046 |
| 96 | 1,9401 | 0,011 | 261,84 | 40,538 | 73,142 | 16,630 | 0,379 | 0,115 | 0,020 | 1,983 | 3,998 | 0,054 | 0,362 |
| 97 | 0,4358 | 4,719E-4 | 260,41 | 60,088 | 49,456 | 9,377 | 0,423 | 0,134 | 0,020 | 0,360 | 0,699 | 2,470E-4 | 0,002 |
| 98 | 1,8079 | 0,008 | 256,32 | 60,914 | 49,079 | 19,170 | 0,541 | 0,192 | 0,021 | 1,729 | 3,222 | 0,025 | 0,183 |
| 99 | 0,8945 | 0,001 | 270,98 | 66,123 | 44,112 | 14,219 | 0,071 | 0,018 | 0,019 | 0,457 | 0,879 | 0,001 | 0,005 |
| 100 | 1,6338 | 0,007 | 264,29 | 35,408 | 83,396 | 14,383 | 0,301 | 0,086 | 0,020 | 1,738 | 3,503 | 0,036 | 0,240 |
| 101 | 0,6085 | 3,541E-4 | 269,49 | 68,713 | 42,571 | 11,874 | 0,124 | 0,032 | 0,019 | 0,315 | 0,606 | 1,769E-4 | 0,001 |
| 102 | 1,2644 | 0,003 | 269,37 | 51,803 | 56,481 | 15,159 | 0,129 | 0,033 | 0,019 | 1,031 | 2,054 | 0,008 | 0,061 |
| 103 | 0,2059 | 1,227E-4 | 236,78 | 52,757 | 57,419 | 6,159 | 0,937 | 0,707 | 0,022 | 0,216 | 0,436 | 3,580E-5 | 3,271E-04 |
| 104 | 0,7559 | 0,001 | 271,94 | 48,762 | 59,705 | 11,475 | 0,037 | 0,009 | 0,019 | 0,633 | 1,212 | 0,001 | 0,011 |
| 105 | 0,8155 | 0,002 | 239,84 | 58,141 | 52,120 | 12,739 | 0,894 | 0,585 | 0,022 | 0,740 | 1,473 | 0,003 | 0,021 |
| 106 | 1,4563 | 0,006 | 254,49 | 47,595 | 62,966 | 15,431 | 0,590 | 0,222 | 0,021 | 1,411 | 2,847 | 0,021 | 0,162 |
| 107 | 0,7421 | 0,001 | 268,85 | 50,708 | 57,758 | 11,492 | 0,147 | 0,038 | 0,019 | 0,638 | 1,238 | 0,002 | 0,012 |
| 108 | 1,0709 | 0,003 | 255,48 | 49,686 | 60,239 | 13,491 | 0,564 | 0,206 | 0,021 | 1,024 | 2,039 | 0,007 | 0,055 |
| 109 | 1,9565 | 0,010 | 251,27 | 62,026 | 48,501 | 20,098 | 0,670 | 0,280 | 0,021 | 1,871 | 3,487 | 0,031 | 0,237 |
| 110 | 1,2394 | 0,002 | 270,17 | 63,328 | 46,132 | 16,404 | 0,100 | 0,025 | 0,019 | 0,744 | 1,466 | 0,003 | 0,022 |
| 111 | 0,3107 | 9,640E-5 | 233,69 | 73,251 | 41,281 | 8,772 | 0,975 | 0,860 | 0,022 | 0,174 | 0,339 | 2,690E-5 | 2,078E-04 |
| 112 | 1,1673 | 0,003 | 250,14 | 71,295 | 42,245 | 16,473 | 0,696 | 0,303 | 0,021 | 0,811 | 1,597 | 0,004 | 0,028 |
| 113 | 1,415 | 0,006 | 256,16 | 49,833 | 60,006 | 15,531 | 0,545 | 0,195 | 0,021 | 1,335 | 2,659 | 0,017 | 0,136 |
| 114 | 2,1441 | 0,014 | 236,65 | 41,892 | 72,309 | 17,915 | 0,939 | 0,713 | 0,022 | 2,819 | 5,457 | 0,104 | 0,640 |
| 115 | 0,9289 | 0,001 | 266,39 | 71,051 | 41,406 | 14,789 | 0,231 | 0,063 | 0,020 | 0,521 | 1,015 | 0,001 | 0,007 |

| Caso | d _o (mm) | Q _m (kg/s) | T _s (K) | v (m/s) | D _m (μm) | θ (°) | Y _{prop} | X _{prop} | LIE | Extensão LIE (m) | Extensão ½ LIE (m) | Volume LIE (m ³) | Volume ½ LIE (m ³) |
|------|------------------------|--------------------------|-----------------------|------------|------------------------|----------|-------------------|-------------------|-------|------------------------|--------------------------|------------------------------------|--------------------------------------|
| 116 | 2,1254 | 0,013 | 238,84 | 47,357 | 63,991 | 18,798 | 0,908 | 0,622 | 0,022 | 2,615 | 4,998 | 0,081 | 0,496 |
| 117 | 1,5815 | 0,006 | 262,70 | 57,601 | 51,402 | 17,578 | 0,352 | 0,105 | 0,020 | 1,290 | 2,570 | 0,016 | 0,122 |
| 118 | 0,2985 | 1,716E-4 | 234,81 | 71,236 | 42,484 | 8,480 | 0,962 | 0,801 | 0,022 | 0,225 | 0,442 | 5,870E-5 | 4,364E-04 |
| 119 | 0,8086 | 0,002 | 263,77 | 37,471 | 78,874 | 10,379 | 0,318 | 0,092 | 0,020 | 0,871 | 1,689 | 0,004 | 0,031 |
| 120 | 1,6071 | 0,004 | 233,41 | 46,068 | 65,623 | 16,278 | 0,979 | 0,876 | 0,022 | 1,382 | 2,753 | 0,020 | 0,152 |
| 121 | 1,4257 | 0,006 | 255,40 | 53,241 | 56,223 | 16,050 | 0,566 | 0,207 | 0,021 | 1,293 | 2,575 | 0,016 | 0,123 |
| 122 | 0,7137 | 0,001 | 253,15 | 59,340 | 50,587 | 11,905 | 0,624 | 0,245 | 0,021 | 0,614 | 1,191 | 0,001 | 0,011 |
| 123 | 2,0402 | 0,012 | 240,21 | 43,233 | 70,089 | 17,642 | 0,888 | 0,571 | 0,022 | 2,578 | 4,992 | 0,078 | 0,489 |
| 124 | 1,6733 | 0,004 | 264,87 | 72,683 | 40,586 | 19,989 | 0,282 | 0,080 | 0,020 | 0,939 | 1,852 | 0,006 | 0,044 |
| 125 | 0,5946 | 0,001 | 270,93 | 53,471 | 54,555 | 10,578 | 0,073 | 0,018 | 0,019 | 0,466 | 0,892 | 0,001 | 0,004 |
| 126 | 1,9308 | 0,002 | 271,68 | 66,705 | 43,668 | 21,004 | 0,046 | 0,011 | 0,019 | 0,886 | 1,705 | 0,005 | 0,034 |
| 127 | 1,1965 | 0,004 | 240,32 | 56,314 | 53,808 | 15,206 | 0,886 | 0,568 | 0,022 | 1,100 | 2,219 | 0,010 | 0,076 |
| 128 | 1,3644 | 0,005 | 258,12 | 49,147 | 60,676 | 15,169 | 0,490 | 0,165 | 0,021 | 1,288 | 2,564 | 0,015 | 0,122 |
| 129 | 1,9178 | 0,010 | 259,79 | 53,400 | 55,703 | 18,678 | 0,441 | 0,142 | 0,020 | 2,013 | 3,749 | 0,039 | 0,293 |
| 130 | 1,1879 | 0,003 | 256,07 | 64,716 | 46,212 | 15,945 | 0,547 | 0,196 | 0,021 | 0,906 | 1,807 | 0,005 | 0,041 |
| 131 | 0,2217 | 1,002E-4 | 238,77 | 70,863 | 42,764 | 7,243 | 0,910 | 0,625 | 0,022 | 0,167 | 0,333 | 1,910E-5 | 1,680E-04 |
| 132 | 0,3837 | 2,734E-4 | 261,43 | 69,477 | 42,704 | 9,363 | 0,392 | 0,120 | 0,020 | 0,260 | 0,504 | 8,680E-5 | 0,001 |
| 133 | 1,616 | 0,008 | 246,42 | 39,474 | 76,550 | 14,972 | 0,777 | 0,387 | 0,021 | 1,742 | 3,465 | 0,038 | 0,300 |
| 134 | 1,322 | 0,004 | 268,87 | 38,052 | 76,965 | 13,472 | 0,146 | 0,038 | 0,019 | 1,333 | 2,619 | 0,016 | 0,130 |
| 135 | 2,3825 | 0,010 | 263,24 | 69,555 | 42,530 | 23,383 | 0,335 | 0,098 | 0,020 | 1,746 | 3,260 | 0,027 | 0,207 |
| 136 | 0,4344 | 2,949E-4 | 268,84 | 62,839 | 46,608 | 9,653 | 0,147 | 0,038 | 0,019 | 0,290 | 0,564 | 1,183E-4 | 0,001 |
| 137 | 1,1445 | 0,003 | 263,28 | 34,859 | 84,856 | 11,936 | 0,334 | 0,098 | 0,020 | 1,234 | 2,390 | 0,013 | 0,096 |
| 138 | 1,5538 | 0,006 | 260,38 | 55,384 | 53,659 | 17,091 | 0,424 | 0,134 | 0,020 | 1,336 | 2,662 | 0,018 | 0,137 |

