

1 2 9 0



UNIVERSIDADE D  
**COIMBRA**

Thiago Fernandes Barbosa

**INFLUÊNCIA DE RESERVATÓRIOS DE GPL  
NA SEGURANÇA EM CENÁRIOS DE  
INCÊNDIOS DE INTERFACE URBANO-  
FLORESTAL**

**Tese no âmbito do Doutoramento em Engenharia de Segurança ao Incêndio orientada pelos Professores Doutores Domingos Xavier Viegas e Jorge Rafael Raposo e apresentada ao Departamento de Engenharia Civil da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra.**

Dezembro de 2022



À Rosa, ao Dedé, à Anne e às memórias da minha avó Marina e do meu avô Agenor.

*Ninguém faz bem o que faz contra a vontade, mesmo que seja bom o que faz.*

*St. Agostinho*

## Agradecimentos

Esta tese foi desenvolvida nos últimos quatro anos na Universidade de Coimbra e no Centro de Estudos Sobre Incêndios Florestais (CEIF) da Associação para o Desenvolvimento da Aerodinâmica Industrial (ADAI), instituições as quais tenho grande respeito e expresso os meus agradecimentos. Esse período foi consideravelmente frutífero, com grandes aprendizados no âmbito académico, profissional e pessoal.

Agradeço ao: Professor Doutor Domingos Xavier Viegas, meu orientador, pessoa que me acolheu no CEIF, e que nesses anos mostrou-se paciente e disponível para a orientação e o ensino; Professor Doutor Jorge Raposo, meu coorientador, sempre presente nas minhas atividades laboratoriais e orientação.

Sou grato a toda equipa do CEIF e em especial a: Luís Reis, Tiago Rodrigues, Daniela Alves, Nuno Luís, João Carvalho, António Cardoso, Gonçalo Rosa, Felipe Ferreira, Diogo Pires, Luís Mário, Babak Chehreh e Miguel Almeida.

À minha mãe, Rosa, à minha avó, Marina, ao meu avô, Agenor, aos meus pais, Demosthenes e Barbosa, e à minha esposa, Anne, que me incentivaram e apoiaram nesse desafio longe de casa e do seio familiar, que apesar da distância, mantiveram-se sempre presentes. Aos amigos, de Salvador e de Coimbra, presentes nessa jornada. Ao Pedro Falcão pelo apoio nas matérias da Engenharia Química.

Ao suporte financeiro provido pela Fundação para Ciência e Tecnologia de Portugal (FCT) pelas bolsas a mim destinadas através dos projetos Triple C (EAPA\_772/2018), Renature (CENTRO-01-0145-FEDER-000007), WUIVIEW (Project GA 826522 WUIVIEW UCPM-2018-PP-AG) e Smoke Storm (PCIF/MPG/0147/2019). Também às entidades privadas pelo suporte de informações, financeiro e de materiais que foram de grande estima e valia para a continuidade dos trabalhos.

Em nossos testes de campo, devido ao risco envolvido, contamos com o suporte de instituições diversas. Nomeadamente, agradeço àqueles que foram especiais e disponibilizaram-se em apoiar a investigação: os Bombeiros Voluntários de Miranda do Corvo, nas pessoas do Senhor Comandante Fernando Jorge e do Adjunto de Comando Gildo; 2º

Comandante Nuno Brito, dos Bombeiros Voluntários de Freamunde; os Bombeiros de Coimbra; à Câmara Municipal e a Proteção Civil de Miranda do Corvo, na pessoa do vereador Hugo Raposo; à Sabril, na pessoa da Engenheira Carla Sousa.

Aos colegas de turma, parceiros unidos no estudo das disciplinas do doutoramento.

A todos vocês os meus mais sinceros agradecimentos.

## Abstract

The wildland-urban interface (WUI) fires often reach houses and facilities causing financial damages and fatalities, which happened during the large wildfires in Portugal (2017) and Greece (2018). As the majority of rural and WUI areas do not have piped gas, reservoirs like cylinders and tanks are used to store LPG. Thus, when a wildfire occurs nearby, the cylinders and tanks become a hazard for the people because of the large amount of energy stored, as they can trigger events such as major accidents and incidents. These events have occurred in Portugal, Greece, Spain and the USA causing jet fires, explosion and structure collapses. This thesis describes 14 accidents and incidents related to gas stored at WUI that happened during WUI fires, some of them with fatalities or structure collapse. The thesis approaches the issues related to hazard effects and suggests mitigation measures.

For this reason, field and laboratory test were carried out. The main types of LPG cylinders widely traded in Portugal were tested: steel cylinders and composite cylinders, filled with butane or propane; with or without a pressure relief device (PRD). The absence of a PRD revealed a catastrophic scenario, leading to a cylinder burst. Important hazard information was obtained with the test, for instance: time to failure, velocity and reach of fragments projected by the cylinder's burst, height and size of fireball, length of jet fire and its incident radiation on targets at different distances. The tests have shown that a high temperature significantly decreases the cylinder resistance, causing a much lower burst pressure when compared to the burst pressure found in hydrostatic tests.

The jet fire and BLEVE effects were assessed and compared to predictive methods available in the literature. For the pressure increment due to thermal radiation incident on the reservoir, simulations were also performed using computational fluid dynamics (CFD) through ANSYS FLUENT in two and three dimensions for a two-phase (liquid-gas) system to estimate the reservoir pressure increase as it was heated. For the jet fire, simulations were performed in three dimensions to estimate its length and the respective thermal radiation incident on targets at different distances. These findings were compared to experimental data and showed a good agreement.

In addition, two protective devices for gas cylinders were tested. The first protective device (PD1) was built using a fabric. The second (PD2), ceramic plates were used. Both devices could block a significant percentage of heat flux that would reach the cylinder. However, PD1 became a better solution due to being cheaper, ergonomic and easier to assemble.

In conclusion, several recommendations were made to mitigate or avoid further accidents and fatalities.

Keywords: LPG, BLEVE, WUI fires, CFD, safety.

## Resumo

Os incêndios de interface urbano florestal (IUF) frequentemente atingem habitações e fábricas causando danos no âmbito económico e social e, por vezes, mortes, como nos grandes incêndios de 2017 em Portugal e na Grécia em 2018. Nas zonas de IUF não é comum a presença de gás canalizado sendo necessário o uso de garrafas (cilindros) de GPL ou de reservatórios maiores. Desse modo, a presença de gás armazenado em zonas de IUF pode causar graves acidentes e incidentes devido à elevada quantidade de energia armazenada, sendo um perigo potencial quando há a ocorrência de incêndios florestais em zonas de IUF. Esses acidentes têm ocorrido em Portugal, Espanha, Grécia e Estados Unidos, causando principalmente o jato de fogo, explosão e o colapso de estruturas. Esta tese relata 14 acidentes e incidentes, inclusive com mortes, devido ao armazenamento de gás na IUF e da ocorrência de incêndios florestais. Aborda os principais problemas físicos associados com o desenvolvimento deste tipo de eventos, propondo algumas soluções para os minimizar.

Para o efeito, foram feitos testes laboratoriais e de campo. Os principais tipos de garrafas de GPL foram avaliadas: metálicas e compósitas; com butano ou propano; com ou sem dispositivo de alívio de pressão (PRD). A ausência de PRD evidenciou um cenário catastrófico levando a garrafa à explosão. Nos testes foram encontradas informações relevantes relativas à segurança como: tempo para a rotura, velocidade e alcance dos fragmentos lançados pela explosão, altura e largura da bola de fogo, comprimento do jato de fogo e sua respetiva radiação. Verificou-se que o estresse causado pelas altas temperaturas causa severa redução na resistência, levando a garrafa a uma pressão de rotura muito inferior à pressão de rotura dos testes hidrostáticos realizados à temperatura ambiente.

Os efeitos do jato de fogo e do BLEVE foram avaliados e foram definidas distâncias de segurança. Para o incremento de pressão foram feitas simulações usando a dinâmica dos fluidos computacional (CFD) através do ANSYS FLUENT, em duas e três dimensões, para um sistema com duas fases (líquido-gás), a fim de estimar o aumento de pressão do reservatório à medida que era aquecido. Para o jato de fogo as simulações foram feitas em três dimensões para estimar o seu comprimento e a respetiva radiação térmica incidente em alvos a diferentes distâncias. Os

resultados das simulações foram comparados com os resultados experimentais e apresentaram bom ajuste com os valores reais.

Além disso, com o objetivo de manter o reservatório de GPL em segurança caso ocorra um incêndio na vizinhança, dois dispositivos de proteção dos reservatórios foram testados. O primeiro dispositivo (PD1) teve uma manta como material de proteção. No segundo (PD2) foram usadas placas cerâmicas. Ambos os dispositivos foram capazes de bloquear um alto percentual do fluxo de calor que alcançaria o reservatório. Contudo, PD1 mostrou-se como melhor solução devido ao menor custo, melhor ergonomia e montagem mais fácil.

Por fim, recomendações de segurança são feitas a fim de mitigar e evitar futuros acidentes e mortes.

Palavras-chave: GPL, BLEVE, incêndios de interface urbano-florestal, CFD, segurança.

---

## ÍNDICE

Abstract.....	v
Resumo .....	vii
Lista de figuras .....	xiii
Lista de tabelas .....	xvii
Lista de símbolos .....	xviii
Acrónimos .....	xxiii
Objetivos.....	1
1 INTRODUÇÃO.....	2
1.1 Considerações iniciais: incêndios na interface urbano-florestal.....	2
1.2 Acidentes e incidentes recentes com gás nos incêndios de IUF.....	4
1.2.1 Casos 1 e 2: Incêndio no Funchal, Portugal, agosto, 2016.....	5
1.2.2 Casos 3 e 4: Complexo de Incêndios de Pedrógão Grande, Portugal, junho, 2017.....	6
1.2.3 Casos 5 - 7: Incêndios de outubro de 2017, Portugal .....	7
1.2.4 Casos 8 e 9: Benitatxell, Espanha, setembro, 2016.....	9
1.2.5 Casos 10 e 11: Mati, Grécia, julho, 2018 .....	9
1.2.6 Caso 12: Llutxent, Espanha, agosto, 2018 .....	9
1.2.7 Caso 13: Quinta do Colação, Portugal, agosto, 2015.....	10
1.2.8 Caso 14: Calabasas, Estados Unidos da América, junho, 2016 .....	10
1.3 Considerações Iniciais .....	11
1.3.1 Normas .....	11
1.3.2 GPL na IUF .....	16

---

1.4	BLEVE: uma visão geral .....	19
1.5	O trabalho desenvolvido nesta tese: uma visão geral .....	22
2	MÉTODOS DE ESTIMATIVA E EFEITOS.....	25
2.1	Energia disponível e sobrepressão .....	25
2.2	Fragmentação.....	28
2.3	Bola de fogo.....	29
2.4	Jato de fogo.....	33
2.5	Pressão no interior o reservatório .....	36
3	DINÂMICA DOS FLUIDOS COMPUTACIONAL (CFD).....	38
3.1	Simulação do aumento de pressão na garrafa durante o aquecimento.....	38
3.1.1	Modelo multifase: VoF.....	41
3.1.2	O modelo K- $\omega$ -SST .....	42
3.1.3	A equação de Peng Robinson (PR) .....	44
3.2	Simulação do jato de fogo .....	46
3.2.1	Modelos de Combustão Eddy Dissipation .....	47
3.2.2	Modelo de turbulência K- $\epsilon$ .....	48
3.2.3	Modelo de radiação: Discrete Ordinates (DO).....	49
4	METODOLOGIA.....	52
4.1	Avaliação dos efeitos do BLEVE e do jato de fogo: exposição das garrafas de GPL às chamas .....	52
4.1.1	Testes hidrostáticos .....	53
4.1.2	Testes de campo.....	54
4.2	Simulações CFD .....	60
4.2.1	Simulação do aumento de pressão na garrafa.....	60

---

4.2.2	Simulação do jato de fogo .....	67
4.3	A proteção para as garrafas de GPL e seus testes .....	73
4.3.1	Testes da proteção: laboratoriais .....	74
4.3.2	Teste da proteção: campo .....	77
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	78
5.1	Testes sem proteção: comportamento, efeitos, estimativas .....	78
5.1.1	Teste T1CB .....	78
5.1.2	Teste T2SP .....	80
5.1.3	Jato de fogo .....	82
5.1.4	Testes T3SP e TH .....	83
5.2	Simulações .....	91
5.2.1	Simulações do aumento de pressão na garrafa .....	91
5.2.2	Simulações jato de fogo .....	106
5.3	A proteção da garrafa .....	109
5.3.1	Testes laboratoriais .....	109
5.3.2	Teste de campo .....	115
5.3.3	A temperatura da superfície da garrafa e a respetiva pressão .....	116
5.4	Recomendações para o armazenamento de GPL na IUF .....	116
6	CONCLUSÃO .....	119
7	SUGESTÃO DE TRABALHOS FUTUROS .....	121
	REFERÊNCIAS .....	122
	ANEXOS .....	132
	Anexo A: Diagrama Scaled distance X sobrepressão usado no método equivalência de TNT .....	132

---

---

Anexo B: Tabela com a sobrepressão e respectivos danos a estruturas.....	133
Anexo C: Tabela com a sobrepressão e respectivos danos a pessoas. ....	134
Anexo D: Relações da equação de Probit e a probabilidade. ....	134
Anexo E: Equação, gráfico e tabelas do fator de forma .....	136
Anexo F: Relação probabilidade X dose e os respectivos graus de queimadura. ....	138
Anexo G: Relação tempo de exposição e intensidade da radiação térmica e os respectivos graus de queimadura e letalidade. ....	139
Anexo H: Equações de governo .....	140
APÊNDICE .....	142
Apêndice A: documento destinado aos agentes de proteção civil e à sociedade .....	142
Apêndice B: trabalhos publicados em artigos, conferências e mídia .....	149

---

**Lista de figuras**

Figura 1.1: As camadas da garrafa compósito.....	11
Figura 1.2: Garrafas metálicas com volume expandido após aquecimento e zona de rotura no topo da garrafa. ....	12
Figura 1.3: Fotografias de diversos casos de incêndios que envolveram garrafas de GPL; (a) e (b) Incêndio em armazém em Freamunde com garrafas compósitas (2020 – crédito aos Bombeiros de Freamunde; (c) e (d) Incêndio em Funchal e respetivas garrafas metálicas após exposição ao fogo (2016 - crédito David Caballero); (e) Garrafas diversos coletados pelos Bombeiros de Miranda do Corvo. ....	15
Figura 1.4: Reservatórios de GPL com diversos tamanhos mantidos próximos a combustíveis florestais em diferentes localidades de Portugal- (a) Estrada da Beira N17; (b) Lousã; (c) Arregadas de Cimeira; (d) Salgueiro da Ribeira; (e) Lousã; (f) e (g) Coimbra; (h) Manteigas. ....	18
Figura 1.5: Diagrama Pressão x Temperatura para o butano, propano e suas misturas - imagem cedida por um fornecedor de GPL.....	22
Figura 2.1: Desenho esquemático da bola de fogo, posição da incidência de radiação em alvos nas posições vertical (V) e horizontal (H), e os respetivos parâmetros espaciais para o cálculo da estimativa da radiação incidente no alvo. ....	30
Figura 3.1: Desenho comparativo relativo à influência do passo de tempo para as simulações em estado transiente.....	41
Figura 3.2: Desenho esquemático do diagrama PxT para um fluido qualquer com destaque ao equilíbrio líquido-vapor e ponto crítico.....	45
Figura 3.3: Representação espacial de theta e phi .....	50
Figura 3.4: Representação do aumento da discretização da radiação no espaço com o aumento dos valores de theta e phi, da esquerda para a direita.....	50
Figura 4.1: Câmara de testes usada para os testes de rotura das garrafas sob pressão hidrostática. ....	54
Figura 4.2: Imagem aérea do local dos testes de campo (pedreira).....	55

Figura 4.3: Monitor na direção do suporte com a garrafa para arrefecimento ou interrupção dos testes. ....	56
Figura 4.4: Imagens descritivas dos testes de campo; (a) desenho esquemático com o posicionamento dos instrumentos; (b) fotografia do teste T1CB.....	58
Figura 4.5: Desenho esquemático dos equipamentos de aquisição de imagens e das distâncias dos marcos em relação à garrafa para os testes de campo.....	59
Figura 4.6: Malha gerada em 3 dimensões para as simulações do incremento de pressão. ....	62
Figura 4.7: Distribuição da quantidade de elementos correspondente à métrica de qualidade da malha gerada para as simulações 3D.....	63
Figura 4.8: Malha gerada para as simulações 3D do incremento de pressão, com foco no <i>inflation</i> usado nas proximidades da parede interna. ....	63
Figura 4.9: Malha usada nas simulações 2D do incremento de pressão com a escala colorida do valor do skewness.....	64
Figura 4.10: Malha gerada para as simulações 2D do incremento de pressão, com foco no <i>inflation</i> usado nas proximidades da parede interna.....	64
Figura 4.11: Distribuição da quantidade de elementos relativamente à métrica de qualidade da malha usada para as simulações 2D do incremento de pressão.....	65
Figura 4.12: Domínio em 3 dimensões para as simulações do jato de fogo. ....	68
Figura 4.13: Malha usada nas simulações do jato de fogo e a distribuição da qualidade com cores.....	68
Figura 4.14: Malha usada nas simulações do jato de fogo e a distribuição da qualidade com cores, com foco no volume da garrafa.....	69
Figura 4.15: Distribuição da quantidade de elementos relativamente à métrica de qualidade da malha usada nas simulações do jato de fogo. ....	69
Figura 4.16: Imagens dos testes laboratoriais do jato de fogo; (a) fotografia do teste; (b) desenho esquemático do aparato experimental. ....	72
Figura 4.17: Desenho esquemático dos testes da proteção feitos no laboratório e respetivos instrumentos. ....	76
Figura 4.18: Testes da proteção feitos em campo. ....	77