| Caso | d _o (mm) | Q _m (kg/s) | T _s (K) | v (m/s) | D _m (μm) | θ (°) | Y _{prop} | X _{prop} | LIE | Extensão LIE (m) | Extensão ½ LIE (m) | Volume LIE (m ³) | Volume ½ LIE (m ³) |
|------|------------------------|--------------------------|-----------------------|------------|------------------------|----------|-------------------|-------------------|-------|------------------------|--------------------------|------------------------------------|--------------------------------------|
| 139 | 0,4697 | 3,109E-4 | 266,04 | 69,712 | 42,228 | 10,430 | 0,243 | 0,067 | 0,020 | 0,282 | 0,541 | 1,217E-4 | 0,001 |
| 140 | 2,3299 | 0,013 | 266,60 | 52,012 | 56,543 | 20,511 | 0,224 | 0,061 | 0,020 | 2,350 | 4,378 | 0,059 | 0,382 |
| 141 | 1,7342 | 0,009 | 246,24 | 47,460 | 63,676 | 16,864 | 0,780 | 0,392 | 0,021 | 1,726 | 3,481 | 0,038 | 0,308 |
| 142 | 2,3398 | 0,016 | 239,32 | 44,497 | 68,104 | 19,164 | 0,901 | 0,604 | 0,022 | 2,957 | 5,724 | 0,116 | 0,727 |
| 143 | 1,7197 | 0,008 | 265,73 | 42,049 | 70,049 | 15,997 | 0,253 | 0,070 | 0,020 | 1,689 | 3,318 | 0,034 | 0,243 |
| 144 | 0,212 | 1,302E-4 | 235,82 | 52,033 | 58,196 | 6,221 | 0,950 | 0,751 | 0,022 | 0,225 | 0,455 | 4,290E-5 | 3,725E-04 |
| 145 | 0,9911 | 0,003 | 243,92 | 60,447 | 50,068 | 14,215 | 0,825 | 0,454 | 0,022 | 0,852 | 1,698 | 0,004 | 0,033 |
| 146 | 0,4742 | 0,001 | 252,03 | 45,985 | 65,364 | 8,671 | 0,652 | 0,266 | 0,021 | 0,491 | 0,952 | 0,001 | 0,005 |
| 147 | 1,7078 | 0,004 | 233,60 | 62,214 | 48,601 | 19,177 | 0,976 | 0,865 | 0,022 | 1,095 | 2,216 | 0,010 | 0,075 |
| 148 | 0,3434 | 2,701E-4 | 254,45 | 67,388 | 44,475 | 8,719 | 0,591 | 0,223 | 0,021 | 0,262 | 0,509 | 8,380E-5 | 0,001 |
| 149 | 1,8282 | 0,009 | 264,98 | 37,786 | 78,054 | 15,691 | 0,278 | 0,078 | 0,020 | 1,894 | 3,818 | 0,046 | 0,310 |
| 150 | 1,4223 | 0,005 | 240,15 | 65,559 | 46,221 | 17,715 | 0,889 | 0,574 | 0,022 | 1,144 | 2,281 | 0,011 | 0,083 |
| 151 | 0,933 | 0,002 | 239,31 | 63,028 | 48,081 | 14,123 | 0,902 | 0,604 | 0,022 | 0,781 | 1,577 | 0,003 | 0,026 |
| 152 | 1,4648 | 0,005 | 263,31 | 54,544 | 54,227 | 16,531 | 0,333 | 0,097 | 0,020 | 1,243 | 2,476 | 0,014 | 0,110 |
| 153 | 1,9121 | 0,005 | 264,29 | 71,250 | 41,443 | 21,181 | 0,301 | 0,086 | 0,020 | 1,210 | 2,353 | 0,011 | 0,082 |
| 154 | 2,1205 | 0,013 | 237,36 | 38,003 | 79,725 | 17,020 | 0,930 | 0,682 | 0,022 | 2,901 | 5,542 | 0,105 | 0,644 |
| 155 | 0,9814 | 0,002 | 257,28 | 60,472 | 49,372 | 14,085 | 0,514 | 0,178 | 0,021 | 0,800 | 1,595 | 0,004 | 0,027 |
| 156 | 0,9676 | 0,002 | 270,90 | 43,900 | 66,453 | 12,354 | 0,074 | 0,018 | 0,019 | 0,878 | 1,747 | 0,004 | 0,035 |
| 157 | 1,0691 | 0,003 | 238,69 | 34,705 | 87,318 | 11,568 | 0,911 | 0,628 | 0,022 | 1,248 | 2,449 | 0,014 | 0,103 |
| 158 | 1,798 | 0,008 | 258,91 | 59,402 | 50,142 | 18,933 | 0,467 | 0,154 | 0,020 | 1,743 | 3,205 | 0,025 | 0,184 |
| 159 | 2,2113 | 0,008 | 265,50 | 68,097 | 43,272 | 22,396 | 0,261 | 0,073 | 0,020 | 1,599 | 2,985 | 0,021 | 0,155 |
| 160 | 1,9755 | 0,010 | 262,39 | 57,884 | 51,178 | 19,681 | 0,362 | 0,109 | 0,020 | 1,889 | 3,521 | 0,033 | 0,244 |
| 161 | 2,2589 | 0,010 | 262,34 | 67,955 | 43,596 | 22,530 | 0,363 | 0,109 | 0,020 | 1,770 | 3,302 | 0,027 | 0,205 |
| 162 | 2,2318 | 0,015 | 239,24 | 42,642 | 71,067 | 18,360 | 0,903 | 0,607 | 0,022 | 2,858 | 5,533 | 0,105 | 0,663 |

| Caso | d _o (mm) | Q _m (kg/s) | T _s (K) | v (m/s) | D _m (μm) | θ (°) | Y _{prop} | X _{prop} | LIE | Extensão LIE (m) | Extensão ½ LIE (m) | Volume LIE (m ³) | Volume ½ LIE (m ³) |
|------|------------------------|--------------------------|-----------------------|------------|------------------------|----------|-------------------|-------------------|-------|------------------------|--------------------------|------------------------------------|--------------------------------------|
| 163 | 0,6604 | 4,813E-4 | 271,89 | 61,473 | 47,365 | 11,873 | 0,039 | 0,009 | 0,019 | 0,391 | 0,741 | 3,133E-4 | 0,002 |
| 164 | 2,1771 | 0,014 | 241,80 | 41,114 | 73,676 | 17,779 | 0,862 | 0,518 | 0,022 | 2,788 | 5,397 | 0,098 | 0,629 |
| 165 | 2,4596 | 0,018 | 236,77 | 47,551 | 63,705 | 20,320 | 0,938 | 0,708 | 0,022 | 3,067 | 5,939 | 0,131 | 0,813 |
| 166 | 2,01 | 0,011 | 261,07 | 33,374 | 88,951 | 15,467 | 0,403 | 0,125 | 0,020 | 2,195 | 4,484 | 0,071 | 0,478 |
| 167 | 2,2497 | 0,013 | 248,40 | 64,165 | 47,017 | 21,895 | 0,735 | 0,340 | 0,021 | 2,123 | 3,957 | 0,046 | 0,345 |
| 168 | 0,3713 | 1,417E-4 | 267,36 | 72,001 | 40,789 | 9,415 | 0,198 | 0,053 | 0,020 | 0,190 | 0,374 | 3,330E-5 | 2,891E-04 |
| 169 | 1,7627 | 0,008 | 250,46 | 65,658 | 45,857 | 19,552 | 0,689 | 0,297 | 0,021 | 1,578 | 2,980 | 0,019 | 0,144 |
| 170 | 1,03 | 0,001 | 270,51 | 65,951 | 44,268 | 15,224 | 0,088 | 0,022 | 0,019 | 0,548 | 1,067 | 0,001 | 0,008 |
| 171 | 1,7541 | 0,004 | 233,59 | 58,017 | 52,116 | 18,849 | 0,977 | 0,865 | 0,022 | 1,252 | 2,497 | 0,015 | 0,113 |
| 172 | 2,2645 | 0,015 | 247,46 | 46,830 | 64,473 | 19,139 | 0,755 | 0,362 | 0,021 | 2,714 | 5,119 | 0,087 | 0,558 |
| 173 | 1,1387 | 0,004 | 258,50 | 44,553 | 66,895 | 13,264 | 0,479 | 0,160 | 0,021 | 1,133 | 2,256 | 0,010 | 0,078 |
| 174 | 2,0001 | 0,008 | 272,06 | 46,781 | 62,217 | 18,328 | 0,032 | 0,008 | 0,019 | 1,675 | 3,337 | 0,035 | 0,278 |
| 175 | 0,6435 | 0,001 | 241,59 | 72,502 | 41,783 | 12,410 | 0,865 | 0,525 | 0,022 | 0,447 | 0,880 | 0,001 | 0,004 |
| 176 | 1,4856 | 0,007 | 247,55 | 43,615 | 69,220 | 15,011 | 0,753 | 0,360 | 0,021 | 1,539 | 3,062 | 0,026 | 0,208 |
| 177 | 1,6904 | 0,008 | 239,17 | 56,900 | 53,259 | 18,185 | 0,904 | 0,610 | 0,022 | 1,822 | 3,438 | 0,030 | 0,222 |
| 178 | 1,9234 | 0,011 | 253,71 | 42,546 | 70,507 | 16,858 | 0,610 | 0,235 | 0,021 | 1,966 | 4,017 | 0,053 | 0,359 |
| 179 | 0,9533 | 0,001 | 272,71 | 53,655 | 54,177 | 13,473 | 0,009 | 0,002 | 0,019 | 0,514 | 1,014 | 3,587E-4 | 0,005 |
| 180 | 0,8274 | 0,002 | 234,14 | 40,051 | 75,529 | 10,944 | 0,970 | 0,835 | 0,022 | 0,940 | 1,895 | 0,006 | 0,044 |
| 181 | 2,3579 | 0,016 | 258,67 | 51,230 | 58,162 | 20,319 | 0,474 | 0,157 | 0,021 | 2,575 | 4,733 | 0,081 | 0,620 |
| 182 | 1,6637 | 0,007 | 246,19 | 67,159 | 45,001 | 19,228 | 0,781 | 0,393 | 0,021 | 1,469 | 2,739 | 0,016 | 0,117 |
| 183 | 0,4269 | 2,088E-4 | 268,94 | 67,751 | 43,221 | 9,877 | 0,144 | 0,037 | 0,019 | 0,236 | 0,466 | 6,640E-5 | 0,001 |
| 184 | 1,6999 | 0,006 | 242,37 | 70,358 | 43,045 | 19,899 | 0,852 | 0,500 | 0,022 | 1,423 | 2,655 | 0,014 | 0,106 |
| 185 | 0,703 | 0,001 | 235,86 | 57,547 | 52,621 | 11,845 | 0,949 | 0,749 | 0,022 | 0,655 | 1,321 | 0,002 | 0,015 |
| 186 | 2,0296 | 0,010 | 243,98 | 67,953 | 44,537 | 21,387 | 0,824 | 0,452 | 0,022 | 1,792 | 3,342 | 0,028 | 0,212 |