Figura 5.1: Teste T1CB; (a) garrafa compósita antes do teste; (b) garrafa compósita após o teste. .....	78
Figura 5.2: Aquisição de dados do teste T1CB; (a) Temperatura na superfície; (b) Pressão...	79
Figura 5.3: Imagem do jato de fogo do teste T1CB; (a) câmara visível; (b) câmara IR .....	80
Figura 5.4: Aquisição de dados do teste T2SP; (a) Temperatura na superfície; (b) Pressão....	81
Figura 5.5: Imagem do Jato de fogo do teste T2SP; , (a) câmara visível; (b) câmara IR.....	81
Figura 5.6: Radiação incidente do jato de fogo em alvos até a distância de 5 metros. ....	82
Figura 5.7: Aquisição de dados do teste T2SP; (a) Temperatura na superfície; (b) Pressão....	84
Figura 5.8: Dispersão dos fragmentos após explosão no teste T3SP; fragmentos 10 e 11, em azul, são primários; posição inicial do cilindro em vermelho. ....	85
Figura 5.9: Fotografias do perfil de rotura da garrafa do teste T3SP; (a) soldadura antes da rotura; (b) perfil de rotura; (c) e (d) perfil de rotura e soldadura após rotura.....	87
Figura 5.10: Fotografias da bola de fogo do teste T3SP; (a) e (b) Imagens do DRONE; (c) CAM IR; (d) Action cam.....	89
Figura 5.11: (a) Radiação incidente e (b) dose recebida; ambos para a bola de fogo em alvos até 12 metros, considerando os maiores valores para o fluxo e a dose recebidos pelo alvo nas posições vertical e horizontal. ....	90
Figura 5.12: Variação de pressão para distâncias até 7 metros do centro da explosão. ....	90
Figura 5.13: Calor incidente na garrafa aproximado para os testes T1CB e T3SP. ....	91
Figura 5.14: Perfil do incremento de pressão do teste T1CB e da simulação SIMU T13D ....	93
Figura 5.15: Perfil de temperatura da SIMU T13D aos 120 segundos, (a) vista vertical e (b) vista lateral.....	93
Figura 5.16: Perfil de escoamento e gama de velocidade da SIMU T13D aos 120 segundos, (a) vista vertical e (b) vista lateral.....	94
Figura 5.17: Perfil do incremento de pressão do teste T2SP e das simulações 2D e 3D para o teste T2SP. ....	95
Figura 5.18: (a) Perfil de pressão e temperatura média da simulação SIMU T2 2D; (b) Perfil de pressão e temperatura média da simulação SIMU T2 3D; (c) Diagrama PxT para o propano.	97
Figura 5.19: Perfil de temperatura da simulação SIMU T2 2D a diferentes tempos de simulação: 0s (a); 40s (b); 80s (c); 120s (d). ....	98

---

Figura 5.20: Perfis de (a) temperatura; (b) velocidade, (c) vetor velocidade; sendo (a), (b) e (c) para a simulação SIMU T2 2D aos 60 segundos.....	99
Figura 5.21: Perfis de (a) temperatura vista frontal; (b) temperatura vista lateral, (c) vetor velocidade vista frontal; (d) vetor velocidade vista lateral; todas figuras para a simulação SIMU T2 3D.....	100
Figura 5.22: Perfil do incremento de pressão para o teste T3SP e simulação T32D.....	101
Figura 5.23: Perfis de pressão e temperatura média da simulação SIMU T3 2D.....	102
Figura 5.24: Relação de $P_R$ e $T_R$ com o erro relativo na simulação SIMU T32D. ....	102
Figura 5.25: Relação de $T_R$ com o erro relativo de todas as simulações 2D e 3D. ....	104
Figura 5.26: Fotografia do jato de fogo laboratorial. ....	106
Figura 5.27: Imagem do contorno da chama da simulação do jato de fogo laboratorial.....	106
Figura 5.28: Perfil de calor incidente do jato de fogo laboratorial (Lab) e simulado (CFD). ....	107
Figura 5.29: Imagem do contorno da chama da simulação do jato de fogo do teste T1CB (SIMUJET T1).....	108
Figura 5.30: Imagem do contorno da chama da simulação do jato de fogo do teste T2SP (SIMUJET T2), com a gravidade no sentido oposto ao escoamento (-x). ....	108
Figura 5.31: Perfil do calor incidente em relação à distância para as simulações SIMUJET T1 e T2.....	109
Figura 5.32: Fotografias do teste laboratorial com a proteção composta pela manta ignífuga; (a) CAM UV; (b) CAM IR. ....	110
Figura 5.33: Fluxo de calor incidente em PD1 e na garrafa para os testes laboratoriais nas quatro diferentes distâncias (0,25, 0,50, 0,75 e 1m). ....	111
Figura 5.34: Fluxo de calor incidente em PD2 e na garrafa para os testes laboratoriais nas quatro diferentes distâncias (0,25, 0,50, 0,75 e 1m). ....	112
Figura 5.35: Temperatura nas superfícies de PD1 e da garrafa para os testes laboratoriais nas quatro diferentes distâncias (0,25, 0,50, 0,75 e 1m). ....	113
Figura 5.36: Temperatura nas superfícies de PD2 e da garrafa para os testes laboratoriais nas quatro diferentes distâncias (0,25, 0,50, 0,75 e 1m). ....	114
Figura 5.37: (a) Fluxo de calor incidente nas superfícies de PD1 e da garrafa; (b) Temperaturas nas superfícies de PD1 e da garrafa; ambas para o teste de campo.....	115

---

---

## Lista de tabelas

Tabela 3.1 Resumos das recentes configurações usadas em simulações de reservatórios de gás sob aquecimento .....	46
Tabela 3.2: Resumos das recentes configurações usadas em simulações de jato de fogo .....	47
Tabela 4.1: Testes hidrostáticos.....	53
Tabela 4.2: Sumário dos testes sem proteção .....	55
Tabela 4.3 Padronização do combustível florestal .....	57
Tabela 4.4: Condições iniciais das simulações e respectivos testes.....	61
Tabela 4.5:Relação da variável e respetiva discretização usada na configuração no Ansys Fluent .....	66
Tabela 4.6: Relação da variável e respetivo fatores de relaxação usada na configuração no Ansys Fluent.....	66
Tabela 4.7: Métodos de solução no FLUENT .....	70
Tabela 4.8: Sumário dos testes laboratoriais do jato de fogo .....	73
Tabela 4.9: Sumário dos testes com as proteções.....	75
Tabela 5.1: Resultado dos testes hidrostáticos .....	83
Tabela 5.2: Dados de fragmentação do teste T3SP .....	86
Tabela 5.3: Relação percentual e acumulada entre os fragmentos e a distância .....	86
Tabela 5.4: Velocidade média estimada dos fragmentos primários em dois momentos, a 0,3 e 1 segundo.....	87
Tabela 5.5: Resumo das informações de diferentes autores sobre as explosões .....	88
Tabela 5.6: Temperatura máxima na superfície e a respetiva estimativa de pressão na garrafa. ....	116

---

## Lista de símbolos

### Maiúsculas

A e B - São constantes empíricas iguais a 4 e 0,5, respectivamente, nas equações nº 49 e 50.

A – Área [m<sup>2</sup>]

A<sub>f</sub> - Área da chama [m<sup>2</sup>]

C<sub>ev</sub> - Coeficiente de evaporação

C<sub>cs-vol</sub> - Fração molar do combustível na mistura estequiométrica ar-combustível

C<sub>1</sub> - Função do módulo da taxa do tensor deformação S;

C<sub>1ε</sub> - 1,44

C<sub>2</sub> - 1,9 na equação nº 52

C<sub>3ε</sub> - Função da velocidade do escoamento na componente cartesiana em relação ao vetor gravitacional

C<sub>p</sub> - Calor específico [J.kg<sup>-1</sup>.K<sup>-1</sup>]

C<sub>ps</sub> - Calor específico do metal [J.kg<sup>-1</sup>.K<sup>-1</sup>]

C<sub>st-vol</sub> - Estequiométrica ar-combustível

D – Diâmetro da bola de fogo [m]

D<sub>or</sub> - Diâmetro do orifício [m]

D<sub>ω</sub> - Termo de difusão cruzada

D<sub>j</sub> - Diâmetro do jato de fogo

E - Média de energia específica para o sistema de duas fases

E\* - Energia [MJ]

F - Função projetada para ter resultado igual a 1

F<sub>F</sub> - Fator de forma

F<sub>vertical</sub> - Fator de forma para a incidência na componente vertical de um alvo

F<sub>horizontal</sub> - Fator de forma para a incidência na componente horizontal de um alvo

$\vec{F}$  - Vetor força

FD - Grau de enchimento do reservatório (*filling degree*)

F<sub>max</sub> - Fator de forma máximo

- $G_b$  - Geração de turbulência devido à flutuação
- $G_{b\omega}$  - Flutuação do termo  $\omega$ ;
- $G_k$  - Geração de energia cinética turbulenta
- $G_\omega$  - Geração da dissipação específica
- H - Altura da bola de fogo [m]
- $H_f$  - Altura do jato de fogo [ $m^2$ ]
- $H_{vap}$  - Calor de vaporização [ $kW.kg^{-1}$ ]
- I - Intensidade térmica [ $kW.m^{-2}$ ]
- L - Comprimento do jato de fogo [m]
- $L_f$  - Distância de projeção dos fragmentos [m]
- M - Massa [kg]
- $M_A$  - Massa molar do ar
- $M_{TNT}$  - Massa de TNT [kg]
- $M_A$  - Massa molar do ar [ $kg.kmol^{-1}$ ]
- $Ma_j$  - Número de Mach do jato
- $M_c$  - Massa molar do combustível [ $kg.kmol^{-1}$ ]
- $M_{w,i}$  e  $M_{w,j}$  - Massas molares das espécies i e j [ $kg.kmol^{-1}$ ]
- N - Número total de espécies
- P - Pressão [bar]
- $P_{atm}$  - Pressão atmosférica
- $P_{in}$  - Pressão dentro do reservatório
- $P_w$  - Pressão parcial da água [Pa]
- $P_{Wa}$  - Pressão de vapor saturado na atmosfera [Pa]
- $P_C$  - Pressão crítica
- $P_R$  - Pressão reduzida
- $\dot{Q}$  - Taxa de calor libertado [kW]
- $Q^*$  - Parâmetro de caracterização da chama [-]
- $R^*$  - Distância à escala (*Scaled distance* - método equivalência de TNT)
- R - Constante dos gases reais
- S - Taxa da tensão

$S_k$  e  $S_\omega$  - Termos definidos pelo usuário

T - Temperatura

$T_C$  - Temperatura crítica

$T_R$  - Temperatura reduzida

$T_{amb}$  - Temperatura do ar [K]

$T_j$  - Temperatura do jato de fogo [K]

$T_{Sat}$  - Temperatura de Saturação [K]

$T_s$  - Temperatura do Sólido [K]

$V_m$  - Velocidade média [ $m.s^{-1}$ ]

X - Comprimento da distância axial desde o orifício [m]

$X_f$  - Projecção horizontal do jato de fogo [m]

Y - PROBIT

$Y_k$  - Dissipação da energia cinética turbulenta k

$Y_M$  - Contribuição da dilatação da flutuação na taxa de dissipação geral

$Y_P$  - Fração mássica de uma das espécies dos produtos

$Y_R$  - Fração mássica de uma das espécies dos reagentes

$Y_\omega$  - Dissipação específica devido a turbulência

### **Minúsculas**

a - Coeficiente de absorção [ $m^{-1}$ ]

$d_R$  - Distância do centro da chama ao alvo [m]

d - Distância [m]

f - Fugacidade

g - Aceleração da gravidade [ $m.s^{-2}$ ]

j - Coordenada cartesiana

k - Energia cinética turbulenta

$k_s$  - Condutividade térmica do metal [ $W.m^{-1}K^{-1}$ ]

$k_{eff}$  - Condutividade térmica efetiva [ $W.m^{-1}K^{-1}$ ]

l - Líquido

min - minutos

$n_r$  - Índice de refração do meio

$\dot{m}$  - Caudal mássico [ $\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}$ ]

$\dot{m}_{lv}$  - Transferência de massa do líquido para o vapor [ $\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}$ ]

$\dot{m}_{vl}$  - Transferência de massa do vapor para o líquido [ $\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}$ ]

$q''$  - Fluxo de calor radiativo [ $\text{kW}\cdot\text{m}^2$ ]

$\vec{r}$  - Posição do vetor na respetiva direção

$r$  - Distância do alvo em relação à explosão (método equivalência de TNT) [m]

$\vec{s}$  - Direção do vetor de espalhamento

$t$  - Tempo [s]

$u$  - Velocidade na componente cartesiana [ $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ]

$u_{av}$  - Velocidade média do jet [ $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ]

$u_j$  - Velocidade do jato de fogo [ $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ]

$v$  - Vapor

$\nu_c$  - Viscosidade cinemática [ $\text{m}^2\cdot\text{s}^{-1}$ ]

$w$  - Fator acêntrico

## **Gregas**

$\alpha^*$  - Coeficiente para correção de baixos números de Reynolds

$\alpha_l$  - fração de volume de líquido no domínio

$\alpha_v$  - fração de volume de vapor no domínio

$\beta$  - Energia convertida em sobrepressão

$\Gamma_k$  - Difusividade para a energia cinética de turbulência

$\Gamma_\omega$  - Difusividade para taxa de dissipação específica

$\varepsilon$  - Emissividade

$\varepsilon$  - Taxa de dissipação turbulenta

$\epsilon$  - Energia estimada (densidade energética) [ $\text{MJ}\cdot\text{m}^{-3}$ ]

$\Delta P$  - Sobrepressão [bar]

$\Delta t$  - variação do tempo [s]

$\Delta S$  - variação da distância [m]

$\Delta H_c$  - Calor de combustão [MJ]

$\Theta \times \phi$  - Divisões angulares do método Ordenadas Discretas (*Discrete Ordenates – DO*)

$\mu_t$  - Viscosidade turbulenta [Pa.s]

$\mu_{rad}$  - Fração de calor radiado

$\nu'_{i,r}$  - Coeficiente estequiométrico para o reagente i na reação r

$\nu''_{i,r}$  - Coeficiente estequiométrico para o produto i na reação r

$\vec{v}$  - Velocidade média [m.s<sup>-1</sup>]

$\rho$  - Massa específica [kg.m<sup>-3</sup>]

$\rho_{amb}$  - Massa específica do ar [kg.m<sup>-3</sup>]

$\rho_l$  - Massa específica do líquido [kg.m<sup>-3</sup>]

$\rho_v$  - Massa específica do vapor [kg.m<sup>-3</sup>]

$\rho_m$  - Densidade média numa fração do volume para o sistema bifásico [kg.m<sup>-3</sup>]

$\rho_s$  - Massa específica do metal [kg.m<sup>-3</sup>]

$\sigma$  - Constante de Stefan-Boltzmann

$\sigma_\varepsilon$  - 1,2

$\sigma_k$  - Número de Prandtl para k

$\sigma_{k2}$  - 1

$\sigma_s$  - Coeficiente de dispersão [m<sup>-1</sup>]

$\sigma_\omega$  - Número de Prandtl para  $\omega$

$\Phi$  - Função da dispersão

$\Omega'$  - Número finito de ângulos

$\tau$  - Transmissividade

$\omega$  - Taxa de energia de dissipação específica

$\gamma$  - Coeficiente de Expansão adiabática (*ratio of the specific heats*)

$\dot{Y}$  - 1-T<sub>R</sub>

## Acrónimos

ADAI - Associação para o Desenvolvimento da Aerodinâmica Industrial

ANEPC - Autoridade Nacional de Emergência e Proteção Civil

BLEVE - Boiling Liquid Expanding Vapor Explosion

CAD - Desenho auxiliado por computador (*computer-aided design*)

CAM - Câmara

CEIF - Centro de Estudos sobre Incêndios Florestais

CFD - Dinâmica dos Fluidos Computacional (*Computational Fluid Dynamics*)

DO - Discrete Ordinates

EDC - Conceito de dissipação turbulenta (*Eddy Dissipation Concept*)

EDM - Modelo de dissipação turbulenta (*Eddy Dissipation Model*)

ELV - Equilíbrio Líquido-Vapor

EoS - Equação de Estado

EUA - Estados Unidos da América

FI - Sensor de fluxo de calor

FV - Fibra de vidro

FCTUC - Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra

FDS - Simulador de Dinâmica do Fogo (*Fire Dynamics Simulator*)

FWI - Índice Meteorológico de Perigo de Incêndio (*Fire Weather Index*)

GPL - Gás de Petróleo Liquefeito

IPMA - Instituto Português do Mar e Atmosfera

IR - Infravermelho

IUF - Interface Urbano Florestal

LEIF - Laboratório de Estudos sobre Incêndios Florestais

LES - Simulação de Turbulência Ampla (*Large eddy simulation*)

NI - *National Instruments*

NIST - Instituto Nacional de Norma e Tecnologia (*National Institute of Standards and Technology*)

PD1 - Dispositivo de proteção 1

PD2 - Dispositivo de proteção 2

PE - Polietileno

PI - Sensor de pressão

FI - Sensor de fluxo de calor

PP - Polipropileno

PR - Peng Robinson

PRD - dispositivo de alívio de pressão

RAIE - Comportamento de Gás Real e Expansão Adiabática Irreversível (*Real Gas Behaviour and Adiabatic Irreversible Expansion*)

RANS - Média de Reynolds da Equação de Navier-Stokes (*Reynolds-averaged Navier-Stokes*)

SAFT - Teoria Estatística dos Fluidos Associativos (*Statistical associating fluid theory*)

SE - Super Energia de Aquecimento (*Super Heating Energy*)

SRK - Soave-Redlich-Kwong

SEP - Poder emissivo da superfície

TH - Teste hidrostático

TI - Sensor de temperatura

TNT - Trinitrotolueno/Dinamite

UC - Universidade de Coimbra

VCE - Explosão de nuvem de vapor

VoF- Volume de Fluido (*Volume of Fluid*)

## **Objetivos**

### **Objetivo geral**

O objetivo desta tese é a avaliação da influência de reservatórios de GPL na segurança de pessoas, estruturas e comunidades quando ocorre um incêndio na interface urbano-florestal, e o fornecimento de informações precisas aos agentes de proteção civil, como bombeiros, sobre os riscos e efeitos de acidentes.