| Caso | d _o (mm) | Q _m (kg/s) | T _s (K) | v (m/s) | D _m (μm) | θ (°) | Y _{prop} | X _{prop} | LIE | Extensão LIE (m) | Extensão ½ LIE (m) | Volume LIE (m ³) | Volume ½ LIE (m ³) |
|------|------------------------|--------------------------|-----------------------|------------|------------------------|----------|-------------------|-------------------|-------|------------------------|--------------------------|------------------------------------|--------------------------------------|
| 187 | 2,2252 | 0,012 | 244,09 | 64,492 | 46,924 | 21,89 | 0,822 | 0,449 | 0,02 | 2,100 | 3,914 | 0,046 | 0,343 |
| 188 | 1,0475 | 0,003 | 255,99 | 35,219 | 84,925 | 11,44 | 0,550 | 0,198 | 0,01 | 1,159 | 2,246 | 0,010 | 0,079 |
| 189 | 0,5476 | 0,001 | 242,69 | 40,036 | 75,637 | 8,801 | 0,847 | 0,490 | 0,02 | 0,614 | 1,206 | 0,001 | 0,011 |
| 190 | 1,9972 | 0,012 | 249,83 | 43,911 | 68,611 | 17,49 | 0,704 | 0,310 | 0,021 | 2,425 | 4,574 | 0,063 | 0,399 |
| 191 | 1,0074 | 0,003 | 248,83 | 44,749 | 67,391 | 12,497 | 0,726 | 0,331 | 0,021 | 1,030 | 2,049 | 0,007 | 0,059 |
| 192 | 0,7974 | 0,002 | 259,10 | 40,783 | 73,014 | 10,667 | 0,462 | 0,151 | 0,020 | 0,837 | 1,643 | 0,004 | 0,028 |
| 193 | 0,7262 | 0,002 | 243,23 | 44,700 | 67,729 | 10,650 | 0,837 | 0,474 | 0,022 | 0,772 | 1,517 | 0,003 | 0,022 |
| 194 | 0,3755 | 3,536E-4 | 267,47 | 46,087 | 63,710 | 7,813 | 0,194 | 0,052 | 0,020 | 0,364 | 0,706 | 1,966E-4 | 0,002 |
| 195 | 1,2064 | 0,004 | 251,37 | 49,677 | 60,551 | 14,319 | 0,668 | 0,278 | 0,021 | 1,154 | 2,327 | 0,011 | 0,087 |
| 196 | 1,9691 | 0,012 | 251,65 | 47,923 | 62,747 | 18,001 | 0,661 | 0,273 | 0,021 | 2,298 | 4,278 | 0,053 | 0,342 |
| 197 | 1,446 | 0,006 | 252,38 | 52,631 | 57,087 | 16,081 | 0,643 | 0,259 | 0,021 | 1,329 | 2,681 | 0,017 | 0,135 |
| 198 | 1,1596 | 0,004 | 244,45 | 48,339 | 62,592 | 13,924 | 0,815 | 0,439 | 0,022 | 1,154 | 2,328 | 0,011 | 0,085 |
| 199 | 0,3644 | 3,026E-4 | 235,17 | 66,485 | 45,530 | 9,091 | 0,958 | 0,782 | 0,022 | 0,301 | 0,592 | 1,540E-4 | 0,001 |
| 200 | 0,7338 | 0,001 | 233,69 | 50,998 | 59,293 | 11,510 | 0,975 | 0,860 | 0,022 | 0,631 | 1,257 | 0,002 | 0,013 |
| 201 | 1,5264 | 0,007 | 234,73 | 39,066 | 77,466 | 14,682 | 0,963 | 0,805 | 0,022 | 1,781 | 3,543 | 0,043 | 0,330 |
| 202 | 1,2171 | 0,004 | 250,88 | 61,300 | 49,096 | 15,774 | 0,679 | 0,288 | 0,021 | 1,006 | 2,004 | 0,007 | 0,056 |
| 203 | 2,3191 | 0,016 | 234,55 | 50,629 | 59,766 | 20,367 | 0,966 | 0,814 | 0,022 | 2,816 | 5,454 | 0,106 | 0,650 |
| 204 | 0,314 | 2,236E-4 | 268,80 | 50,477 | 58,027 | 7,460 | 0,149 | 0,038 | 0,019 | 0,277 | 0,552 | 7,820E-5 | 0,001 |
| 205 | 1,2994 | 0,005 | 258,36 | 35,856 | 83,137 | 12,831 | 0,483 | 0,162 | 0,021 | 1,400 | 2,750 | 0,019 | 0,148 |
| 206 | 1,5028 | 0,001 | 272,03 | 68,965 | 42,208 | 18,804 | 0,034 | 0,008 | 0,019 | 0,519 | 1,003 | 0,001 | 0,007 |
| 207 | 0,5386 | 0,001 | 253,08 | 54,274 | 55,313 | 9,947 | 0,626 | 0,246 | 0,021 | 0,502 | 0,973 | 0,001 | 0,006 |
| 208 | 1,524 | 0,007 | 240,93 | 36,884 | 82,146 | 14,166 | 0,876 | 0,546 | 0,022 | 1,732 | 3,445 | 0,036 | 0,236 |
| 209 | 2,2053 | 0,005 | 268,39 | 70,351 | 41,667 | 22,773 | 0,163 | 0,042 | 0,020 | 1,205 | 2,315 | 0,011 | 0,081 |
| 210 | 0,7092 | 0,001 | 256,86 | 46,575 | 64,141 | 10,671 | 0,526 | 0,184 | 0,021 | 0,706 | 1,386 | 0,002 | 0,017 |

| Caso | d _o (mm) | Q _m (kg/s) | T _s (K) | v (m/s) | D _m (μm) | θ (°) | Y _{prop} | X _{prop} | LIE | Extensão LIE (m) | Extensão ½ LIE (m) | Volume LIE (m ³) | Volume ½ LIE (m ³) |
|------|------------------------|--------------------------|-----------------------|------------|------------------------|----------|-------------------|-------------------|-------|------------------------|--------------------------|------------------------------------|--------------------------------------|
| 233 | 2,3699 | 0,014 | 267,70 | 39,050 | 75,161 | 18,214 | 0,187 | 0,049 | 0,020 | 2,840 | 5,357 | 0,096 | 0,602 |
| 234 | 1,4501 | 0,005 | 261,46 | 58,506 | 50,709 | 16,925 | 0,391 | 0,120 | 0,020 | 1,182 | 2,356 | 0,012 | 0,093 |
| 235 | 2,3457 | 0,012 | 267,39 | 57,081 | 51,448 | 21,465 | 0,197 | 0,052 | 0,020 | 2,127 | 3,965 | 0,045 | 0,295 |
| 236 | 0,4094 | 4,772E-4 | 241,65 | 36,294 | 83,466 | 7,282 | 0,865 | 0,523 | 0,022 | 0,484 | 0,950 | 0,001 | 0,005 |
| 237 | 2,497 | 0,005 | 268,57 | 72,966 | 40,160 | 24,594 | 0,157 | 0,041 | 0,020 | 1,177 | 2,265 | 0,010 | 0,077 |
| 238 | 0,4495 | 4,850E-5 | 232,96 | 45,597 | 66,271 | 8,574 | 0,984 | 0,902 | 0,022 | 0,155 | 0,338 | 1,860E-5 | 2,219E-4 |
| 239 | 0,974 | 0,001 | 272,59 | 48,492 | 59,960 | 13,015 | 0,013 | 0,003 | 0,019 | 0,743 | 1,387 | 0,002 | 0,016 |
| 240 | 2,0472 | 0,009 | 271,46 | 47,969 | 60,750 | 18,725 | 0,054 | 0,013 | 0,019 | 1,714 | 3,415 | 0,035 | 0,244 |
| 241 | 1,6451 | 0,008 | 238,09 | 35,390 | 85,624 | 14,491 | 0,919 | 0,652 | 0,022 | 1,920 | 3,972 | 0,049 | 0,315 |
| 242 | 1,3852 | 0,005 | 238,62 | 56,539 | 53,598 | 16,428 | 0,912 | 0,631 | 0,022 | 1,290 | 2,603 | 0,016 | 0,122 |
| 243 | 0,906 | 0,002 | 249,92 | 45,352 | 66,425 | 11,917 | 0,701 | 0,308 | 0,021 | 0,926 | 1,843 | 0,005 | 0,040 |
| 244 | 0,5249 | 0,001 | 242,39 | 52,982 | 57,161 | 9,780 | 0,852 | 0,499 | 0,022 | 0,516 | 0,999 | 0,001 | 0,006 |
| 245 | 0,8773 | 0,001 | 257,73 | 71,524 | 41,716 | 14,295 | 0,501 | 0,171 | 0,021 | 0,578 | 1,138 | 0,001 | 0,010 |
| 246 | 0,6348 | 0,001 | 253,68 | 70,763 | 42,394 | 12,099 | 0,611 | 0,236 | 0,021 | 0,441 | 0,868 | 0,001 | 0,004 |
| 247 | 0,9959 | 0,003 | 265,94 | 38,314 | 76,849 | 11,671 | 0,247 | 0,068 | 0,020 | 1,031 | 2,026 | 0,007 | 0,057 |
| 248 | 0,4652 | 0,001 | 256,92 | 59,805 | 49,948 | 9,650 | 0,524 | 0,183 | 0,021 | 0,395 | 0,766 | 3,304E-4 | 0,003 |
| 249 | 2,1453 | 0,009 | 271,23 | 50,151 | 58,133 | 19,543 | 0,062 | 0,015 | 0,019 | 2,025 | 3,724 | 0,041 | 0,305 |
| 250 | 2,4709 | 0,006 | 271,34 | 64,829 | 44,961 | 23,458 | 0,058 | 0,014 | 0,019 | 1,405 | 2,663 | 0,016 | 0,119 |
| 251 | 0,7479 | 0,001 | 261,95 | 55,877 | 53,053 | 11,920 | 0,375 | 0,114 | 0,020 | 0,643 | 1,264 | 0,002 | 0,013 |
| 233 | 2,3699 | 0,014 | 267,70 | 39,050 | 75,161 | 18,214 | 0,187 | 0,049 | 0,020 | 2,840 | 5,357 | 0,096 | 0,602 |
| 234 | 1,4501 | 0,005 | 261,46 | 58,506 | 50,709 | 16,925 | 0,391 | 0,120 | 0,020 | 1,182 | 2,356 | 0,012 | 0,093 |
| 235 | 2,3457 | 0,012 | 267,39 | 57,081 | 51,448 | 21,465 | 0,197 | 0,052 | 0,020 | 2,127 | 3,965 | 0,045 | 0,295 |
| 236 | 0,4094 | 4,772E-5 | 241,65 | 36,294 | 83,466 | 7,282 | 0,865 | 0,523 | 0,022 | 0,484 | 0,950 | 0,001 | 0,005 |
| 237 | 2,497 | 0,005 | 268,57 | 72,966 | 40,160 | 24,594 | 0,157 | 0,041 | 0,020 | 1,177 | 2,265 | 0,010 | 0,077 |