### **Objetivos específicos**

Complementar informações presentes na literatura sobre os efeitos da explosão de garrafas de GPL através de informações obtidas em ensaios experimentais, como: velocidade dos fragmentos; perfil de rotura dos fragmentos primários e secundários; dimensões da bola de fogo e do jato de fogo, e seus respectivos efeitos em alvos humanos devido à radiação.

Avaliar a redução da resistência da garrafa metálica devido a exposição às chamas comparando a pressão de rotura sob fogo à pressão de rotura de testes hidrostáticos.

Avaliar as diferenças de comportamento, quando expostas ao fogo, dos tipos de garrafas de GPL mais comercializadas em Portugal: compósita e metálica. Ressalta-se que em trabalhos anteriores a esta tese a garrafa tipo compósito não foi avaliada.

Usar a simulação de dinâmica dos fluidos computacional para estimar os efeitos do jato de fogo e o incremento de pressão de garrafas de GPL sob aquecimento. Posteriormente, validar os resultados CFD por meio de resultados experimentais.

Propor e testar um dispositivo de proteção de garrafas de GPL para reduzir o seu aquecimento e evitar acidentes em incêndios.

# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 Considerações iniciais: incêndios na interface urbano-florestal

Os incêndios florestais são eventos frequentes em muitos países, nomeadamente nos Estados Unidos da América (EUA), Canadá, Austrália e na região mediterrânea da Europa. Em 2017 e 2018, Portugal e Grécia, respetivamente, sofreram incêndios que somados causaram mais de duzentas mortes entre a população civil. Os incêndios florestais são um dos mais devastadores perigos ambientais existentes em Portugal e causam grandes perdas socioeconómicas quando ocorrem na zona de interface urbano-florestal (IUF). As zonas de IUF têm sido bastante afetadas pelos incêndios florestais, não apenas com mortes, mas também com impactos ambientais e económicos. Esses incêndios têm se tornado maiores e mais frequentes devido às mudanças climáticas, as vezes afetando áreas que anteriormente não eram acometidas por incêndios. Esses incêndios florestais evidenciaram a fragilidade das zonas de IUF. (Barbosa et al., 2022; Oliveira et al., 2020; Pastor et al., 2020; Pinto et al., 2017; Ribeiro et al., 2020; Scarponi et al., 2020; Tedim et al., 2018; D. X. Viegas et al., 2021).

Os incêndios de IUF são caracterizados como incêndios florestais de áreas rurais que afetam a área urbana. Assim, o combustível deixa de ser apenas natural e mescla-se ao combustível antrópico, tais como habitações, jardins, indústria, comércio e demais alterações feitas pelo homem.

Para a ocorrência de incêndios florestais são necessárias condições atmosféricas e do combustível florestal específicas, como: o baixo percentual de humidade no combustível florestal, vento e elevada temperatura. Em condições propícias para os incêndios de IUF, essas áreas possuem o risco iminente da ocorrência de prejuízos severos, sendo eles materiais e ambientais, além de mortes.

O histórico da média de área ardida tem aumentado em diversos países. Não só a área ardida tem aumentado, mas têm sido mais severos e devastadores os incêndios dos últimos 15 anos, tendo em vista os incêndios de 2017 em Portugal, 2018 na Grécia, 2009 e verão 2019/2020 na Austrália. Em paralelo, também tem crescido o número de habitações e infraestruturas em zonas de interface. Esse crescimento habitacional está ligado diretamente ao aumento dos

incêndios de IUF, pois entre as causas dos incêndios florestais, a atividade humana é fator preponderante. Loureiro (2018) afirma que na Europa a maior parte dos incêndios florestais são causados pela atividade humana, uma vez que, o incremento da densidade populacional em zonas de interface resulta em mais ignições, conforme identificado também nos EUA. Entre 1990 e 2010, foi verificado nos EUA que a população em zonas de IUF cresceu. Em 2010 havia 25 milhões de pessoas e 12,7 milhões de casas a mais quando comparado com 1990 (Caniço, 2018; Manzello et al., 2018; Radeloff et al., 2018).

A maior parte desses problemas são consequência de um desadequado ordenamento do território, devido, principalmente, à inexistência de uma delimitação clara dos aglomerados populacionais. Muitas casas possuem vegetação nas suas proximidades ou mesmo junto, vegetação que não é devidamente tratada colocando em risco as pessoas e as estruturas existentes. O crescimento demográfico nos grandes centros urbanos é responsável pela criação de novas zonas de IUF e pelo desadequado ordenamento do território (Loureiro, 2018; Ribeiro, 2016).

Em Portugal no ano de 2017 foi registada a maior área ardida e o maior número de vítimas humanas. Registos da Autoridade Nacional de Emergência e Proteção Civil (ANEPC) mostram que em 2017 mais de 539 mil hectares queimaram em Portugal, porém entre 2006 e 2015 os valores anuais não superaram 240 mil hectares, ou seja, em 2017 duplicou-se a área ardida num só ano em Portugal. Em outros países, nos últimos 15 anos, também foram verificados outros desastres como: incêndio florestal na Austrália em fevereiro de 2009, evento em que mais de 1000 estruturas arderam e 179 mortes ocorreram; no verão 2019/20, também na Austrália, cerca de 3 mil estruturas foram destruídas, com 33 mortes diretas, em sequência outras 400 mortes ocorreram relacionadas ao fumo. Por fim, nos EUA em média 2,8 milhões de hectares ardem por ano (Clarke et al., 2022; Loureiro, 2018; Manzello et al., 2018; Pordata.pt, 2022)

Há consenso entre os investigadores que os eventos florestais destrutivos provavelmente serão futuramente mais frequentes, porque a mudança climática está causando chuvas reduzidas e temperaturas médias mais altas em muitas regiões do planeta (Caniço, 2018; Koksall et al., 2019).

## 1.2 Acidentes e incidentes recentes com gás nos incêndios de IUF

Nesta secção, acidentes e incidentes recentes intimamente relacionados com o armazenamento de GPL na IUF são apresentados. Os casos apresentados tiveram informações coletadas de reportagens, relatórios do CEIF sobre incêndios ocorridos em Portugal, relatórios do projeto WUIVIEW o qual a ADAI/CEIF integrou e artigos. Destacam-se os casos ocorridos em Portugal e registados pela equipa do CEIF como significativos motivadores para esta tese.

Antes de iniciar a apresentação dos casos o conceito de acidente e incidente deve ser apresentado. Um acidente, conforme definido pela legislação portuguesa e norma ISO, é um evento indesejado que resulta em lesões, doenças ou morte. Geralmente ocorre em situações inesperadas e pode envolver danos corporais, permanentes ou temporários, além de uma redução na capacidade de trabalho. Por outro lado, um incidente é um acontecimento não planejado que tem o potencial de causar danos à saúde, segurança ou propriedade. Enquanto um incidente não resulta necessariamente em lesões corporais, doenças ou mortes, ele representa um risco iminente. Os incidentes podem incluir situações em que a segurança é comprometida ou em que danos materiais podem ocorrer, exigindo ações corretivas para evitar consequências mais graves (ISO 45001:2018; Lei nº 102/2009 ).

Nos 14 casos relatados a seguir, ocorridos em diversos países, estão presentes diferentes razões: combustíveis florestais ou artificiais próximos ao reservatório de GPL, incêndios de proporções maiores e menores, ausência ou presença de PRD e múltiplas garrafas estocadas. Como resultado, os casos tiveram diversas consequências tais como: presença ou não de vítimas, jato de fogo, explosão, colapso de estruturas ou apenas garrafas queimadas.

Há notícias de outros casos de acidentes com GPL na IUF devido aos incêndios florestais noticiados por diversos veículos de mídia e, de forma oral, por agentes de proteção civil, mas que carecem de registos precisos. Por exemplo, em incêndios maiores como os de 2017 em Portugal e os de 2018 na Grécia, a população relata ter ouvido diversas explosões. Contudo, nesta tese, apenas são apresentados eventos confirmados por fontes primárias.

Tabela 1: Resumo dos recentes acidentes e incidentes relacionados com GPL ocorridos na IUF durante incêndios florestais

Caso	Mortes	Tipo	Consequências	Ano	País
1	-	Garrafa	Explosão - Portas e janelas quebradas	2016	Portugal
2	-	Garrafa	4 Garrafas queimadas	2016	Portugal
3	1	Garrafa	Explosão - Colapso de parte da casa	2017	Portugal
4	-	Garrafa	2 Garrafas - uma explosão e outro jato de fogo	2017	Portugal
5	1	Garrafa	Explosão - Colapso do telheiro da cozinha	2017	Portugal
6	-	Garrafa	Explosão - Destruição de parte da casa	2017	Portugal
7	-	Garrafa	21 Garrafas - Explosões	2017	Portugal
8	-	Tanque	Jato de fogo	2016	Espanha
9	-	Tanque	Jato de fogo	2016	Espanha
10	-	Tanque	Jato de fogo	2018	Grécia
11	-	Garrafa	Explosão	2018	Grécia
12	-	Garrafa	5 Garrafas queimadas	2018	Espanha
13	-	Garrafa	Explosão - Colapso da estrutura	2015	Portugal
14	-	Tanque	Jato de fogo	2016	Estados Unidos

### 1.2.1 Casos 1 e 2: Incêndio no Funchal, Portugal, agosto, 2016

Em agosto de 2016, as condições climáticas causadas por um anticiclone no nordeste da Península Ibérica e uma depressão em Marrocos levaram o arquipélago da Madeira, entre 5 e 10 de agosto, a registar valores extremos de temperatura e humidade. No sul da Madeira a humidade do ar alcançou 10-20% e temperaturas próximas a 38°C. Em 9 de agosto foi registada a mais extrema condição climática: ventos que alcançaram 35 km.h<sup>-1</sup>, com rajadas de até 80 km.h<sup>-1</sup>; e temperatura mínima de 29,6°C, a qual é 3.7°C maior que a mínima mais alta já registada desde 1976 (IPMA, 2016; Ribeiro et al., 2017).

Em 8 de agosto, próximo das 15:30h, uma ignição ocorreu na zona florestal próxima a IUF, em Funchal. Devido à alta temperatura, baixa humidade e ventos fortes, o fogo florestal se espalhou para a IUF. O fogo se espalhou na parte superior da encosta e, devido a direção e força do vento, propagou-se para as laterais além de descer a colina em direção à área urbana, alcançando casas, uma unidade de tratamento de águas e um hotel de 5 estrelas. Em 9 de agosto, 36 casas arderam, 600 habitantes e o Hospital João Almada foram evacuados e 4 mortes ocorreram.

Em duas casas garrafas de GPL foram diretamente afetadas pelo fogo. Combustíveis florestais e não naturais estavam armazenados próximo à casa, levando as chamas às garrafas de GPL.

Na primeira casa (caso 1), uma garrafa foi atingida pelas chamas e explodiu, causando danos a portas e janelas devido ao BLEVE. Na segunda casa (caso 2), quatro garrafas estavam armazenadas e foram atingidas pelas chamas. A casa foi destruída pelo fogo, mas o BLEVE não ocorreu.

Nenhuma morte foi atribuída a esses dois casos.

### **1.2.2 Casos 3 e 4: Complexo de Incêndios de Pedrógão Grande, Portugal, junho, 2017**

O complexo de incêndios conhecido por Incêndio de Pedrógão Grande foi um dos maiores incêndios ocorridos em Portugal. Durante os incêndios foram registadas 66 mortes, aproximadamente 250 feridos e 45000 hectares arderam (Ribeiro et al., 2020). Esse grande incêndio foi causado por 5 diferentes ignições neste território, no mesmo dia (17 de junho), em diferentes zonas: Cabeças, Góis, Moninhos, Pardieiros e Pedrógão. Em 17 de Junho, o IPMA registou condições de seca em 80% do território português. A precipitação acumulada era menor que a mais baixa já registada desde 1970. O Fire Weather Index (FWI) era 26, o que para esta região significa um risco muito alto (Ribeiro et al., 2020; Viegas et al., 2017).

#### **Caso 3**

Na noite do dia 18 uma senhora invisual que vivia sozinha em uma casa em Balsa foi informada que um incêndio havia passado pelo lugar onde vivia, sem afetar diretamente a sua habitação. Durante a noite, no entanto, uma casa em ruínas próxima da sua ardeu propagando o fogo a um anexo da casa da senhora, onde uma garrafa de gás era mantida, sem que a senhora ou os vizinhos percebessem. Uma explosão destruiu parte da casa onde essa senhora vivia. A senhora veio a óbito (Viegas et al., 2017).

#### **Caso 4**

Uma caravana estava estacionada na zona do incêndio, em Louriceira. Ela era usada por um turista para férias de verão. Em 20 de Junho de 2020 o fogo alcançou a caravana pelas 17h. Uma explosão foi ouvida por bombeiros que estavam nas proximidades, também viram fumo denso e preto. Poucos segundos antes da explosão, um avião que estava largando água reduziu a altitude para a coleta e não foi visto subir devido ao fumo da explosão. Com isso, os bombeiros reportaram ao comando a queda do avião. Uma equipa de busca e salvamento foi enviada, mas ao chegar ao local, perceberam que a explosão fora causada por duas garrafas de GPL que estavam dentro da caravana. A primeira garrafa explodiu e fragmentou-se. A segunda foi atingida pela primeira explosão causando uma fissura pela qual um jato de fogo (também usado o termo em inglês *jet fire*) foi formado, queimando o gás que estava no interior (Viegas et al., 2017).

#### **1.2.3 Casos 5 - 7: Incêndios de outubro de 2017, Portugal**

Devido ao período de seca prolongado, o mesmo citado no caso 3, combinado com o furacão Ophelia (nível 2-3 na escala de Saffir-Simpson), que causou fortes ventos, as ignições causadas em 15 de outubro propagaram-se rápido. Outubro de 2017 foi o mais quente desde 1931 e o mais seco desde 1997. Entre 15 e 16 de outubro, 220 mil hectares arderam. Nesses dias foi registado o valor da humidade do combustível de 10% e, em alguns pontos do território português, valores de 5% também foram encontrados. O FWI registado foi 82 (máximo absoluto de risco) e 532 ignições foram registadas em 15 de outubro. A seca e os fortes ventos contribuíram para o incêndio com a maior área queimada. Nesse incêndio foram registadas 51 mortes (Viegas et al., 2019).

Os casos 5 a 7 ocorreram durante os Incêndios de Outubro de 2017.

**Caso 5**

Uma casa ao meio de uma encosta foi atingida pelas chamas em Oliveira do Hospital. O fogo subiu a encosta e se tornou mais intenso devido ao declive. A casa tinha paredes de pedra as quais resistiram às chamas. Contudo, a cozinha e o seu teto foram destruídos. Uma garrafa de GPL foi encontrada nas ruínas e a ela foi atribuída a causa da destruição da cozinha. Uma morte ocorreu nesse caso e o BLEVE da garrafa pode ter sido a causa (Viegas et al., 2019).

**Case 6**

Próximo às 16 horas do dia 15 de outubro de 2017 o fogo alcançou uma pequena vila chamada Vale do Laço. Habitantes locais e bombeiros estavam tentando salvar a si, casas e pertences. O fogo alcançou uma casa construída no declive, próximo ao combustível florestal. Após a supressão das chamas, bombeiros e vizinhos sugeriram aos dois moradores da casa que a deixassem e fossem para o centro da cidade. Porém, os dois moradores permaneceram na casa. Horas depois, fumo foi visto no sótão, provavelmente causado por brasas levadas pelo vento que entraram pela janela aberta. Durante a tentativa de apagar esse novo incêndio, um dos moradores faleceu. No dia seguinte, uma garrafa de GPL explodiu e provocou o colapso de parte da casa que teve que ser demolida (Viegas et al., 2019).

**Case 7**

Um armazém foi destruído pelo fogo em Oliveira do Hospital, entre os dias 15 e 16 de outubro. Pelo menos 21 garrafas de GPL com volume de aproximadamente 26 litros, contendo até 13 kg de butano ou 11 kg de propano estavam armazenadas no estabelecimento. Com isso, até 271 kg de GPL poderia estar armazenado, colocando em risco a vizinhança. Foram registadas múltiplas explosões, com projeção de estilhaços e de material incandescente. Apesar disso, nenhuma morte foi atribuída a esse caso (Viegas et al., 2019).

#### **1.2.4 Casos 8 e 9: Benitatxell, Espanha, setembro, 2016**

Este incêndio foi causado por um incendiário em um dia com temperatura de 35°C, humidade relativa inferior a 25% e ventos com rajadas de 52 km·h<sup>-1</sup>. Durante o incêndio, cerca de 1400 pessoas foram evacuadas, 470 receberam cuidados médicos e 200 estruturas foram afetadas. Dessas estruturas, 3 foram severamente danificadas. A área queimada foi de 898 hectares (Caballero et al., 2019; Rodríguez-García et al., 2022; Vacca et al., 2020).

Nos casos 8 e 9 dois reservatórios, em locais diferentes na área deste incêndio, mantidos próximos a combustíveis florestais, foram afetados. Em ambos os casos foram registados jatos de fogo. Devido a presença de PRD em ambos, o BLEVE não ocorreu (Caballero et al., 2019; Scarponi et al., 2020).

#### **1.2.5 Casos 10 e 11: Mati, Grécia, julho, 2018**

O incêndio de Mati em julho de 2018 é citado como sendo o desastre natural mais letal da história do estado grego moderno. O fogo iniciou em uma floresta das imediações de Ntaou na montanha Peneli, a aproximadamente 20 km a nordeste de Atenas. A temperatura em 23 de Julho era de 40 °C, humidade relativa de 19% e rajadas de vento de até 100 km·h<sup>-1</sup>. O fogo causou 100 mortes, 200 feridos e destruiu 998 estruturas (Caballero et al., 2019; Efthimiou et al., 2020; Molina-Terrén et al., 2019; Pamos et al., 2021; Tedim et al., 2020; Vacca et al., 2020).

Durante esse incêndio, muitas explosões foram reportadas e ao menos 2 casos com GPL foram confirmados. No primeiro (caso 10), um jato de fogo, foi relacionado com um reservatório de 1 m<sup>3</sup> (ou superior). E o outro, caso 11, é referente a uma garrafa de GPL. Em ambos casos os reservatórios foram severamente danificados (Caballero et al., 2019).

#### **1.2.6 Caso 12: Llutxent, Espanha, agosto, 2018**

O incêndio iniciou-se em um declive no município de Llutxent em 6 de agosto. A ignição foi causada por uma trovoadas com 5 incêndios registados em simultâneo. A área

queimada foi de 3270 hectares, 163 pessoas foram evacuadas, 50 estruturas foram afetadas e 10 casas foram destruídas. Nenhuma morte foi registada. Cinco garrafas de GPL foram encontradas queimadas em um alpendre. Nenhum BLEVE foi registado (Caballero et al., 2019).

### **1.2.7 Caso 13: Quinta do Colaço, Portugal, agosto, 2015**

O incêndio ocorreu durante o verão de 2015, no distrito de Coimbra, iniciando-se na Quinta do Colaço às 12:42h, alcançando os municípios de Almalaguês, Ceira, Semide e Rio de Vide. A área queimada foi de 5500 hectares. Mais de 722 agentes de proteção civil trabalharam para suprimir o incêndio. Às 16:12h o suporte aéreo reportou outros 7 focos secundários.

Uma pequena construção, provavelmente uma oficina, próxima a árvores, foi atingida pelo fogo, possivelmente devido a um dos focos secundários. Garrafas de gás estavam armazenadas e uma delas explodiu. Há indícios de que as garrafas eram usadas para trabalhos empregando acetileno e oxigênio. Devido ao BLEVE, toda a estrutura da provável oficina colapsou (Almeida, 2015).

### **1.2.8 Caso 14: Calabasas, Estados Unidos da América, junho, 2016**

Durante o verão de 2016, um incêndio de superfície ocorreu ameaçando casas em Calabasas, Califórnia. A área queimada foi 208 hectares. Devido ao fogo, evacuações obrigatórias foram feitas em Calabasas Highlands, Eddingham e Adamsville, e evacuações voluntárias em áreas adjacentes conduziram 5 mil pessoas para fora de suas casas. O incêndio espalhou-se rapidamente através da vegetação arbustiva, devido ao relevo com declives. O incêndio alcançou um complexo escolar queimando construções anexas e aquecendo um reservatório com propano. Um grande jato de fogo foi formado (Bartholomew, 2016; Scarponi et al., 2020; Weber, 2016).

## 1.3 Considerações Iniciais

### 1.3.1 Normas

Existem reservatórios de GPL com diversas capacidades de armazenamento fabricados sob as normas europeias (European Committee for Standardization, 2018, 2017, 2012): garrafas com 11, 12, 13 e 45 kg de GPL, além de algumas com menor volume, usados para campismo. Em Portugal, os dois tipos mais comuns são as garrafas fabricadas em metal e em compósito, tendo de 11 a 13 kg de GPL. As garrafas de metal são completamente fabricados em metal, enquanto as garrafas de compósito são fabricadas com 3 camadas de diferentes materiais sobrepostas: a primeira e mais externa é fabricada com polietileno (PE), ela contém as estampas da marca e alças; a segunda camada, intermédia, é feita com filamentos de polipropileno (PP) e fibra de vidro (FV); e a camada mais interna é metálica, possuindo uma fina espessura (Figura 1.1). Assim, existe grande diferença de materiais, propriedades e comportamento quando essas garrafas são expostas ao fogo.



Figura 1.1: As camadas da garrafa compósito.

Existem diversas configurações de garrafas de gás comercializadas em Portugal: com e sem dispositivo de alívio de pressão (Pressure Release Device -PRD); fabricadas em metal ou em compósito; armazenando gás butano ou propano. As garrafas compósitas são comercializadas contendo butano, enquanto as garrafas metálicas são comercializadas contendo butano ou propano. As garrafas compósitas contendo butano são comercializadas com PRD, sendo recomendadas para uso doméstico. Contudo, em verdade, ainda que os comerciantes de GPL não recomendem o uso doméstico de propano, as pessoas usam o butano e o propano nas habitações. Até a conclusão desta tese, garrafas metálicas contendo propano podem ser vendidas com ou sem PRD, e se são usados em habitações, inclusive na IUF, podem tornar-se perigosos quando um incêndio ocorre. A PRD acoplada à garrafa não é selecionada pelo fabricante da garrafa, mas selecionada pelo comerciante do gás, sob a EN 15995 (2018).

Em relação à norma de construção, a garrafa compósita é fabricada de acordo com a EN 12245:2009:+A1. As garrafas fabricadas em metal, sob a norma EN 1442 (2018), possuem a capacidade expansão do volume antes da rotura, devido à dilatação do metal, de no mínimo 20% do volume original (Figura 1.2).



Figura 1.2: Garrafas metálicas com volume expandido após aquecimento e zona de rotura no topo da garrafa.

As normas EN 15995-2018, EN 1442-2018 e EN 12245:2009+A1 desempenham um papel fundamental na garantia da qualidade, desempenho e segurança das garrafas de GPL. Essas normas são fundamentais uma vez que estabelecem critérios rigorosos de teste e requisitos de segurança para esses recipientes.

A Norma Portuguesa NP EN 15995:2018, intitulada “Garrafas para gás - Especificações e ensaios para válvulas de garrafas de GPL - Fecho manual”, é uma referência importante no âmbito da garantia da qualidade e da segurança das válvulas utilizadas em garrafas de GPL.

Esta norma desempenha um papel fundamental ao estabelecer critérios rigorosos de projeto, construção e ensaios para as válvulas. Ela visa garantir que esses componentes atendam a requisitos técnicos e funcionais, proporcionando um desempenho confiável e seguro durante o uso.

No que diz respeito aos ensaios de qualidade, a NP EN 15995:2018 define métodos específicos para verificar o desempenho das válvulas. Esses ensaios incluem testes de torque, que avaliam a resistência mecânica e a capacidade de vedação da válvula quando submetida a forças de aperto. Além disso, são realizados ensaios de resistência à pressão para garantir que a válvula possa suportar as condições operacionais e manter a integridade estrutural. Ensaios de vazamento são conduzidos para verificar se a válvula mantém a estanqueidade adequada quando exposta a pressões específicas.

A norma também aborda aspetos importantes relacionados à compatibilidade química das válvulas com o GPL, considerando a natureza do gás e os materiais utilizados na construção das válvulas. Essa abordagem visa minimizar os riscos de corrosão, degradação química e vazamentos que possam comprometer a segurança do sistema. Outro aspeto relevante abordado pela NP EN 15995:2018 é a marcação das válvulas. A norma estabelece requisitos específicos para a identificação adequada das válvulas, incluindo informações essenciais para a rastreabilidade e a segurança do produto.

A NP EN 1442:2018, intitulada “Equipamentos e acessórios para GPL - Garrafas de aço soldado transportáveis e recarregáveis para gases de petróleo liquefeitos (GPL) - Conceção e construção”, estabelece os requisitos técnicos e os critérios de projeto e construção para garrafas de aço soldado utilizadas no transporte e armazenamento de GPL. Ela estabelece diretrizes detalhadas para a conceção e a construção dessas garrafas, levando em consideração aspetos como materiais, capacidade, resistência mecânica, estanqueidade, proteção contra corrosão, identificação e marcações.

Essa norma especifica requisitos técnicos abrangentes, como as dimensões das garrafas, a espessura mínima da parede, os critérios para a soldagem das partes constituintes e os requisitos

para os acessórios e componentes associados, como válvulas, tampas, dispositivos de alívio de pressão, entre outros. Estão incluídos ensaios hidrostáticos para verificar a resistência à pressão interna, ensaios de impacto, ensaios de vazamento, entre outros. Esses ensaios são essenciais para garantir que as garrafas atendam aos requisitos de segurança e possam suportar as condições de uso previstas.

No que diz respeito à norma EN 12245:2009+A1, intitulada “*Transportable gas cylinders - Fully wrapped composite cylinders*”, ela é uma equivalente a EN 1442, mas destinada às garrafas compósitas.

No âmbito legal alguns decretos e portarias regulamentam os critérios de armazenamento e distribuição de GPL. O Decreto-Lei 97/2017, trata das normas relativas aos elementos de projeto, execução, manutenção e inspeção de instalações de gás em edifícios e exclui as garrafas de gás de propano e butano. A Portaria 459/2001, trata das instalações de armazenagem de GPL de até 200 m<sup>3</sup> por reservatório. A Portaria 451/2001 é específica e trata da segurança das instalações dos parques de garrafas de GPL. O Regulamento 737 de 2019 refere-se ao processo de armazenagem, recolha e troca de garrafas de gás de petróleo liquefeito (GPL) entre operadores. Dentre as normas citadas, não há referência de procedimentos a serem seguidos pelos utilizadores individuais das garrafas em moradias, seja em área urbana, rural ou de IUF, entretanto existem recomendações disponibilizadas pelos fabricantes.

Na Figura 1.3, garrafas metálicas e compósitas após incêndios são mostradas. Na Figura 1.3(b) pode ser visto um garrafa compósita sem a camada exterior. Na Figura 1.3(c) uma garrafa metálica após explosão é mostrada. Por fim, na Figura 1.3(e), diversas garrafas são apresentadas e pode-se notar que a rotura ocorreu maioritariamente na parte superior das garrafas, o que também pôde-se visto na Figura 1.2. A questão de uma zona mais provável para a rotura é abordada nos itens 1.4 e 5.1.4 desta tese.

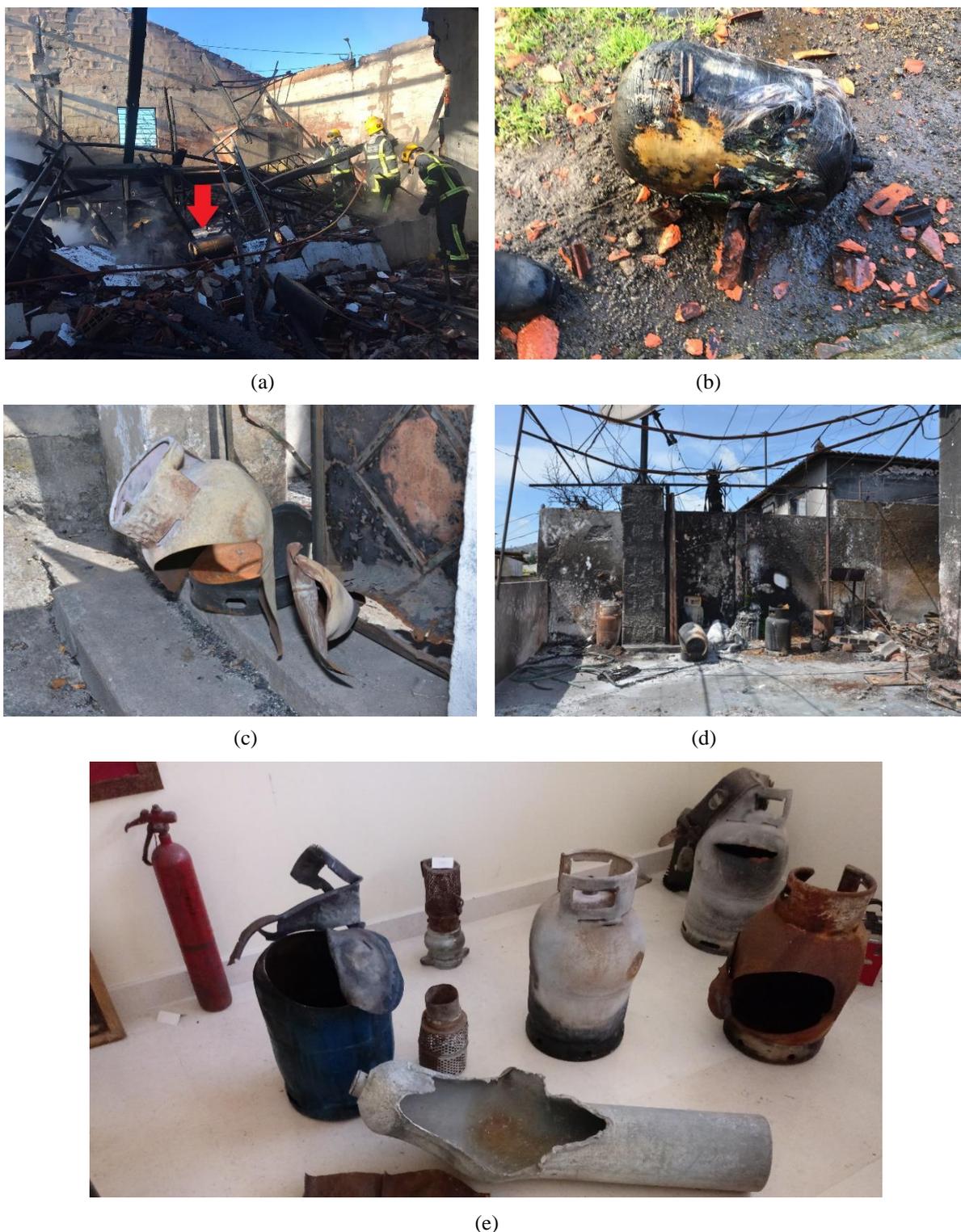


Figura 1.3: Fotografias de diversos casos de incêndios que envolveram garrafas de GPL; (a) e (b) Incêndio em armazém em Freamunde com garrafas compósitas (2020 – crédito aos Bombeiros de Freamunde; (c) e (d) Incêndio em Funchal e respetivas garrafas metálicas após exposição ao fogo (2016 - crédito David Caballero); (e) Garrafas diversos coletados pelos Bombeiros de Miranda do Corvo.

### 1.3.2 GPL na IUF

O GPL engarrafado é amplamente usado em Portugal para diferentes usos tais como cozinhar, aquecimento de água e aquecimento da habitação (Heymes et al., 2013; Scarponi et al., 2020). Como a maioria das áreas rurais e áreas de IUF não têm gás canalizado, quando um incêndio ocorre na IUF, as garrafas de GPL tornam-se um perigo para as pessoas devido ao aquecimento da energia nelas armazenada e o risco de liberação rápida dessa energia. Então, se uma garrafa de GPL é exposta ao fogo, isso pode causar graves acidentes. Desde 2016, têm ocorrido muitos acidentes causados por incêndios, inclusive na IUF, relacionados ao armazenamento de GPL em reservatórios de diferentes tamanhos (Barbosa et al., 2022; Scarponi et al., 2020). Dentre esses acidentes, os mais críticos ocorreram em Espanha, Califórnia, Grécia e outros também em Portugal como: Funchal, 2016; Pedrógão, 2017; Incêndios de Outubro, 2017).

Nas zonas de IUF os habitantes podem adotar medidas simples e eficazes de segurança, entretanto muitas vezes não as adotem, inclusive (e maioritariamente) por falta de informação. Desse modo as garrafas e reservatórios contendo GPL são armazenados de forma indevida, sendo colocados próximos dos combustíveis florestais e artificiais nas imediações das habitações (Figura 1.4). Essa situação é um risco para: os habitantes da edificação, por não conhecerem o comportamento e efeitos de um reservatório de gás sob fogo; os agentes de proteção civil, por atuarem em uma habitação sob risco de haver uma explosão e muitas vezes sem saber a massa de gás desse reservatório e a localização dele, podendo prejudicar a estratégia e a tomada de decisão.



(a)



(b)



(c)



(d)



(e)



(f)



(g)

(h)

Figura 1.4: Reservatórios de GPL com diversos tamanhos mantidos próximos a combustíveis florestais em diferentes localidades de Portugal- (a) Estrada da Beira N17; (b) Lousã; (c) Arregadas de Cimeira; (d) Salgueiro da Ribeira; (e) Lousã; (f) e (g) Coimbra; (h) Manteigas.

A avaliação da vulnerabilidade dos reservatórios é um ponto importante na segurança e isso está diretamente relacionado com: a arquitetura residencial, o local onde o reservatório será colocado, a distância dele em relação aos combustíveis florestais; a legislação que define a distância mínima entre reservatórios de GPL e a vegetação. Duas metodologias para avaliar a vulnerabilidade dos reservatórios foram propostas (Ricci et al., 2021; Scarponi et al., 2020). A mais recente, divide a avaliação em 4 etapas: a primeira é a caracterização da fonte de chamas; a definição da carga térmica que chega ao alvo; a estimativa para o tempo de falha; por último, a definição da distância segura. No âmbito legal, não há uma normalização europeia em sobre a distância dos reservatórios de GPL em relação às habitações Os estados-membro possuem legislações distintas, com diferentes usos da terra, diferentes climas e há uma diferença significativa na legislação referente às distâncias seguras de reservatórios domésticos de GPL, inclusive entre países da União Europeia com perigos similares (Pastor et al., 2020; Scarponi et al., 2020).

Em verdade e em fechamento das considerações iniciais, deve-se referir que as garrafas de GPL são bem construídas e não são bombas a mercê da aleatoriedade. Também, não foi encontrado pelo autor desta tese, casos em que a explosão de garrafas de gás tenha ocorrido por falha no fabrico. O seu fabrico segue rigorosos critérios de qualidade e de segurança. Contudo, tal como tudo que é fabricado na engenharia, as garrafas atendem a determinado uso e

armazenamento. O risco está principalmente ligado, mas não somente, à exposição prolongada destes reservatórios às chamas, que em um incêndio têm grande intensidade.

#### **1.4 BLEVE: uma visão geral**

Os reservatórios de GPL, quando submetidos ao fogo, têm um aumento da pressão interna devido ao aumento da fase gasosa com redução da fase liquefeita. Ainda que as garrafas e reservatórios possuam PRD, a estrutura do reservatório pode colapsar devido principalmente a dois fatores: o primeiro é que após abertura da PRD, a taxa de aquecimento e aumento da pressão pode ser grande o suficiente ao ponto de o caudal do gás através da PRD não ser suficiente para reduzir a pressão; e o segundo fator são as falhas na estrutura do reservatório causadas principalmente pelo estresse térmico. O tempo de exposição às chamas é um fator fundamental para a segurança, quanto mais demorada for a exposição, maior será o estresse causado na estrutura do material.