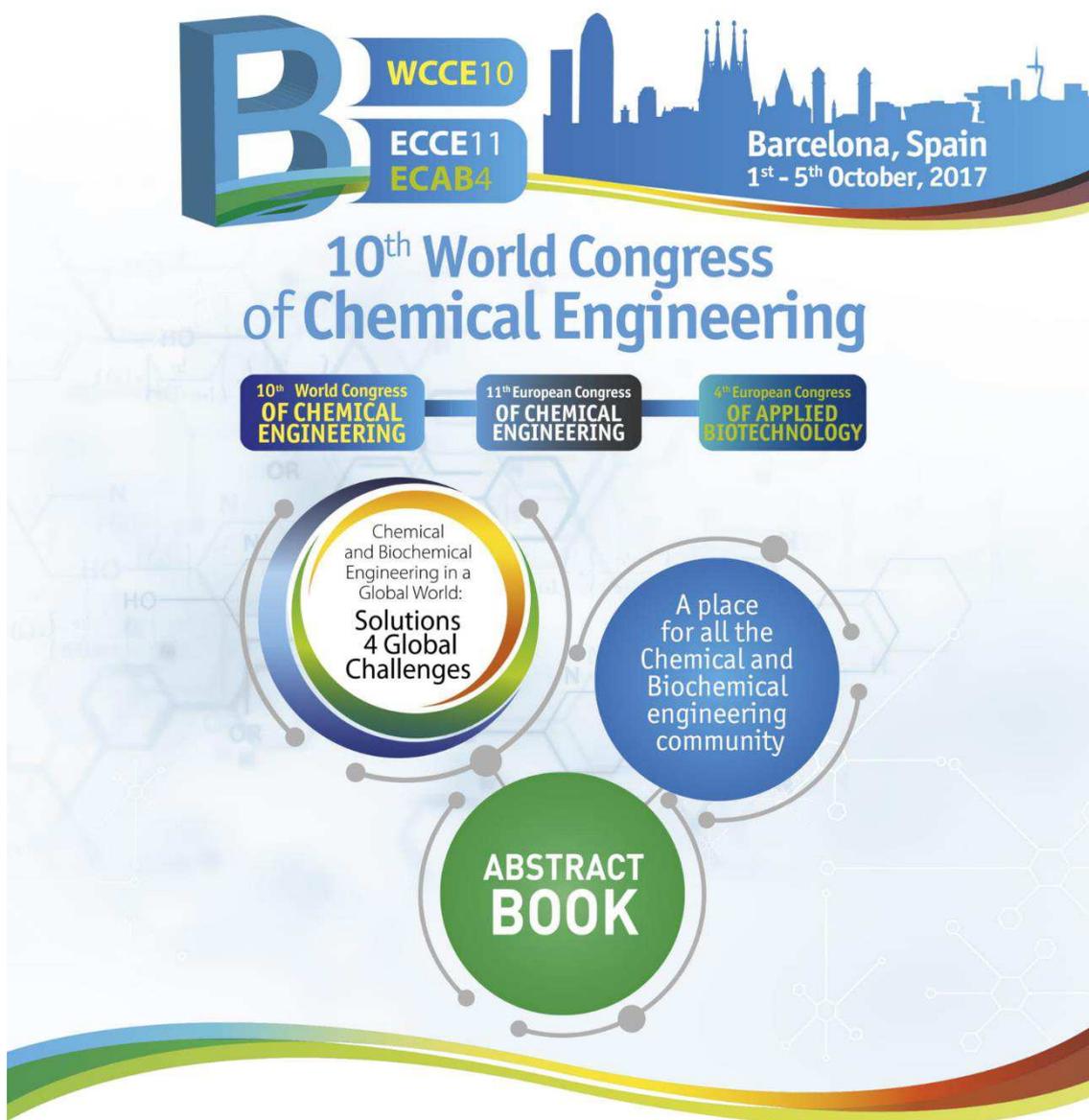
| Caso | d _o (mm) | Q _m (kg/s) | T _s (K) | v (m/s) | D _m (μm) | θ (°) | Y _{prop} | X _{prop} | LIE | Extensão LIE (m) | Extensão ½ LIE (m) | Volume LIE (m ³) | Volume ½ LIE (m ³) |
|------|------------------------|--------------------------|-----------------------|------------|------------------------|----------|-------------------|-------------------|-------|------------------------|--------------------------|------------------------------------|--------------------------------------|
| 238 | 0,4495 | 4,850E-5 | 232,96 | 45,597 | 66,271 | 8,574 | 0,984 | 0,902 | 0,022 | 0,155 | 0,338 | 1,860E-5 | 2,219E-04 |
| 239 | 0,974 | 0,001 | 272,59 | 48,492 | 59,960 | 13,015 | 0,013 | 0,003 | 0,019 | 0,743 | 1,387 | 0,002 | 0,016 |
| 240 | 2,0472 | 0,009 | 271,46 | 47,969 | 60,750 | 18,725 | 0,054 | 0,013 | 0,019 | 1,714 | 3,415 | 0,035 | 0,244 |
| 241 | 1,6451 | 0,008 | 238,09 | 35,390 | 85,624 | 14,491 | 0,919 | 0,652 | 0,022 | 1,920 | 3,972 | 0,049 | 0,315 |
| 242 | 1,3852 | 0,005 | 238,62 | 56,539 | 53,598 | 16,428 | 0,912 | 0,631 | 0,022 | 1,290 | 2,603 | 0,016 | 0,122 |
| 243 | 0,906 | 0,002 | 249,92 | 45,352 | 66,425 | 11,917 | 0,701 | 0,308 | 0,021 | 0,926 | 1,843 | 0,005 | 0,040 |
| 244 | 0,5249 | 0,001 | 242,39 | 52,982 | 57,161 | 9,780 | 0,852 | 0,499 | 0,022 | 0,516 | 0,999 | 0,001 | 0,006 |
| 245 | 0,8773 | 0,001 | 257,73 | 71,524 | 41,716 | 14,295 | 0,501 | 0,171 | 0,021 | 0,578 | 1,138 | 0,001 | 0,010 |
| 246 | 0,6348 | 0,001 | 253,68 | 70,763 | 42,394 | 12,099 | 0,611 | 0,236 | 0,021 | 0,441 | 0,868 | 0,001 | 0,004 |
| 247 | 0,9959 | 0,003 | 265,94 | 38,314 | 76,849 | 11,671 | 0,247 | 0,068 | 0,020 | 1,031 | 2,026 | 0,007 | 0,057 |
| 248 | 0,4652 | 0,001 | 256,92 | 59,805 | 49,948 | 9,650 | 0,524 | 0,183 | 0,021 | 0,395 | 0,766 | 3,304E-4 | 0,003 |
| 249 | 2,1453 | 0,009 | 271,23 | 50,151 | 58,133 | 19,543 | 0,062 | 0,015 | 0,019 | 2,025 | 3,724 | 0,041 | 0,305 |
| 250 | 2,4709 | 0,006 | 271,34 | 64,829 | 44,961 | 23,458 | 0,058 | 0,014 | 0,019 | 1,405 | 2,663 | 0,016 | 0,119 |
| 251 | 0,7479 | 0,001 | 261,95 | 55,877 | 53,053 | 11,920 | 0,375 | 0,114 | 0,020 | 0,643 | 1,264 | 0,002 | 0,013 |
| 252 | 1,9015 | 0,011 | 246,12 | 45,804 | 65,985 | 17,380 | 0,783 | 0,395 | 0,021 | 2,309 | 4,355 | 0,053 | 0,339 |
| 253 | 0,2845 | 2,285E-4 | 237,01 | 55,611 | 54,477 | 7,409 | 0,934 | 0,697 | 0,022 | 0,283 | 0,564 | 1,052E-4 | 0,001 |
| 254 | 1,6657 | 0,006 | 248,56 | 68,864 | 43,803 | 19,411 | 0,732 | 0,337 | 0,021 | 1,413 | 2,636 | 0,014 | 0,103 |
| 255 | 1,8125 | 0,008 | 247,79 | 65,249 | 46,260 | 19,801 | 0,748 | 0,354 | 0,021 | 1,666 | 3,105 | 0,022 | 0,168 |
| 256 | 0,2767 | 2,279E-4 | 243,10 | 41,942 | 72,187 | 6,387 | 0,839 | 0,478 | 0,022 | 0,314 | 0,625 | 1,155E-4 | 0,001 |
| 257 | 0,1914 | 1,073E-4 | 238,67 | 40,319 | 75,159 | 5,245 | 0,911 | 0,629 | 0,022 | 0,226 | 0,468 | 3,290E-5 | 3,408E-04 |
| 258 | 0,5751 | 0,001 | 245,68 | 51,046 | 59,226 | 10,037 | 0,791 | 0,406 | 0,021 | 0,565 | 1,110 | 0,001 | 0,009 |
| 259 | 2,2171 | 0,010 | 257,30 | 68,864 | 43,355 | 22,368 | 0,514 | 0,177 | 0,021 | 1,808 | 3,372 | 0,029 | 0,221 |
| 260 | 0,8391 | 0,001 | 263,29 | 63,740 | 46,406 | 13,381 | 0,333 | 0,098 | 0,020 | 0,615 | 1,210 | 0,002 | 0,012 |
| 261 | 1,4973 | 0,006 | 234,45 | 62,612 | 48,324 | 17,980 | 0,967 | 0,819 | 0,022 | 1,305 | 2,634 | 0,017 | 0,127 |

| Caso | d_o (mm) | Q_m (kg/s) | T_s (K) | v (m/s) | D_m (µm) | θ (°) | Y_{prop} | X_{prop} | LIE | Extensão LIE (m) | Extensão ½ LIE (m) | Volume LIE (m³) | Volume ½ LIE (m³) |
|-------------|------------------------------|--------------------------------|-----------------------------|-------------------|------------------------------|-----------------|-------------------------|-------------------------|------------|---------------------------------|-----------------------------------|---|---|
| 262 | 1,491 | 0,006 | 263,73 | 39,469 | 74,885 | 14,433 | 0,319 | 0,093 | 0,020 | 1,524 | 3,033 | 0,025 | 0,199 |
| 263 | 1,5935 | 0,007 | 251,93 | 36,937 | 81,385 | 14,386 | 0,654 | 0,268 | 0,021 | 1,740 | 3,462 | 0,035 | 0,240 |
| 264 | 1,0415 | 0,002 | 245,82 | 69,340 | 43,597 | 15,425 | 0,789 | 0,402 | 0,021 | 0,763 | 1,522 | 0,003 | 0,024 |
| 265 | 1,2303 | 0,004 | 264,98 | 52,881 | 55,774 | 14,977 | 0,278 | 0,078 | 0,020 | 1,058 | 2,108 | 0,008 | 0,065 |
| 266 | 1,2457 | 0,004 | 239,12 | 55,351 | 54,749 | 15,423 | 0,904 | 0,612 | 0,022 | 1,176 | 2,372 | 0,012 | 0,091 |
| 267 | 2,4856 | 0,018 | 253,30 | 54,378 | 55,193 | 21,387 | 0,620 | 0,243 | 0,021 | 2,679 | 4,924 | 0,090 | 0,690 |
| 268 | 0,3337 | 3,106E-4 | 235,64 | 56,151 | 53,924 | 8,076 | 0,952 | 0,760 | 0,022 | 0,332 | 0,652 | 1,837E04 | 0,001 |
| 269 | 1,1726 | 0,004 | 259,83 | 45,986 | 64,681 | 13,665 | 0,440 | 0,142 | 0,020 | 1,152 | 2,262 | 0,010 | 0,082 |
| 270 | 2,0558 | 0,009 | 233,65 | 44,248 | 68,337 | 18,069 | 0,976 | 0,862 | 0,022 | 2,306 | 4,126 | 0,059 | 0,403 |
| 271 | 1,6214 | 0,005 | 235,38 | 70,342 | 43,039 | 19,638 | 0,955 | 0,772 | 0,022 | 1,270 | 2,499 | 0,013 | 0,100 |
| 272 | 0,9554 | 0,002 | 253,45 | 70,389 | 42,631 | 14,811 | 0,617 | 0,240 | 0,021 | 0,664 | 1,325 | 0,002 | 0,015 |
| 273 | 2,3275 | 0,009 | 269,54 | 60,770 | 48,131 | 22,058 | 0,122 | 0,031 | 0,019 | 1,776 | 3,357 | 0,029 | 0,219 |
| 274 | 0,4194 | 4,943E-4 | 260,23 | 50,653 | 58,686 | 8,536 | 0,428 | 0,136 | 0,020 | 0,401 | 0,778 | 3,112E04 | 0,003 |
| 275 | 1,0087 | 0,002 | 264,93 | 60,208 | 48,990 | 14,349 | 0,280 | 0,079 | 0,020 | 0,769 | 1,514 | 0,003 | 0,024 |
| 276 | 2,2883 | 0,010 | 265,67 | 63,649 | 46,281 | 22,153 | 0,255 | 0,071 | 0,020 | 1,866 | 3,480 | 0,032 | 0,241 |
| 277 | 1,768 | 0,004 | 267,62 | 69,823 | 42,041 | 20,300 | 0,189 | 0,050 | 0,020 | 0,979 | 1,931 | 0,007 | 0,050 |
| 278 | 1,4075 | 0,005 | 236,61 | 57,087 | 53,061 | 16,681 | 0,940 | 0,715 | 0,022 | 1,311 | 2,645 | 0,017 | 0,132 |
| 279 | 0,5667 | 0,001 | 256,96 | 53,308 | 56,032 | 10,129 | 0,523 | 0,183 | 0,021 | 0,528 | 1,023 | 0,001 | 0,007 |
| 280 | 2,4239 | 0,016 | 252,31 | 61,215 | 49,086 | 22,239 | 0,645 | 0,261 | 0,021 | 2,381 | 4,378 | 0,064 | 0,487 |
| 281 | 2,2696 | 0,012 | 263,50 | 58,231 | 50,778 | 21,177 | 0,327 | 0,095 | 0,020 | 2,142 | 3,992 | 0,048 | 0,359 |
| 282 | 2,1555 | 0,004 | 232,52 | 38,594 | 78,262 | 17,409 | 0,988 | 0,927 | 0,022 | 1,478 | 2,949 | 0,023 | 0,151 |
| 283 | 1,0354 | 0,002 | 232,69 | 33,833 | 89,293 | 11,349 | 0,986 | 0,917 | 0,022 | 1,101 | 2,162 | 0,010 | 0,071 |
| 284 | 1,1171 | 0,004 | 242,81 | 35,746 | 84,709 | 11,930 | 0,845 | 0,486 | 0,022 | 1,270 | 2,492 | 0,014 | 0,107 |
| 285 | 2,0701 | 0,013 | 243,22 | 48,928 | 61,876 | 18,728 | 0,837 | 0,474 | 0,022 | 2,448 | 4,618 | 0,066 | 0,422 |