O rompimento da estrutura do reservatório pode causar severos danos a edificações e também mortes. As explosões em reservatórios pressurizados são registadas e estudadas há décadas para prevenir perdas humanas e económicas. O BLEVE é o principal fenómeno associado a acidentes envolvendo o armazenamento de gases inflamáveis. Há registos de casos de BLEVE desde o ano de 1926 (Abbasi and Abbasi, 2007).

O BLEVE ocorre em reservatórios pressurizados contendo líquidos inflamáveis e não inflamáveis. Por exemplo, num reservatório contendo fluidos não inflamáveis, como a água pressurizada ou dióxido de carbono e num reservatório contendo um gás inflamável, como o propano. A diferença de um BLEVE ocorrido em um reservatório com fluido inflamável para o BLEVE ocorrido em um reservatório com fluido não inflamável é a presença da vaporização explosiva (*fireball*). A bola de fogo (frequentemente usado o termo em inglês *fireball*) ocorrerá quando, após a rotura desse reservatório, o fluido inflamável armazenado a uma grande pressão expandir do interior pressurizado do reservatório para o exterior à pressão atmosférica, entrando em contato com a energia para a ignição, geralmente devido ao fogo. Contudo, diferente da bola de fogo, os efeitos de sobrepressão e lançamento de fragmentos podem estar presentes nos mais diversos eventos de BLEVE. Por isso, esse fenómeno tem três principais efeitos: radiação

térmica (se o fluido é inflamável), sobrepressão e lançamento de fragmentos (Casal and Salla, 2006; Crowl and Louvar, 2001; Behrouz Hemmatian et al., 2017; Planas-Cuchi et al., 2004; Stawczyk, 2003).

A magnitude dos efeitos do BLEVE depende de fatores como: as propriedades físico-químicas do fluido e a massa armazenada. Quanto maior sejam a massa armazenada e a entalpia de combustão, maior é a magnitude dos efeitos: maior bola de fogo e radiação, maior sobrepressão e maior alcance dos fragmentos lançados.

Dentre as causas do BLEVE, a mais frequente é a presença de chamas (Casal and Salla, 2006; Planas-Cuchi et al., 2004; Stawczyk, 2003). Por isso, o BLEVE é frequentemente associado a incêndios nas proximidades dos reservatórios. Contudo, esse severo evento pode ocorrer também devido a: corrosão, sobre enchimento do reservatório, colisão no reservatório pressurizado (impactos devido à movimentação de cargas, descarrilamento de comboios que transportam combustíveis, e tombamento de caminhões que transportam combustíveis nas rodovias). O BLEVE, quando esse fenômeno ocorre devido a chamas, é sintetizado abaixo com informações de diversos autores (Abbasi and Abbasi, 2007; Crowl and Louvar, 2001; B. Hemmatian et al., 2017; Behrouz Hemmatian et al., 2017; Heymes et al., 2013; Manu et al., 2009; Planas-Cuchi et al., 2004):

- a) Enfraquecimento da estrutura do reservatório causado pelo estresse térmico (alta temperatura e gradiente térmico). Devido ao facto de as fases líquida e gasosa terem capacidades de troca térmicas diferentes, a parede do reservatório em contato com o líquido estará a uma temperatura consideravelmente inferior à parede em contato com a fase gasosa. Há, portanto, um gradiente de temperatura da base do reservatório até o topo (com maior temperatura), tornando, inclusive, a superfície em contato com o gás, na parte superior, a área mais provável para a rotura do material por estar submetida a maior estresse (Figura 1.2);
- b) Aquecimento do fluido - aumento da fase gasosa e redução da fase líquida causando o aumento da pressão interna e, conseqüentemente, o aumento das tensões na estrutura do reservatório que está sendo simultaneamente fragilizada devido à alta temperatura;

- c) Rotura da estrutura do reservatório causando a expansão do gás liquefeito para o exterior. O líquido que antes da rotura estava pressurizado e ocupava um volume inicial e menor, vaporizará e expandirá abruptamente à pressão ambiente;
- d) Em contato com a fonte de ignição, sendo o fluido armazenado um fluido inflamável, ele inflamará rapidamente libertando grande quantidade de calor;
- e) Onda de sobrepressão, sendo geralmente uma deflagração (subsônica);
- f) Lançamento de fragmentos da estrutura do reservatório e de estruturas adjacentes a longas distâncias.

Poucos estudos experimentais usando garrafas de GPL, sejam veicular ou doméstica, foram publicados. Também foram realizados testes com reservatórios maiores, com capacidade entre 1 e 3 m<sup>3</sup>. Todos os reservatórios usados nesses estudos foram fabricados em metal (Heymes et al., 2013; Stawczyk, 2003; Tschirschwitz et al., 2018, 2017). As garrafas fabricadas em compósito não foram avaliados em estudos anteriores.

O propano é um alceno menor que o butano, e é um gás com maior pressão de vapor que o butano. À temperatura ambiente (10-35°C), uma garrafa contendo propano pode ter pressão até 6 vezes maior que uma garrafa contendo butano (Figura 1.5). A maior pressão torna, a princípio, a garrafa com propano mais perigosa pois, sob aquecimento, haverá uma maior taxa de aumento de pressão. Existem poucos artigos anteriores ao presente trabalho, relacionados com testes experimentais com reservatórios de GPL expostos ao fogo, e não foi avaliada a presença e ausência de PRD em garrafas fabricadas em material compósito (Stawczyk, 2003; Tschirschwitz et al., 2018, 2017). Essas questões são abordadas nesta tese.

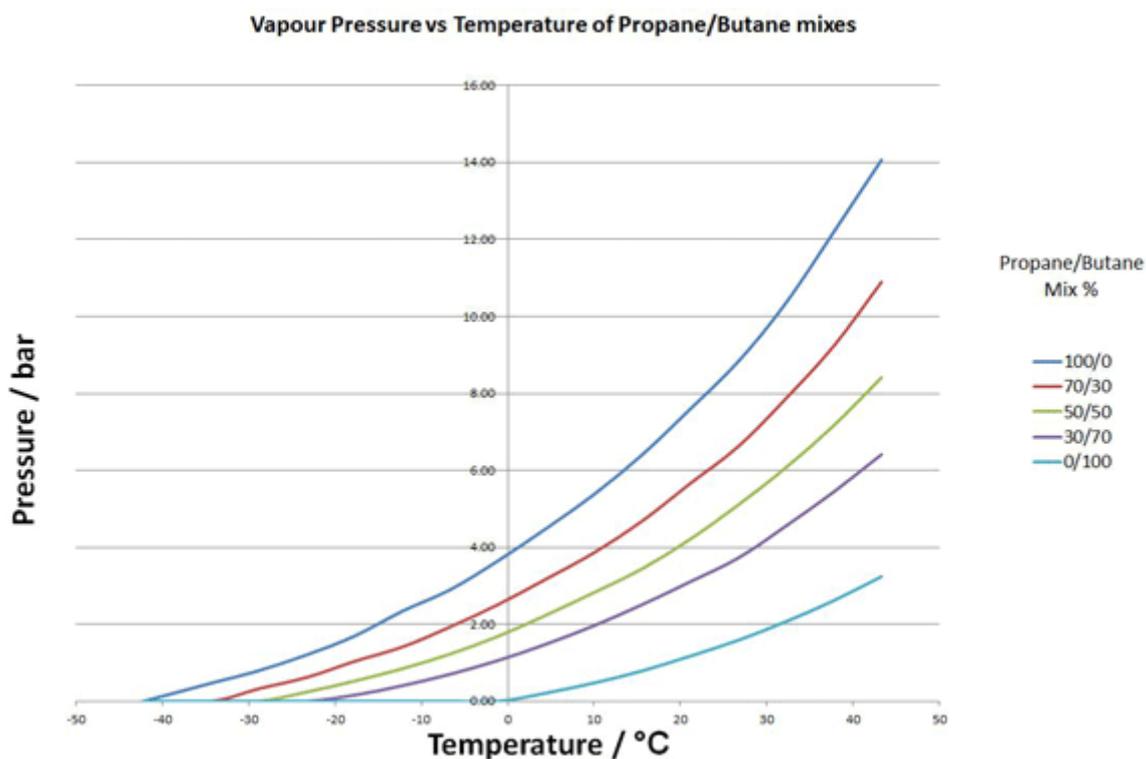


Figura 1.5: Diagrama Pressão x Temperatura para o butano, propano e suas misturas - imagem cedida por um fornecedor de GPL.

O BLEVE pode ser evitado se o reservatório tiver uma PRD mas, em alguns casos, a PRD pode não ser suficiente quando a dose de calor recebida pelo reservatório for muito alta. A PRD muda o evento do BLEVE para outro menos severo, o jato de fogo. Contudo, ambos podem causar efeitos dominó.

Existem diversos métodos para estimar os principais efeitos do BLEVE que são: sobrepressão; radiação; lançamento de fragmentos; além da estimativa da dimensão da bola de fogo, tal como a sua altura e diâmetro. Esses métodos são abordados no item 2 desta tese.

## 1.5 O trabalho desenvolvido nesta tese: uma visão geral

O tema desta tese se iniciou devido aos acidentes envolvendo o armazenamento de GPL ocorridos em Portugal durante os grandes incêndios florestais, nomeadamente: Incêndio em

Funchal (2016), Complexo de Incêndios de Pedrógão Grande (2017) e Incêndios de 15 outubro (2017). Estes acidentes causaram mortes e o colapso de estruturas.

Na primeira etapa deste trabalho foi feita uma revisão com o objetivo de encontrar acidentes e incidentes ocorridos na IUF relacionados com o armazenamento de GPL. Com isso, foram encontrados 14 casos os quais ocorreram tanto em Portugal como em outros países, sendo a maioria na região mediterrânea da Europa. A conceção de uma proteção para as garrafas de GPL ocorreu nesta etapa.

Na sequência, segunda etapa, outra revisão da literatura foi feita a fim de entender os fenómenos relacionados ao aquecimento do reservatório de GPL, seus efeitos quando ocorre o colapso da estrutura do reservatório ou o jato de fogo, além das respetivas estimativas: radiação térmica, sobrepressão e fragmentação.

Na terceira etapa, a revisão da literatura esteve relacionada ao uso da ferramenta da dinâmica dos fluidos computacional (CFD), em alternativa aos métodos da segunda etapa, para a predição dos efeitos do jato de fogo e da pressão do reservatório sob aquecimento. O mesmo método computacional pode ser usado para diferentes reservatórios, sendo inclusive uma ferramenta para a análise de riscos.

A fim de planear os testes experimentais com GPL, na quarta etapa foi feita outra revisão da literatura para assimilar os métodos experimentais feitos por outros autores e uni-los à experiência que o CEIF já possuía. Desta forma, optou-se pela segurança, pois através de uma análise de risco usando os métodos da segunda etapa e também de resultados obtidos por outros autores coletados na presente etapa, os efeitos decorrentes dos testes poderiam ser graves à saúde dos membros da equipa e da comunidade vizinha ao LEIF. Assim, foram feitos testes preliminares com garrafas de GPL cheias com água e também vazias para adaptar e assimilar o método de ensaio e posteriormente aplicá-lo nos testes com as garrafas contendo GPL. Os testes preliminares com garrafas contendo água e com garrafas vazias foram feitos no LEIF e não são descritos neste trabalho, pois já são descritos os testes com GPL os quais são objeto da tese.

A quinta etapa refere-se às simulações usando CFD. Esta etapa foi iniciada antes das seguintes. Contudo, ocorreu também simultaneamente as próximas etapas.

Os testes experimentais contendo GPL ocorreram na sexta etapa e envolveram outras entidades externas à ADAI e a Universidade de Coimbra. Foi feito o contato com: uma empresa

que é proprietária de uma pedreira, considerando a impossibilidade de levar as garrafas à explosão nas áreas do LEIF; a Câmara Municipal de Miranda do Corvo; a Proteção Civil de Miranda do Corvo e; os Bombeiros Voluntários de Miranda do Corvo.

A proprietária da pedreira permitiu uma visita às instalações para apresentação dos locais permitidos para os testes futuros e requereu uma minuciosa análise de risco e a permissão da Proteção Civil. Por fim, os testes de campo com GPL foram feitos na pedreira e planeados junto ao comandante e ao adjunto de comando dos Bombeiros Voluntários de Miranda do Corvo.

A sétima etapa, novamente experimental, ocorreu no LEIF. Foram feitos testes do jato de fogo para medição da radiação e da forma. Também foram feitos os testes da proteção das garrafas idealizada na etapa 1.

Na penúltima etapa foram comparados os métodos de estimativa e CFD (etapas 2 e 3 respetivamente) com os resultados experimentais.

Por fim, através das informações reunidas no âmbito desta tese (resultados das estimativas, resultados experimentais, resultados da proteção desenvolvida e das informações de outros autores coletadas nas etapas de revisão da literatura), foram feitas recomendações de segurança para os agentes de proteção civil e usuários (Apêndice A).

Esta tese também contou com a disseminação do conhecimento. Dois trabalhos foram apresentados na 9<sup>th</sup> *International Conference on Forest Fire Research* (ICFFR 2022). Sendo o primeiro sobre os 14 acidentes e incidentes ocorridos na IUF durante incêndios florestais. O segundo é referente à apresentação do dispositivo de proteção para as garrafas. Além dos trabalhos apresentados na ICFFR, um artigo foi publicado na revista *Fire* MDPI, em 2022, com título *A Protection for LPG Domestic Cylinders at Wildland-Urban Interface Fire*. Um segundo artigo está publicado no *International Journal of Wildland Fire* com título *LPG Stored at Wildland Urban Interface: the recent events and the effects of jet fires and BLEVE*. Por fim, um terceiro artigo está sob revisão na revista *Processes* com o título *Heat-induced increase of LPG pressure: experimental and CFD prediction study*.

Outro documento de disseminação do conhecimento é o já citado Apêndice A, que tem o objetivo de ser um documento menos científico, apresentando as principais recomendações à sociedade e aos agentes operacionais, relativamente ao uso e segurança do GPL, com linguagem de amplo alcance, para ser lido e entendido por toda a comunidade.

## 2 MÉTODOS DE ESTIMATIVA E EFEITOS

Os efeitos do aquecimento de reservatórios de GPL na IUF são similares aos efeitos ocorridos em acidentes industriais, guardadas as devidas proporções do volume de matéria armazenada. Então, os fenômenos como sobrepressão, bola de fogo, fragmentação e jato de fogo também ocorrem em garrafas e em maiores reservatórios de GPL na IUF.

Com isso, os métodos de estimativa dos efeitos os quais são usados na segurança de processos industriais – e comunidades vizinhas a essas instalações - amplamente presentes na literatura e devidamente referenciados à medida que são apresentados nesta tese, também podem ser aplicados aos casos de gases armazenados na IUF.

Esses métodos já presentes na literatura serão usados nesta tese e são descritos nos itens 2.1 a 2.5.

### 2.1 Energia disponível e sobrepressão

Com a rotura do reservatório pressurizado uma grande quantidade de energia é liberada. A energia contida no reservatório é dissipada: rompendo a estrutura do material e lançando fragmentos; e transformando-se em som, radiação térmica, sobrepressão, além de outras formas.

Considerando os efeitos do BLEVE a curtas distâncias, para o caso das garrafas de GPL a distâncias menores que 5 metros, a sobrepressão pode levar a efeitos severos no corpo humano e em estruturas.

Para o corpo humano, tendo em conta que ele é formado maioritariamente por água e sendo a água para esse caso incompressível, o corpo tende a ter uma considerável resistência ao impacto causado pela onda de sobrepressão. Contudo, os pulmões e os ouvidos, órgãos que contêm ar, sofrem severamente com a ação da sobrepressão, podendo levar a hemorragias pulmonares e ao rompimento do tímpano.

Para as estruturas, os efeitos também são severos, podendo colapsar paredes, portas, janelas, telhado, além de arremessar móveis e pessoas. Para garrafas cheias, em curtas distâncias

(inferiores a 2 metros), máquinas pesadas podem ser movidas (Casal, 2008; Crowl and Louvar, 2001).

Para a estimativa da sobrepessão é necessário conhecer a energia armazenada no momento imediatamente anterior à explosão.

Dentre os métodos de estimativa da energia disponível, modelos considerando gás real ou ideal, processo irreversível ou isentrópico, estão disponíveis e são sumarizados por B. Hemmatian et al. (2017). Os métodos Real Gas Behaviour and Adiabatic Irreversible Expansion (RAIE) (Planas-Cuchi et al., 2004) e o Super Heating Energy (SE) (Casal and Salla, 2006), são descritos por terem uma maior aproximação com a realidade (B. Hemmatian et al., 2017). Existe ainda um método polinomial desenvolvido por B. Hemmatian et al. (2017) para os 10 fluidos com maior taxa de ocorrência de BLEVE. Este método é mais simples por não precisar que o usuário insira as propriedades termodinâmicas do fluido, sendo necessário apenas saber o grau de enchimento do reservatório (%FD) e a temperatura do vapor [K] no momento imediatamente antes da explosão.

Seja pelo método polinomial, RAIE ou SE, todos para gases reais, após estimar a energia contida no reservatório, deve ser feita a conversão para massa equivalente de trinitrotolueno (TNT).

Nesta tese é usado o método polinomial para a estimativa da densidade energética ( $\epsilon$ ) [ $\text{MJ} \cdot \text{m}^{-3}$ ] do butano e do propano. Um polinômio para cada gás é apresentado abaixo.

Para o propano:

$$\epsilon = 43.97 - 213.9 \cdot FD - 0.152 \cdot T + 1.349 \cdot FD \cdot T - 0.0004361 \cdot T^2 - 0.002045 \cdot FD \cdot T^2 + 1.55 \cdot 10^{-6} \cdot T^3 \quad (\text{Eq. 1})$$

Para o butano:

$$\epsilon = 21.32 - 87.2 \cdot FD - 0.136 \cdot T + 0.4765 \cdot FD \cdot T - 0.0001885 \cdot T^2 - 0.005805 \cdot FD \cdot T^2 + 9.693 \cdot 10^{-8} \cdot T^3 \quad (\text{Eq. 2})$$

Uma vez encontrada a energia ( $E^*$ ) a partir da densidade energética (densidade energética X volume armazenado), usando o método de massa equivalente de TNT (Eq. 3) encontra-se a massa de TNT ( $M_{TNT}$ ) [kg].

Nem toda a energia contida no reservatório será convertida em sobrepressão ( $\Delta P$ ). Para reservatórios feitos com materiais dúcteis, estima-se que apenas 40-50% ( $\beta$ ) da energia disponível é convertida em sobrepressão, o restante da energia é usado para a rotura do material e outras transformações energéticas (Casal, 2008; Casal and Salla, 2006; B. Hemmatian et al., 2017; Behrouz Hemmatian et al., 2017). Com a distância do alvo ( $r$ ) [m] e a massa equivalente de TNT a “scaled distance” ( $R^*$ ) é encontrada. Então, usando a curva de TNT (Casal, 2008) (Anexo A), a  $\Delta P$  é encontrada.

$$M_{TNT} = \frac{\beta \cdot E^* \cdot 10^3}{4680} \quad (\text{Eq. 3})$$

$$R^* = \frac{r}{M_{TNT}^{1/3}} \quad (\text{Eq. 4})$$

Diversas tabelas relacionando  $\Delta P$  e danos em estruturas, equipamentos e pessoas estão disponíveis na literatura (Casal, 2008; Crowl and Louvar, 2001) (Anexos B e C)

Uma avaliação probabilística da letalidade e dos danos pode ser feita através do método de PROBIT (*Probability Unit* – unidade de probabilidade). PROBIT é uma função que relaciona a magnitude de uma ação ao grau de dano que ela causa, como exemplo, uma dose e a respetiva resposta ou consequência. Esse método é usado em diversas áreas do conhecimento, como na toxicologia, para relações da dose de um uma substância x letalidade. Na engenharia, especificamente na segurança de processos, a relação de PROBIT é usada para: dose de calor e queimaduras; sobrepressão e hemorragia, etc. A relação de PROBIT ( $Y$ ), que é uma medida da percentagem de uma população submetida a uma ação de determinada intensidade (radiação térmica etc), e a probabilidade pode ser encontrada através de gráfico ou tabela (Anexo D).

Para a letalidade por hemorragia pulmonar, tem-se a seguinte equação em função da pressão ( $P$ ) (Norman A. Eisenberg et al., 1975):

$$Y = -77.1 + 6.91 \cdot \ln P \quad (\text{Eq. 5})$$

Para lesão no tímpano:

$$Y = -12.6 + 1.524 \cdot \ln P \quad (\text{Eq. 6})$$

## 2.2 Fragmentação

Enquanto a radiação e a sobrepressão têm efeitos em distâncias menores, a fragmentação de partes do reservatório, suas estruturas acessórias e estruturas vizinhas podem alcançar grandes distâncias (Stawczyk, 2003). Civis, bombeiros e estruturas podem tornar-se alvo delas. De acordo com alguns autores (Stawczyk, 2003; Tschirschwitz et al., 2017), para garrafas de GPL até 26 litros, os fragmentos podem alcançar até 300 metros desde o ponto da explosão.

Comparativamente ao jato de fogo, bola de fogo e à sobrepressão, a estimativa do alcance dos fragmentos é simples, através do volume do reservatório e da massa ( $M$ ) [kg] contida no momento da explosão. As equações 7 e 8 consideram que o reservatório contém GPL e o lançamento dos fragmentos ocorrem no ângulo ótimo de  $45^\circ$ .

Para reservatórios com mais de  $5 \text{ m}^3$ , a distância de projeção  $L_f$  [m], é dada por:

$$L_f = 465 \cdot M^{0.1} \quad (\text{Eq. 7})$$

Para reservatórios com menos de  $5 \text{ m}^3$ :

$$L_f = 90 \cdot M^{0.33} \quad (\text{Eq. 8})$$

Alguns autores sugerem que as garrafas tendem a romper-se formando duas ou três partes (Baum, 1999; C.J.H. van den Bosch, 2005; Casal, 2008).

Os danos causados pelos fragmentos lançados também podem ser estimados. Uma aproximação indica que para fragmentos não penetrantes com massa de 4,5 kg, com velocidades

acima de  $4,6 \text{ m.s}^{-1}$  ( $17 \text{ km.h}^{-1}$ ) colidindo contra o crânio de uma pessoa podem causar fraturas e concussão cerebral (Casal, 2008).

### **2.3 Bola de fogo**

A estimativa da bola de fogo tem relação direta com a massa de fluido armazenada (C.J.H. van den Bosch, 2005; Casal, 2008). Quanto maior a massa, maior a altura, o tempo de duração e o diâmetro da bola de fogo. Essas variáveis estão diretamente ligadas à radiação que atinge um alvo, pois quanto maior for o diâmetro da bola de fogo, maior é a superfície emissiva e, quanto maior for o tempo de duração da bola de fogo, maior será a dose de radiação recebida pelo alvo.

A bola de fogo possui uma superfície emissiva variável, transiente, uma vez que tem um tamanho crescente, alcançando o tamanho máximo no primeiro terço do tempo de duração e depois há a redução do tamanho (Casal, 2008). Uma forma conservadora de estimar a radiação emitida pela bola de fogo é considerar o diâmetro máximo o que, do ponto de vista da segurança, é aceitável. Por outro lado, usar o tamanho médio é mais razoável, pois evita valores demasiado sobrestimados, com melhor aproximação da física real.

A radiação da bola de fogo (fb) e os seus efeitos em alvos humanos podem ser estimados através de diversos métodos (Abbasi and Abbasi, 2007; C.J.H. van den Bosch, 2005; Casal, 2008).

A análise do problema para todos os métodos é similar, considerando a bola de fogo uma esfera com emissão na direção do alvo a ser avaliado (Figura 2.1). Onde “D” é o diâmetro e “d” é a distância da superfície da bola de fogo ao alvo.

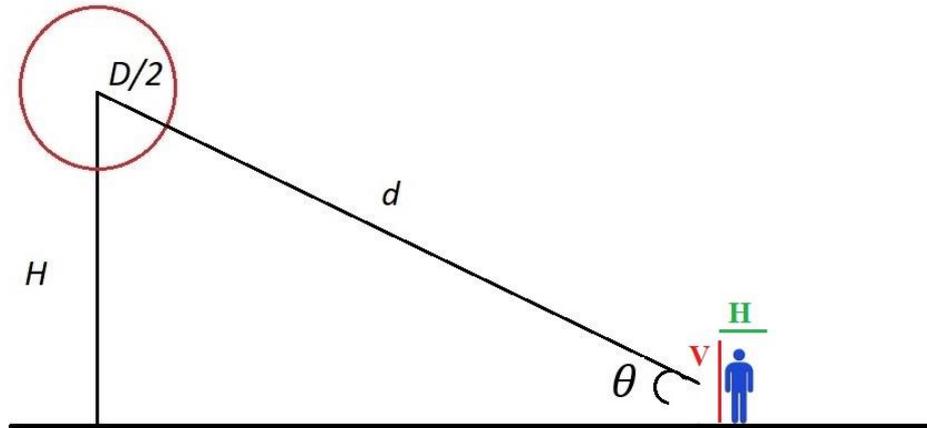


Figura 2.1: Desenho esquemático da bola de fogo, posição da incidência de radiação em alvos nas posições vertical (V) e horizontal (H), e os respectivos parâmetros espaciais para o cálculo da estimativa da radiação incidente no alvo.

### Método de estimativa:

Média para o poder emissivo da superfície (SEP) [ $\text{kW}\cdot\text{m}^{-2}$ ] (Casal, 2008):

$$SEP = \frac{M \cdot \Delta H_c \cdot \mu_{rad}}{\pi \cdot D^2 \cdot t} \quad (\text{Eq. 9})$$

Onde  $\mu_{rad}$  é a fração de calor radiado (0.33),  $\Delta H_c$  é o calor de combustão do fluido [ $\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$ ],  $t$  é o tempo de duração da bola de fogo [s],  $D$  é o diâmetro [m] e  $M$  é a massa de GPL [kg] no reservatório.

Para o fator de forma máximo (Casal, 2008):

$$F_{max} = \frac{D^2}{4\left(\frac{D}{2} + d\right)^2} \quad (\text{Eq. 10})$$

Não havendo valores experimentais para o tempo, diâmetro e altura da bola de fogo, dois métodos podem ser usados. As estimativas podem ser feitas através das equações abaixo:

Para o tempo de duração [s] (C.J.H. van den Bosch, 2005; Casal, 2008):

$$t = 0,9 \cdot M^{0,25} \quad (\text{Eq. 11}) \text{ ou};$$

$$t = 0,852 \cdot M^{0,26} \quad (\text{Eq. 12})$$

O diâmetro da bola de fogo varia, havendo um período de crescimento e outro de redução do tamanho. O diâmetro máximo é alcançado em aproximadamente um terço do tempo de duração. Um diâmetro (D) [m] aproximado pode ser estimado por (C.J.H. van den Bosch, 2005; Casal, 2008):

$$D = 8,664 \cdot M^{0,25} \cdot \left(\frac{t}{3}\right)^{0,333} \quad (\text{Eq. 13}) \text{ ou};$$

$$D = 2 \cdot 3,24 \cdot M^{0,325} \quad (\text{Eq. 14})$$

A altura (H) [m], do nível do reservatório ao centro da bola de fogo é (C.J.H. van den Bosch, 2005; Casal, 2008):

$$H = 0,75 \cdot D \quad (\text{Eq. 15}) \text{ ou};$$

$$H = D \quad (\text{Eq. 16})$$

Uma correção ao fator de forma máximo é feita a depender da posição do alvo. Para um alvo vertical, como uma pessoa ou uma parede, ou horizontal como um telhado.

$$F_{vertical} = F_{max} \cdot \cos\theta \quad (\text{Eq. 17})$$

$$F_{horizontal} = F_{max} \cdot \sin\theta \quad (\text{Eq. 18})$$

A intensidade térmica (I) [kW.m<sup>-2</sup>] e a dose [kW.m<sup>-2</sup>]<sup>4/3</sup> são:

$$I = \tau \cdot F_F \cdot SEP \quad (\text{Eq. 19})$$

$$dose = t \cdot I^{\left(\frac{4}{3}\right)} \quad (\text{Eq. 20})$$

Sendo  $\tau$  a transmissividade, para valores de  $P_w \cdot d$  entre  $10^4$  e  $10^5$  temos:

$$\tau = 2,85 \cdot (P_w \cdot d)^{-0.09} \quad (\text{Eq. 21})$$

$P_w$  é a pressão parcial da água [ $\text{N.m}^{-2}$ ],  $d$  é a distância até o alvo [m] e  $H_R$  é a humidade relativa [%].  $P_{wa}$  é a pressão de vapor saturado na atmosfera [ $\text{N.m}^{-2}$ ] que pode ser encontrada através da equação de Antoine à temperatura ambiente ( $T_a$ ) [K].

$$P_w = P_{wa} \cdot \frac{H_R}{100} \quad (\text{Eq. 22})$$

$$\ln P_{wa} = 3,18986 - \frac{3816,42}{T_a - 46,13} \quad (\text{Eq. 23})$$

Assim como para a sobrepressão, uma avaliação probabilística da letalidade (e queimaduras) também pode ser feita através da análise de PROBIT. A relação de PROBIT e probabilidade pode ser encontrada através dos Anexos F e G.

Para a queimaduras de primeiro grau (C.M. Pietersen, 1990):

$$Y = -39,83 + 3,0186 \cdot \ln(dose) \quad (\text{Eq. 24})$$

Para queimaduras de segundo grau:

$$Y = -43,14 + 3,0186 \cdot \ln(dose) \quad (\text{Eq. 25})$$

Para letalidade (sem proteção)

$$Y = -36,38 + 2,56 \cdot \ln(dose) \quad (\text{Eq. 26})$$

## 2.4 Jato de fogo

O jato de fogo é um evento que também pode gerar um efeito dominó devido ao tempo de duração, à possibilidade de repetição e ao seu longo comprimento. Caballero et al. (2019) identificou três layouts comuns na IUF relacionados ao armazenamento de GPL:

- Reservatório diretamente exposto ao fogo florestal
- Reservatório exposto à relva e a vegetação ornamental
- Reservatório exposto a outros tipos de combustíveis

Nesses três casos, uma vez que o reservatório é colocado nas proximidades da casa, o jato de fogo pode alcançar zonas mais vulneráveis como janelas, persianas poliméricas, telhado e mobília. Então, o jato pode atuar como elemento de ligação entre o incêndio nas imediações e a casa.

A intensidade da radiação térmica de um jato de fogo pode ser estimada permitindo a avaliação da vulnerabilidade. Inicialmente, essa radiação pode ser estimada considerando o poder da superfície emissiva (SEP) através da área e da temperatura da chama (Eq. 27). Diversos autores têm apresentado métodos de estimativa para a forma e comprimento do jato de fogo. Também, tem sido discutido a questão de qual a melhor geometria que se adequa à forma da chama: elipsoide, cilindro e cone, seja com SEP uniforme ou com intensidades diferentes na superfície emissora. Alguns autores também propõem métodos diferentes para jatos verticais e horizontais (Bradley et al., 2016; C.J.H. van den Bosch, 2005; Casal, 2008; Palacios et al., 2020, 2012; Palacios and Casal, 2011).

Havendo resultados experimentais, as estimativas tornam-se mais fiáveis e simples. Conhecendo a forma do jato de fogo, a humidade relativa, emissividade e a temperatura da chama, os efeitos térmicos podem ser estimados através do SEP (por unidade de área) e da intensidade da radiação térmica (I):

$$SEP = \sigma \cdot \varepsilon \cdot T^4 \quad (\text{Eq. 27})$$

Onde  $\varepsilon$  (0,4) é a emissividade (Lowesmith et al., 2007; Palacios et al., 2012) e  $\sigma$  é a constante de Stefan-Boltzmann ( $5,7 \times 10^{-8} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$ ). O fator de forma para o cálculo da intensidade ( $I$ ) (Eq.19) pode ser calculado ou encontrado através do Anexo E, usando os valores do diâmetro, do comprimento do jato de fogo e da respectiva distância ao alvo (Drysdale, 1999; Hankinson, 1986; Rohsenow et al., 1998).

Não havendo resultados experimentais, a forma do jato de fogo deve ser estimada. Os métodos de estimativa para o jato de fogo são mais complexos que os de uma bola de fogo, pois são necessárias informações tais como o número de Mach, coeficiente de expansão adiabática (no inglês *ratio of the specific heats*) ( $\gamma$ ), temperatura, pressão, dentre outras.

De modo geral, pode ser usado um método simplificado para hidrocarbonetos gasosos com as seguintes equações (Casal, 2008). O comprimento visível da chama do jato de fogo ( $L$ ) [m] pode ser encontrado a partir do diâmetro do orifício do escoamento ( $D_{or}$ ) [m], da fração molar do combustível na mistura estequiométrica ar-combustível ( $C_{st-vol}$ ), da massa molar do ar ( $M_A$ ) [ $\text{kg} \cdot \text{kmol}^{-1}$ ] e da massa molar do combustível ( $M_c$ ).

$$L = D_{or} \cdot \frac{15}{C_{st-vol}} \cdot \left(\frac{M_A}{M_c}\right)^{0,5} \quad (\text{Eq. 28})$$

O diâmetro do jato de fogo ( $D_j$ ) [m] é encontrado através do comprimento da chama visível, comprimento do jato sem chama (frequentemente usado o termo em inglês *lift-off*) ( $s$ ) [m] e da distância axial desde o orifício ( $X$ ) [m]:

$$D_j = 0,29 \cdot X \cdot \left[ \ln\left(\frac{L+s}{X}\right) \right]^{0,5} \quad (\text{Eq. 29})$$

O comprimento do jato sem chama é encontrado através da velocidade do jato ( $u_j$ ) [ $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ], da temperatura do jato ( $T_j$ ) [K] e do número de Mach do jato ( $Ma_j$ ):

$$s = \frac{6,4 \cdot \pi \cdot D_{or} \cdot u_j}{4 \cdot u_{av}} \quad (\text{Eq. 30})$$

Sendo  $u_{av}$  a velocidade média do jato, uma aproximação que pode ser usada é  $u_{av} \sim 0,4u_j$ .

$$T_j = T_{in} \cdot \left( \frac{P_{atm}}{P_{in}} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} \quad (\text{Eq. 31})$$

$$u_j = Ma_j \sqrt{\frac{\gamma \cdot R \cdot T_j}{M_c}} \quad (\text{Eq. 32})$$

$$Ma_j = \sqrt{\frac{(\gamma+1) \left( \frac{P_{or}}{P_{amb}} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} - 2}{\gamma-1}} \quad (\text{Eq. 33})$$

Outros autores (Palacios et al., 2020) apresentaram métodos diferentes para jatos de fogo verticais e horizontais, através do parâmetro de caracterização da chama ( $Q^*$ ) [-].

$$Q^* = \frac{\dot{Q}}{\rho_{amb} \cdot C_p \cdot T_{amb} \cdot D_{or}^2 \cdot \sqrt{g \cdot D_{or}}} \quad (\text{Eq. 34})$$

Se  $Q^* < 10^5$  o escoamento é subsônico, se  $Q^* > 10^5$  o escoamento pode ser sônico ou supersônico.

Sendo  $\rho_{amb}$  a massa específica do ar [ $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ],  $T_{amb}$  a temperatura do ar [K],  $C_p$  o calor específico do ar à pressão constante,  $D_{or}$  o diâmetro do orifício [m],  $g$  a aceleração da gravidade [ $\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$ ] e  $\dot{Q}$  é a taxa de calor libertado [kW] (Bradley et al., 2016; Palacios et al., 2020).