| Caso | d_o (mm) | Q_m (kg/s) | T_s (K) | v (m/s) | D_m (μm) | θ (°) | Y_{prop} | X_{prop} | LIE | Extensão LIE (m) | Extensão ½ LIE (m) | Volume LIE (m³) | Volume ½ LIE (m³) |
|-------------|------------------------------|--------------------------------|-----------------------------|-------------------|------------------------------|-----------------|-------------------------|-------------------------|------------|---------------------------------|-----------------------------------|---|---|
| 286 | 0,4524 | 3,988E-4 | 263,16 | 66,372 | 44,575 | 9,993 | 0,337 | 0,099 | 0,020 | 0,319 | 0,619 | 1,757E-4 | 0,001 |
| 287 | 2,4305 | 0,018 | 253,40 | 49,333 | 60,831 | 20,256 | 0,618 | 0,241 | 0,021 | 2,799 | 5,281 | 0,093 | 0,601 |
| 288 | 0,1816 | 6,860E-5 | 265,35 | 61,352 | 48,042 | 6,141 | 0,266 | 0,074 | 0,020 | 0,131 | 0,291 | 6,400E-6 | 9,020E-05 |
| 289 | 0,8849 | 0,002 | 247,85 | 73,108 | 41,285 | 14,512 | 0,747 | 0,353 | 0,021 | 0,591 | 1,179 | 0,001 | 0,011 |
| 290 | 0,2922 | 2,215E-4 | 242,95 | 62,799 | 48,215 | 7,855 | 0,842 | 0,482 | 0,022 | 0,251 | 0,501 | 7,330E-5 | 0,001 |
| 291 | 1,2868 | 0,003 | 270,18 | 56,879 | 51,361 | 15,961 | 0,100 | 0,025 | 0,019 | 0,918 | 1,832 | 0,006 | 0,043 |

i) **Publicações em Eventos do Trabalho de Tese**

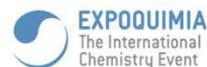
a) **10th World Congress of Chemical Engineering (2017)**



Organized by EFCE-Spain Group:



Sponsors /Supporters



▶▶▶▶▶▶▶▶▶▶ www.wcce10.org



JOINT EVENT - CFD IN CHEMICAL ENGINEERING SYMPOSIUM

CFD Simulation of Flashing Jet Applied to Area Classification

Talles Caio OLIVEIRA¹, José Jailson ALVES¹, Antônio Tavernard PEREIRA NETO²

¹ Federal University of Campina Grande - UFCG, Brazil

² Federal University of Campina Grande -UFCG, Brazil

The explosive flashing spray may also take place during the accidental release of flammable pressure-liquefied gases in chemical, when failure of a vessel or pipe in the form of a small hole will result in formation of a flashing jet containing a mixture of liquid droplets and vapor. This phenomenon occurs when a superheated liquid comes into contact with the environment [1]. The present work consists of the release of propane flashing to the atmosphere with the objective of predicting the extent and volume of the hazard area.

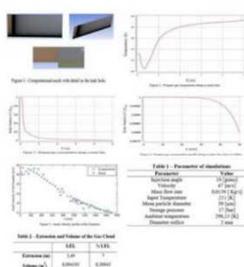
A CFD Eulerian-Lagrangian approach in steady-state was used to model the spray of liquid droplets, their evaporation and subsequent dispersion in the environment. The geometry consists of a 4th degree slice with a Computational mesh of 63000 elements (Figure 1). Table 1 illustrates the parameters and data used. Droplet break-up is predicted by the model. The Rosin-Rammler particle size distribution was used in the hole.

Figure 2 shows that the temperature of the gas phase is reduced to a minimum temperature below the boiling temperature (inlet temperature) this occurs due to the intense vaporization process of the droplets, after that point the phenomenon of vaporization loses relevance and temperature raised by the air until reaching the thermal equilibrium. The concentration profile of the jet in the axial direction is shown in Figure 3, initially in the expansion zone near the orifice the propane concentration remains constant due to no entrainment (Figure 4). For the case described the distance was 15 times the diameter of the hole. The axial velocity profile of the droplets (Figure 2) shown to be in a good agreement with to experimental data [2].

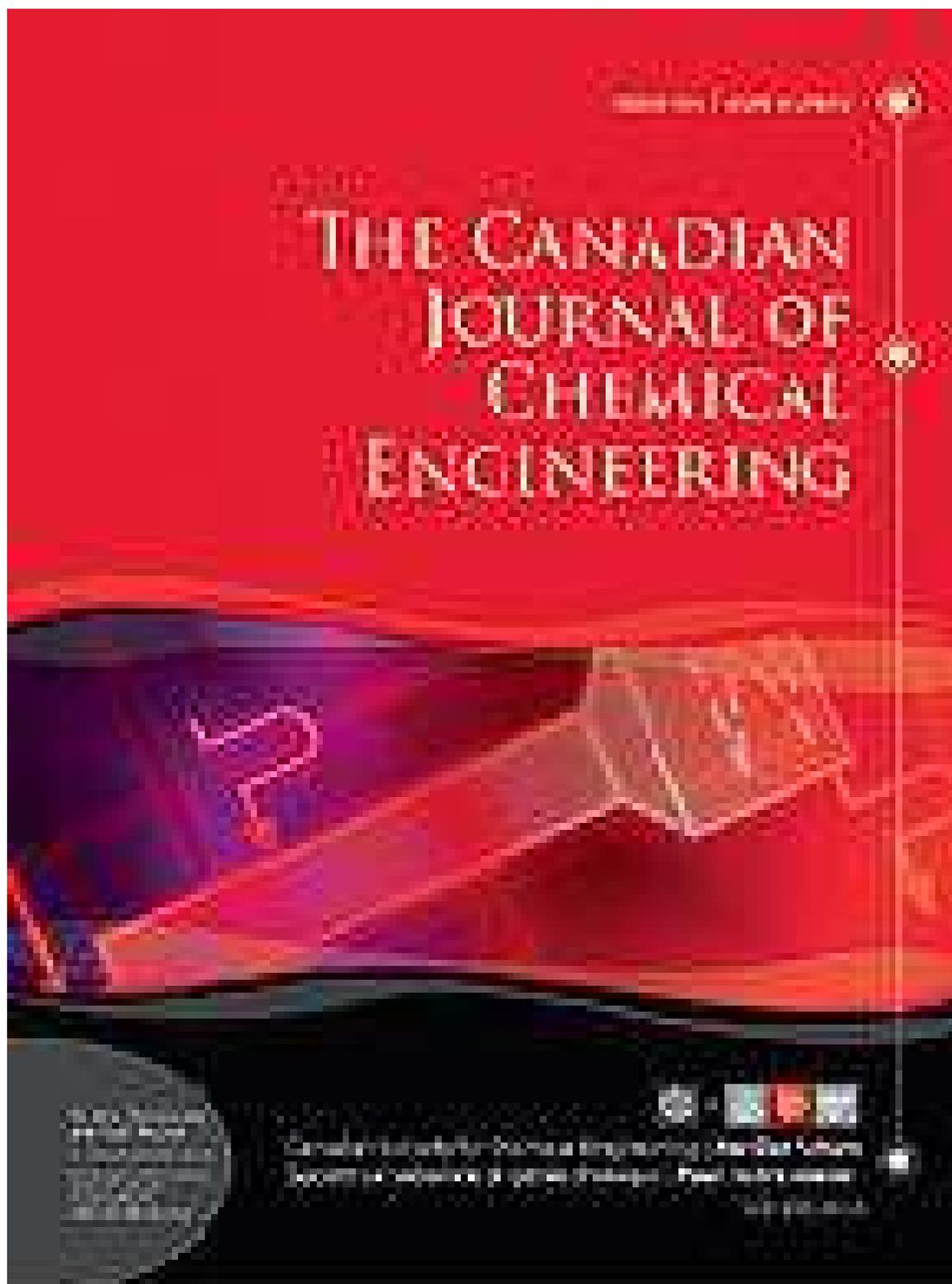
Table 2 shows the volume and the extent of the propane gas cloud at the Lower Explosive Limit (LEL) and 50% of the LEL, allowing a more accurate determination of the hazard area. Thus the developed CFD model can be used as a guide in the classification of areas involving flashing release.

References

1. G. Polanco, A.E. Holdo, G. Munday, General review of flashing jet studies, J. Hazard. Mater. 173 (1-3) (2010) 2–18.
2. Allen, J. T. (1998a). Laser-based measurements in two-phase flashing propane jets. Part one: velocity profiles. J. Loss Prev, 11(5), 291–297.



- ii) **Artigos Aceitos para Publicação em Periódicos**
a) Canadian Journal of Chemical Engineering - Wiley (2018)



Decision Letter (CJCE-18-0031.R1)**From:** jsoares@ualberta.ca**To:** tallescaio@hotmail.com**CC:** tallescaio@hotmail.com, jailson@eq.ufcg.edu.br, tavernard@eq.ufcg.edu.br**Subject:** The Canadian Journal of Chemical Engineering - Decision on Manuscript ID CJCE-18-0031.R1**Body:** 07-Jun-2018

Dear Mrs. Oliveira,

It is a pleasure to accept your manuscript entitled "CFD SIMULATION OF FLASHING JET APPLIED TO AREA CLASSIFICATION" in The Canadian Journal of Chemical Engineering. Please note the article has been conditionally accepted until all formatting requirements have been met. The article will soon be reviewed to ensure that all figures, tables and other formats are correct prior to the article proceeding to the copyediting and then typesetting phase of production.

Both The Canadian Journal of Chemical Engineering and Wiley offer various options to promote your research. Wiley Author Services [<http://authorservices.wiley.com/bauthor/>] contains a variety of resources, including:

- The Author Promotional Toolkit Five tips to increase discoverability through search engine optimization (SEO)
- The option to nominate up to 10 researchers who will be emailed a notification when your article is published, as well as free online access to your article. This is a great way to share your research with colleagues who may not subscribe to Can. J. Chem. Eng. See the attached document for a detailed overview of the many tools Wiley provides to authors to promote their research.

The Canadian Journal of Chemical Engineering has an active social media presence.

- When posting your article on Twitter, tag @canjchemeng as well as your research institution and co-authors
- On Facebook, tag the Chemical Institute of Canada page
- Review the '5 tips on social media promotion' [<http://www.cheminst.ca/journal/callsubmissions/submission-checklist/research-promotion>] to plan how and when to share your article

Keep track of your article's performance on social media through Altmetrics, available on your article's page once it has been published.

Thank you for your fine contribution.

Sincerely,

Joao B.P. Soares

Editor-in-Chief

Canadian Journal of Chemical Engineering

iii) **Publicações em Eventos Relacionadas a Classificação de Área**

- ❖ BARROS, P. L. ; OLIVEIRA, T. C. L. ; ALVES, J. J. N., **Liberação Bifásica de Butano em Ambiente Aberto para Classificação de Área de Risco Através de CFD**, Congresso Brasileiro de Engenharia Química em Iniciação Científica, São Carlos, Blucher Chemical Engineering Proceedings, p. 2112, 2017.
- ❖ ANJOS, D. ALMEIDA ; ARAÚJO, A. C. B. ; SILVA JÚNIOR, H. B. ; ALVES, J. J. N. ; OLIVEIRA, T. C. L. ; COSTA, A. B. ; FERNANDES, T. C. R. L. ; LIMA, F. S. ; QUEIROZ, F. J. , **Método Para Determinação da Extensão de Áreas Classificadas em Liberações Bifásicas**, XXXVIII Iberian Latin American Congress on Computational Methods in Engineering, Florianopolis, 2017.
- ❖ OLIVEIRA, T. C. L.; PEREIRA NETO, A. T. ; ALVES, J. J. N. ; LOPES, H. M., **Simulação Numérica de Jatos Líquidos para Determinação de Áreas Classificadas Utilizando o Modelo VOF**, I Congresso Internacional de Fluidodinâmica Computacional, Campina Grande, 2016.
- ❖ LOPES, H. M. ; OLIVEIRA, A.S. ; OLIVEIRA, T. C. L.; PEREIRA NETO, A. T.; ALVES, J. J. N.; VIANA, B. S., **Estudo Numérico da Influência da Utilização de um Modelo de Gás Real para a Obtenção da Extensão da Área Classificada para Gases Inflamáveis**, I Congresso Internacional de Fluidodinâmica Computacional, 2016.
- ❖ LOPES, H. M. ; Souza, A. O. ; OLIVEIRA, T. C. L. ; PEREIRA NETO, A. T. ; ALVES, J. J. N., **Estudos de Vazamentos de Gases Inflamáveis e Formação de Atmosferas Explosivas Para Melhorias das Técnicas de Classificação de Áreas via CFD**, XXI Congresso Brasileiro de Engenharia Química, Fortaleza, 2016.
- ❖ OLIVEIRA, T. C. L.; Souza, A. O.; Lopes, H. M. ; PEREIRA NETO, A. T.; ALVES, J. J. N., **Simulação em CFD de Vazamento de Gases para Determinação de Áreas Classificadas**. XXXVI Ibero Latin American Congress on Computational Methods in Engineering, Rio de Janeiro, 2015.