Para um jato de fogo horizontal a projeção horizontal ( $X_f$ ) [m] estimada é (Palacios et al., 2020):

$$X_f = (3,7 \cdot Q^{*0,35}) \cdot D_{or} \quad (\text{Eq. 35})$$

A área da chama ( $A_f$ ) [ $\text{m}^2$ ] é (Palacios et al., 2020):

$$A_f = (2 \cdot Q^{*0,7}) \cdot D_{or}^2 \quad (\text{Eq. 36})$$

O fluxo de calor radiativo ( $q_r''$ ) [ $\text{kW}\cdot\text{m}^{-2}$ ], sendo  $d_R$  a distância do centro da chama ao alvo [m], é dado por (Palacios et al., 2020):

$$q_r'' = \frac{1034 \cdot Q^{*\frac{2}{3}} \cdot D_{or}^{\frac{5}{2}}}{d_R^2} \quad (\text{Eq. 37})$$

Para um jato de fogo vertical o comprimento ( $H_f$ ) [m] é (Palacios et al., 2020):

$$H_f = \left(-1,02 \cdot +3,7 \cdot Q^{*\frac{2}{5}}\right) \cdot D_{or} \quad (\text{Eq. 38})$$

Tendo a área da chama ( $A$ ) [ $\text{m}^2$ ], o SEP também pode ser estimado através do caudal mássico do jato de fogo ( $\dot{m}$ ) [ $\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}$ ]:

$$SEP = \frac{\dot{m} \cdot \Delta H_c \cdot \mu_{rad}}{A} \quad (\text{Eq. 39})$$

## 2.5 Pressão no interior o reservatório

A pressão no interior do reservatório pode ser facilmente estimada considerando que: o fluido está à mesma temperatura da superfície da garrafa e o fluido seja puro. A aproximação para fluido puro permite não usar equações cúbicas como as de Peng Robinson (PR) e Soave-Redlich-Kwong (SRK), podendo ser usadas equações mais simples como as de Wagner e de Antoine (Poling et al., 2001). Além disso, durante o aquecimento, o GPL comporta-se de forma similar a curva de equilíbrio líquido-vapor (ELV), com isso até os limites de temperatura crítica e pressão crítica a equação de Wagner pode ser usada com significativa precisão. Após o ponto crítico, não é possível observar o ELV estável, sendo então um fluido em estado supercrítico. Os valores encontrados pela equação de Wagner foram comparados com a tabela NIST para o propano e não há diferença significativa, sendo esta diferença inferior a 0,02% para fluidos

acima de 180 K (Barbosa et al., 2022; Lemmon et al., 2009; National Institute of Standards and Technology, n.d.)

Equação de Wagner:

$$\ln P_{vPR} = \frac{(a\dot{Y} + b\dot{Y}^{1.5} + c\dot{Y}^{2.5} + d\dot{Y}^5)}{T_R} \quad (\text{Eq. 40})$$

$a = -6.76368$ ;  $b = 1.55481$ ;  $c = -1.5872$ ;  $d = -2.024$ ;  $T_c = 369.85 \text{ K}$ ;  $P_c = 42.47 \text{ bar}$ ;  $\dot{Y} = 1 - T_R$

### 3 DINÂMICA DOS FLUIDOS COMPUTACIONAL (CFD)

Em paralelo aos métodos empíricos de estimativa de efeitos presentes na literatura e descritos no capítulo 2 desta tese, a simulação computacional tem se tornado uma ferramenta robusta e de importante destaque para a avaliação da segurança.

A dinâmica dos fluidos computacional (CFD) será usada nesta tese a fim de estimar os efeitos do jato de fogo e do comportamento do fluido no interior do reservatório. Desta forma, os resultados computacionais obtidos podem ser comparados com os resultados experimentais.

O ANSYS FLUENT e o Fire Dynamic Simulator (FDS) têm sido amplamente usados nos trabalhos de simulação envolvendo incêndios, aquecimento de reservatórios e fogos diversos como o jato de fogo e a piscina de fogo (*pool fire*) (Cirrone et al., 2019a, 2019b; D’Aulisa et al., 2014a; Landucci et al., 2016; Scarponi et al., 2019, 2018a, 2018b; Shen et al., 2020; Yi et al., 2019).

O ANSYS FLUENT foi escolhido para ser usado nesse trabalho devido à licença gratuita não ter limites de renovação, por possuir uma melhor ferramenta CAD e pela grande variedade de modelos disponíveis de radiação, de sistemas multifase, turbulência e equações de estado para fluidos diversos. Então, para o trabalho desenvolvido nesta tese, o uso do FLUENT sobrepõe-se ao FDS que é um simulador com foco em incêndios e ênfase no transporte de fumo e de calor, o que inviabilizaria a simulação do GPL no interior da garrafa sob aquecimento.

#### 3.1 Simulação do aumento de pressão na garrafa durante o aquecimento

A simulação do reservatório de GPL sob aquecimento, por se tratar de um fluido pressurizado, deve considerar:

- um sistema multifásico;
- uma equação de estado adequada para o tipo de fluido armazenado;
- um modelo de turbulência que permita capturar os efeitos do escoamento e a variação da temperatura próximos à parede interna do reservatório;

- malha suficientemente refinada para propiciar melhor convergência e atuação do modelo de turbulência.

As equações de Peng-Robinson (PR) e de Soave-Redlich-Kwong (SRK) são comumente usadas e proporcionam bons resultados para a previsão da pressão para hidrocarbonetos, principalmente para alcanos, como o propano e o butano. Essas equações foram usadas em diversos trabalhos e estão disponíveis na biblioteca do ANSYS FLUENT (D'Aulisa et al., 2014b, 2014a; Landucci et al., 2016; Scarponi et al., 2019, 2018a, 2018b).

Em relação ao comportamento dinâmico do fluido no interior do reservatório de GPL, trabalhos recentes mostram modelos que estimam o comportamento no interior de reservatórios: velocidades na parede do reservatório, fração das fases, zonas de maior e menor temperatura, e o perfil de pressão e temperatura durante o tempo de exposição às chamas. Entretanto, esses trabalhos consideraram simulações para reservatórios com volumes muito superiores ( $0,4 - 125 \text{ m}^3$ ) a uma garrafa de GPL de uso doméstico.

Os primeiros modelos propuseram simulações em 2D contendo apenas uma fase no sistema, a fase gasosa (D'Aulisa et al.<sup>a</sup> 2014a, 2014b; Landucci et al., 2016). Posteriormente e com o avanço dos simuladores, foram apresentados modelos em 3D e multifásicos (líquido - gás) (Scarponi et al., 2019, 2018a, 2018b). Esse avanço na quantidade de informações processadas em três dimensões tornou a estimativa CFD mais próxima da realidade física. Entretanto, custou grande tempo de processamento, o que é um grande obstáculo que tem de ser removido.

D'Aulisa et al. (2014b) encontrou erros para simulações 2D de até 23 % em relação à pressão simulada e a pressão experimental. Scarponi et al. (2019) comparou simulações 2D e 3D para reservatórios de até 5 toneladas, concluindo que simulações 2D podem ser usadas na modelação de reservatórios sob fogo, e ambos métodos 2D e 3D apresentaram erro relativo de até 15%. Scarponi et al. (2019) também acrescentou que as temperaturas para a fase líquida estimadas em 2D e 3D possuem bons resultados, havendo em ambos métodos temperaturas superestimadas para a fase gás. Por isso, as simulações 2D e 3D podem apresentar resultados similares para pressão e temperatura, os quais são objeto principal das simulações desta tese.

Uma alternativa para o grande custo computacional é a simulação de metade da geometria quando há a condição de simetria. Por exemplo, em um reservatório sob fogo, quando o reservatório é atingido pelas chamas na base de forma uniforme, o comportamento fluido-dinâmico no lado ocidental do reservatório é intimamente similar ao lado oriental, permitindo que apenas um lado seja simulado e o outro seja o espelho. Essa condição poupa tempo computacional e permite melhor discretização da malha. Essa técnica tem sido usada em simulações 3D.

Em relação ao modelo de turbulência, os trabalhos recentes têm usado majoritariamente os modelos K- $\epsilon$  e K- $\omega$ -SST, sendo o segundo mais usado nas simulações em 3D.

Devido ao aquecimento do reservatório, as mudanças de estado do fluido (líquido e gás) e das propriedades físico-químicas ocorrem a cada instante. Por isso, as simulações de aquecimento do reservatório são feitas em regime transiente. Em simulações em regime transiente, usar o adequado passo de tempo (*time step*) é fundamental para a boa convergência dos cálculos relativamente à realidade física. Senão, podem ocorrer divergências interrompendo a simulação ou os resultados serão distantes da realidade experimental (Figura 3.1). Quanto menor for o passo de tempo, melhor é a convergência, entretanto a simulação pode ser mais demorada. Scarponi et al.(2018b) avaliou o passo de tempo para simulações em reservatórios de gás sob aquecimento, foram usados 0,005 e 0,0025 segundo, concluindo que a redução do passo de tempo para valores inferiores a 0,005 não influenciava os resultados de forma significativa.

A Figura 3.1 ilustra dois exemplos de resultados encontrados para uma variável (pressão, temperatura, viscosidade etc.) de uma mesma simulação de um caso hipotético. O primeiro com o passo de tempo longo e o segundo com o passo de tempo mais curto, adequado para o caso. Com o passo de tempo adequado a solução da simulação aproxima-se do real (ou experimental) além de evitar erros devido a divergência.

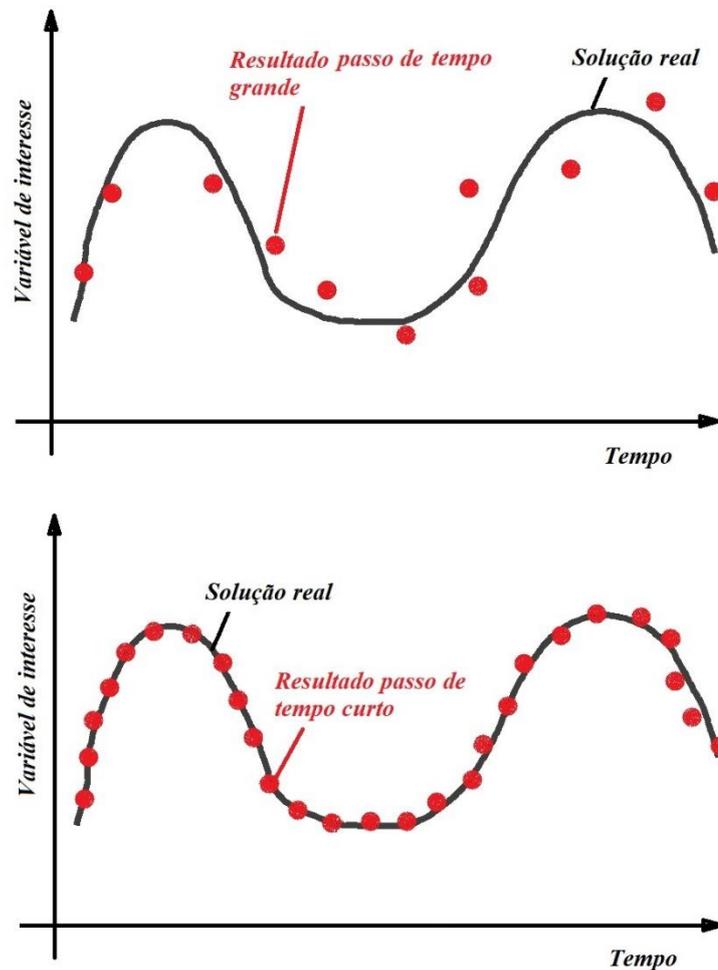


Figura 3.1: Desenho comparativo relativo à influência do passo de tempo para as simulações em estado transiente.

### 3.1.1 Modelo multifase: VoF

Devido à presença de fases heterogêneas, deve ser aplicado um modelo multifase. O modelo multifase usado em diversos trabalhos é o Volume of Fluid (VoF) (D'Aulisa et al., 2014b; Landucci et al., 2016; Scarponi et al., 2019). Esse modelo deteta a fração de volume das fases em cada célula do domínio a cada passo de tempo. Como recomendação, a fase primária é configurada como a fração de gás e a secundária a de líquido. Usando o VoF, em cada célula do domínio há uma fração de cada fluido, não coexistindo líquido e gás no mesmo volume,

assim o percentual total de líquido e de gás é encontrado através do somatório de todas as células. Esse modelo também é capaz de prever o movimento de bolhas no líquido (ANSYS Inc 2022a; D'Aulisa et al., 2014b). Foi usado um mecanismo de evaporação-condensação baseado no Modelo Lee (*Lee model*).

$$\frac{1}{\rho_l} \left[ \frac{\partial}{\partial t} (\alpha_l \rho_l) + \nabla (\alpha_l \rho_l \vec{v}_l) \right] = \sum_{v=1}^n (\dot{m}_{vl} - \dot{m}_{lv}) \quad (\text{Eq. 41})$$

$$\alpha_v = 1 - \alpha_l \quad (\text{Eq. 41a})$$

$$\sum_{l=1}^n \alpha_l = 1 \quad (\text{Eq. 42})$$

Onde:  $\dot{m}_{vl}$  e  $\dot{m}_{lv}$  são a transferência de massa do vapor para o líquido e do líquido para o vapor [ $\text{kg.s}^{-1}$ ], respetivamente; l e v correspondem as frações de líquido e vapor;  $\rho$  é a massa específica [ $\text{kg.m}^{-3}$ ];  $\alpha$  é a fração de volume em cada célula do domínio;  $\vec{v}$  é a velocidade média [ $\text{m.s}^{-1}$ ]; n é o número de células no domínio.

### 3.1.2 O modelo K- $\omega$ -SST

O modelo k- $\omega$ -SST (*K- $\omega$ -Shear Stress Transport*) é uma modificação do modelo k- $\omega$ -BSL (*k- $\omega$ -baseline*), o qual é uma modificação do modelo k- $\omega$  (original). Esses modelos e também o modelo k- $\epsilon$  (e suas variáveis) são abordagens RANS (*Reynolds Average Navier-Stokes Simulation*) os quais se focam no escoamento médio.

Os modelos k- $\omega$  (e k- $\epsilon$ ) são baseados na solução de duas equações de transporte. Para o k- $\omega$ , uma equação é dedicada a energia cinética turbulenta (k) e outra para a taxa de energia de dissipação específica ( $\omega$ ). O k- $\omega$ -SST inclui os refinamentos do k- $\omega$ -BSL e também considera a viscosidade turbulenta para o transporte da tensão de cisalhamento, apresentando melhores resultados que o modelo k- $\epsilon$  na camada limite, com isso capta melhor os efeitos do escoamento próximos à parede e zonas de recirculação. Essas modificações fazem do modelo k- $\omega$ -SST mais

preciso e mais versátil que o BSL e o original, podendo ser aplicado a uma maior gama de escoamentos, como o sônico, escoamentos com gradientes de pressão, dentre outros. Em situações de escoamento em camadas sem tensão de cisalhamento, o modelo k- $\omega$ -SST é reduzido ao k- $\epsilon$  padrão (ANSYS Inc 2022<sup>a</sup>; Menter, 1994).

Equação para a energia cinética turbulenta (k):

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho k u_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \Gamma_k \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - Y_k + S_k \quad (\text{Eq. 43})$$

Equação para a energia de dissipação específica ( $\omega$ ):

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \omega) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho \omega u_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \Gamma_\omega \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right] + G_\omega - Y_\omega + D_\omega + G_{\omega b} + S_\omega \quad (\text{Eq. 44})$$

Onde:  $G_k$  representa a geração de energia cinética turbulenta (k) [ $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}$ ];  $G_\omega$  a geração da taxa de energia de dissipação específica ( $\omega$ ) [ $\text{s}^{-1}$ ];  $Y_k$  e  $Y_\omega$  representam a dissipação de k e  $\omega$  devido a turbulência;  $D_\omega$  o termo de difusão cruzada [ $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ ];  $S_k$  e  $S_\omega$  são termos definidos pelo usuário;  $G_b$  é a geração de turbulência devido à flutuação;  $G_{\omega b}$  é a flutuação do termo  $\omega$ ;  $u$  é a velocidade na componente cartesiana [ $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ];  $\rho$  é a massa específica [ $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ];  $t$  é o tempo [s];  $j$  é a coordenada cartesiana

Os termos  $\Gamma_\omega$  e  $\Gamma_k$  são a difusividade para taxa de dissipação específica ( $\omega$ ) e para a energia cinética de turbulência (k), respetivamente, encontrados através das seguintes equações:

$$\Gamma_k = \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \quad (\text{Eq. 45})$$

$$\Gamma_\omega = \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\omega} \quad (\text{Eq. 46})$$

Sendo  $\sigma_k$  e  $\sigma_\omega$  os números de Prandtl para k e  $\omega$ .

A viscosidade turbulenta ( $\mu_t$ ) [Pa.s] para o modelo K- $\omega$ -SST:

$$\mu_t = \frac{\rho k}{\omega} \frac{1}{\max\left(\frac{1}{\alpha^*}, \frac{SF}{\alpha_1 \omega}\right)} \quad (\text{Eq. 47})$$

Onde:  $S$  é a taxa da tensão;  $\alpha^*$  é um coeficiente para correção de baixos números de Reynolds, para altos números de Reynolds é igual a 1;  $F$  é uma função projetada para ter resultado igual a 1 quando aplicada próxima à superfície da parede, e resultado igual a zero longe da superfície (ANSYS Inc 2022a; Menter, 1994)

### 3.1.3 A equação de Peng Robinson (PR)

A equação de PR (Eq. 48-48d), de 1976, possui considerável precisão para resultados de pressão próximos ao ponto crítico, imbuindo em si termos da equação em função das temperatura e pressão críticas. Essa equação se apresenta como boa opção a ser usada em uma simulação de um reservatório com GPL sob aquecimento, pois do fluido aquecido espera-se um comportamento no equilíbrio líquido-vapor até a vizinhança do ponto crítico (Figura 3.2).

$$P = \frac{RT}{V-b} - \frac{a_c \alpha_p}{V(V+b)+b(V-b)} \quad (\text{Eq. 48})$$

$$a_c = \frac{0,45727R^2T_c^2}{P_c} \quad (\text{Eq. 48a})$$

$$b = \frac{0,07780RT_c}{P_c} \quad (\text{Eq. 48b})$$

$$\alpha_p = \left[ 1 + f_w \left( 1 - T_R^{\frac{1}{2}} \right) \right]^2 \quad (\text{Eq. 48c})$$

$$f = 0,37464 + 1,5422w - 0,2699w^2 \quad (\text{Eq. 48d})$$

$T_r$  é a temperatura reduzida;  $w$  é o fator acêntrico;  $P_c$  e  $T_c$  são a pressão e temperaturas críticas;  $P$  é a pressão;  $V$  é o volume;  $f$  é a fugacidade.

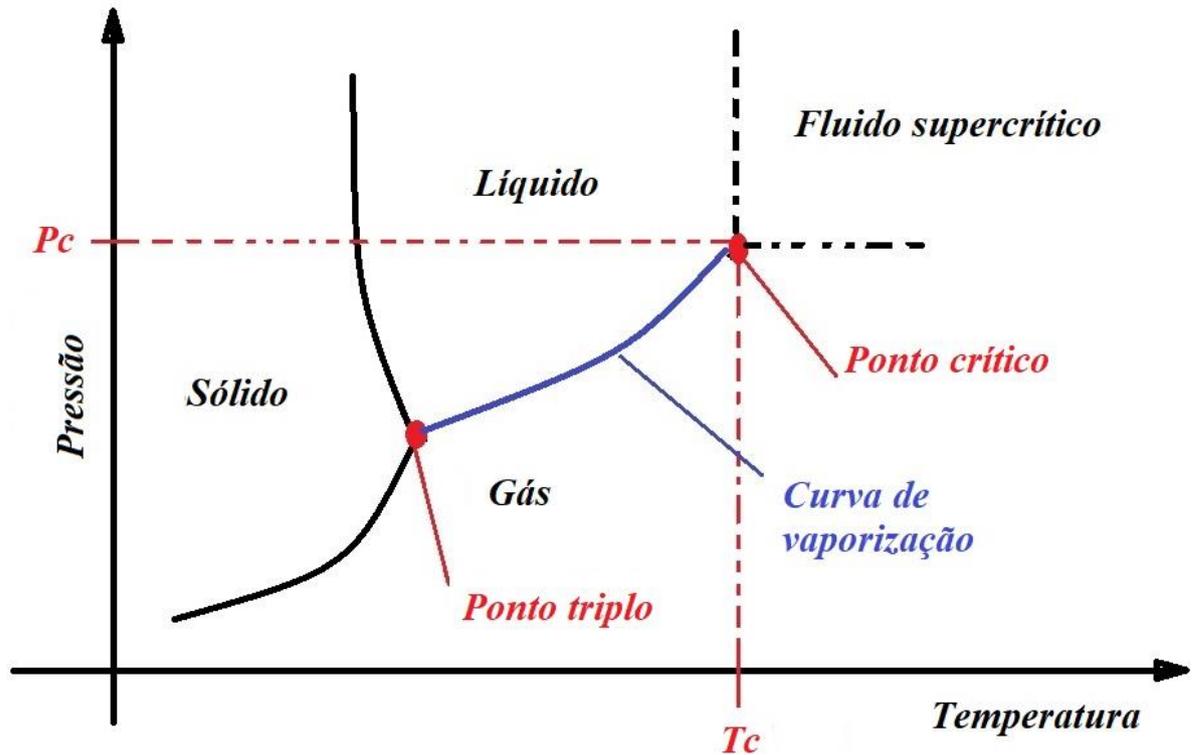


Figura 3.2: Desenho esquemático do diagrama  $P \times T$  para um fluido qualquer com destaque ao equilíbrio líquido-vapor e ponto crítico.

A Tabela 3.1 apresenta um resumo dos trabalhos anteriores com os respectivos métodos usados para as simulações: escoamento, equações de estado (EoS), geometrias 2D ou 3D, passo de tempo e fases.

Tabela 3.1 Resumos das recentes configurações usadas em simulações de reservatórios de gás sob aquecimento

Modelo de Turbulência	EoS	Passo de tempo	Fases	Geometria	Referência
K- $\omega$ -SST	SRK	0,005-0,0025	Multifase-VoF	3D	(Scarponi et al., 2018b)
K- $\omega$ -SST	SRK	0,005	Multifase-VoF	3D	(Scarponi et al., 2019)
K- $\omega$ -SST	SRK	0,005	Multifase-VoF	3D	(Scarponi et al., 2018a)
K- $\epsilon$	-	-	Gás	2D	(D'Aulisa et al., 2014a)
K- $\epsilon$	PR	0,03	Multifase-VoF	2D	(D'Aulisa et al., 2014b)
K- $\epsilon$	PR	0,03	Multifase-VoF	2D	(Landucci et al., 2016)

### 3.2 Simulação do jato de fogo

Os resultados das simulações do jato de fogo podem sofrer variações a depender dos dados de entrada inseridos na configuração. O modelo de gás (real ou ideal), os modelos de turbulência do escoamento, de combustão e de radiação térmica têm que ser escolhidos de modo a beneficiar o melhor “custo X resultado”. Por exemplo, modelos mais complexos de turbulência como Large Eddy Simulations (LES) geram melhores contornos de chama. Contudo, têm um alto custo computacional, demandando maior tempo de processamento que, a depender da análise, não traz diferença significativa.

Uma questão importante e que torna a simulação de um jato de fogo menos custosa é a possibilidade de simulação em estado estacionário ao invés do transiente, pois durante maior parte do tempo não há grande variação da forma do jato de fogo. O estado estacionário foi usado recentemente por Cirrone et al.(2019a) e Mashhadimoslem et al. (2021).

Os trabalhos mais recentes sobre simulação do jato de fogo têm sido usados os modelos de turbulência menos custosos e que fornecem resultados significativos, como o modelo K- $\epsilon$ . Além disso, os trabalhos usando o modelo o K- $\epsilon$  estão mais relacionados com trabalhos que avaliam os efeitos da chama relativamente à radiação incidente (Cirrone et al. 2019a, 2019b), enquanto os trabalhos intimamente ligados ao estudo do escoamento têm usado o LES (Favrin

et al., 2018). A Tabela 3.2 apresenta um resumo dos modelos usados para o jato de fogo em trabalhos recentes.

Tabela 3.2: Resumos das recentes configurações usadas em simulações de jato de fogo

Modelo de Turbulência	Modelo de Combustão	Modelo de Radiação	Referência
K- $\epsilon$	EDC	DO	(Cirrone et al. 2019a)
K- $\epsilon$	EDM	Total Energy model	(Hooker et al., 2017)
K- $\epsilon$	EDC	P-1	(Kim et al., 2010)
K- $\epsilon$	EDC	DO	(Cirrone et al., 2019b)
LES	-	RTE	(Davidy, 2019)
LES	-	-	(Favrin et al., 2018)
LES	EDC	-	(Jang and Choi, 2017)
K- $\Omega$ -SST	EDM	diversos	(Mashhadimoslem et al., 2021)

### 3.2.1 Modelos de Combustão Eddy Dissipation

Os modelos de combustão Eddy Dissipation apresentam amplo alcance para sistemas de reações, tanto para escoamentos laminares como para escoamentos turbulentos, em sistemas com chamas de reagentes pré-misturados e não pré-misturados (ANSYS Inc 2022a). Para a simulação, a reação deve ser conhecida pelo usuário a fim de definir modelos governados pela cinética detalhada da reação ou pela mistura turbulenta (mistura de combustível e comburente causado pelo escoamento).

O modelo Eddy Dissipation (EDM) apresenta bons resultados para simulações em que a análise da reação não precisa ser profunda e a taxa de reação é limitada pela mistura turbulenta, ou seja, quanto maior for a interação entre os reagentes causada pelo escoamento, maior é o avanço da reação. No EDM a cinética da reação é descrita de forma simples, em uma ou duas etapas, evitando cálculos custosos de cinética química.

Entretanto, o Eddy Dissipation Concept (EDC) considera os diversos mecanismos de reação e suas respectivas etapas, espécies e radicais formados nessas etapas, e os diversos produtos da combustão (além de H<sub>2</sub>O, CO e CO<sub>2</sub>) formados durante a reação química de combustão.

Com isso, para um jato de fogo, fenômeno que é estudado neste trabalho, para avaliar os efeitos da radiação da chama, o EDM é a escolha mais adequada.

O EDM usa um modelo de interação química turbulenta. A reação de combustão ocorre sempre que no escoamento  $k/\varepsilon > 0$ . Nesse modelo, a taxa de formação das espécies  $i$  devido à reação  $r$  ( $R_{i,r}$ ) é dado pelo menor valor das duas equações abaixo (ANSYS Inc, 2022b 2022a; MAGNUSSEN, 1981; Prieler et al., 2017):

$$R_{i,r} = (v''_{i,r} - v'_{i,r})M_{w,i}A\rho\frac{\varepsilon}{k}\min_{\mathcal{R}}\left(\frac{Y_{\mathcal{R}}}{v_{\mathcal{R},r}M_{w,\mathcal{R}}}\right) \quad (\text{Eq. 49})$$

$$R_{i,r} = (v''_{i,r} - v'_{i,r})M_{w,i}AB\rho\frac{\varepsilon}{k}\frac{\sum_P Y_P}{\sum_j^N v''_{j,r}M_{w,j}} \quad (\text{Eq. 50})$$

Onde:  $Y_P$  é a fração mássica de uma das espécie dos produtos e  $Y_{\mathcal{R}}$  dos reagentes;  $A$  e  $B$  são constantes empíricas iguais a 4 e 0,5 respectivamente;  $M_{w,i}$  e  $M_{w,j}$  são as massas molares das espécies  $i$  e  $j$  [kg.kmol<sup>-1</sup>];  $N$  é o número total de espécies;  $v''_{i,r}$  é o coeficiente estequiométrico para o produto  $i$  na reação  $r$ ;  $v'_{i,r}$  é o coeficiente estequiométrico para o reagente  $i$  na reação  $r$ .

### 3.2.2 Modelo de turbulência K-ε

O modelo k-ε é descrito por Yi et al. (2019) como um modelo robusto e preciso que pode ser aplicado a uma grande gama de escoamentos com fluxo de calor. Cirrone et.al (2019a) fez um estudo experimental comparando a chama visível de um jato de fogo de hidrogénio com a simulação C.F.D. usando os três modelos k-ε (Standard, RNG e Realizable), concluindo que a simulação com o k-ε Realizable se adequou melhor ao comprimento e temperatura da chama experimental, sendo usado posteriormente por Cirrone et al. (2019b). Por isso, as simulações

do jato de fogo nesta tese foram desenvolvidas usando o k- $\epsilon$  Realizable como modelo de turbulência.

No k- $\epsilon$  Realizable a turbulência é calculada resolvendo as equações de transporte para a energia cinética de turbulência (k), e para a taxa de dissipação turbulenta ( $\epsilon$ ), equações 51 e 52, respetivamente (ANSYS Inc 2022a, 2022b):

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho k u_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_{k2}} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho \epsilon - Y_M + S_k \quad (\text{Eq. 51})$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \epsilon) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho \epsilon u_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right] + \rho C_{1\epsilon} S \epsilon - \rho C_{2\epsilon} \frac{\epsilon^2}{k + \sqrt{\nu \epsilon}} + C_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{k} C_{3\epsilon} G_b + S_\epsilon (\text{Eq. 52})$$

Onde:

- $C_{1\epsilon}$ ,  $C_2$ ,  $\sigma_{k2}$ ,  $\sigma_\epsilon$  são constantes iguais a 1,44, 1,9, 1,0, 1,2, respetivamente;
- $u$  é a velocidade na componente cartesiana [ $\text{m.s}^{-1}$ ];  $C_{3\epsilon}$  é função da velocidade do escoamento na componente cartesiana em relação ao vetor gravitacional;  $\nu$  é a viscosidade cinemática [ $\text{m}^2.\text{s}^{-1}$ ];  $Y_M$  é a contribuição da dilatação da flutuação na taxa de dissipação geral;  $\mu_t$  é a viscosidade turbulenta [ $\text{Pa.s}$ ];  $\rho$  é a massa específica [ $\text{kg.m}^{-3}$ ];  $t$  é o tempo [ $\text{s}$ ];  $C_1$  é função do módulo da taxa do tensor de deformação  $S$ ;
- $j$  é a coordenada cartesiana;
- $G_k$  e  $G_b$  representam a geração de energia cinética (k) devido à velocidade e a flutuação, respetivamente.

### 3.2.3 Modelo de radiação: Discrete Ordinates (DO)

No método DO (Eq.53), a equação de transferência radiativa é resolvida considerando um número finito de ângulos ( $\Omega'$ ) associados à direção  $\vec{s}$ , que são subdivididos pelo usuário no número de divisões (N) em  $\Theta$  e  $\phi$  para maior precisão e discretização espacial (Figuras 3.3 e 3.4). Então, para uma simulação 3D, 8 octantes serão resolvidos resultando em  $8N\Theta N\phi$  direções (ANSYS Inc 2022a, 2022b).

$$\nabla \cdot (I(\vec{r}, \vec{s})\vec{s}) + (a + \sigma_s)I(\vec{r}, \vec{s}) = an_r^2 \frac{\sigma T^4}{\pi} + \frac{\sigma_s}{4\pi} \int_0^{4\pi} I(\vec{r}, \vec{s}')\Phi(\vec{s} \cdot \vec{s}') d\Omega' \quad (\text{Eq. 53})$$

Onde:  $\vec{r}$  é a posição do vetor na direção  $\vec{s}$ ;  $n_r$  é o índice de refração do meio;  $\Phi$  é função da dispersão;  $\vec{s}'$  é a direção do vetor de espalhamento; “a” é o coeficiente de absorção [ $\text{m}^{-1}$ ];  $\sigma_s$  é o coeficiente de dispersão [ $\text{m}^{-1}$ ].

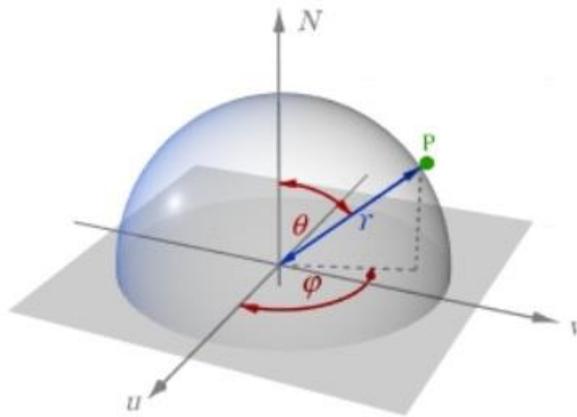


Figura 3.3: Representação espacial de theta e phi

Fonte: <https://www.cfd-online.com/F50hell50ifluent/190666-discrete-ordinates-do-radiation-model-solid-angles.html>; Acessado em 03/01/2022)

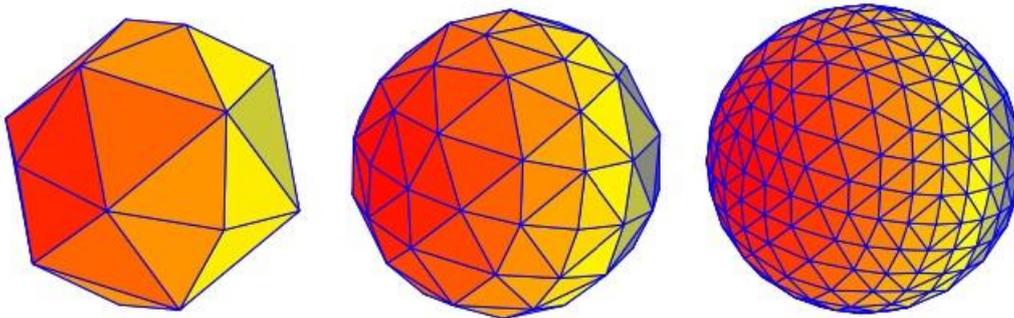


Figura 3.4: Representação do aumento da discretização da radiação no espaço com o aumento dos valores de theta e phi, da esquerda para a direita

(Fonte: <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-02333870/document>; Acessado em 03/01/2022)

ANSYS Inc (2022b) sugere 5x5 como número de divisões angulares para  $\Theta \times \phi$  e 3x3 para a discretização de pixels. Cirrone et.al (2019a) afirma que para  $\Theta \times \phi$  acima de 10x10 não há

acréscimos consideráveis no refinamento. Contudo, Cirrone et.al (2019a) também afirma que, comparativamente, o tempo computacional cresce em aproximadamente o dobro quando  $\Theta \times \phi$  é aumentado de  $5 \times 5$  para  $10 \times 10$ .

## 4 METODOLOGIA

A metodologia adotada para a componente experimental desta tese tem por finalidade complementar os trabalhos anteriores feitos por Stawczyk (2003) e Tschirschwitz et al (2017) os quais tiveram foco maioritário na pressão de rotura, sobrepressão a diferentes distâncias e o alcance dos fragmentos.

Nesta tese, a metodologia da componente experimental propõe-se avaliar:

- o jato de fogo, seu comprimento, radiação, e a respetiva capacidade de propagação do incêndio relativamente aos materiais encontrados na IUF;
- a altura, tempo de duração e diâmetro da bola de fogo com a respetiva radiação e efeitos em alvos humanos;
- a pressão de rotura sob condições de fogo comparativamente à pressão de rotura dos testes hidrostáticos;
- a velocidade dos fragmentos primários e o respetivo alcance em relação aos fragmentos secundários.

### 4.1 Avaliação dos efeitos do BLEVE e do jato de fogo: exposição das garrafas de GPL às chamas

Sendo o BLEVE e o jato de fogo os fenómenos que podem estar presentes quando um reservatório de gás é aquecido, as garrafas de GPL serão expostas ao fogo. Dessa forma, serão encontradas informações importantes para a estimativa da dose e da radiação térmica incidente em alvos humanos, como: altura e diâmetro da bola de fogo, comprimento e largura do jato de fogo, e os respetivos tempos de duração.

A perda da resistência do material devido a exposição às chamas será avaliada através da comparação entre as pressões de rotura dos testes sob fogo e dos testes hidrostáticos.

Importantes informações sobre a fragmentação das garrafas também serão coletadas levando a garrafa de GPL ao BLEVE. Isso será feito através da exposição de uma garrafa de GPL sem PRD.

#### 4.1.1 Testes hidrostáticos

Oito testes hidrostáticos (TH) foram realizados com o objetivo de mensurar, na ausência de chamas, a resistência das garrafas através da pressão de rotura. Dessa forma, é possível comparar as pressões de rotura e avaliar a redução da resistência das garrafas devido ao estresse térmico.

Foram feitos quatro testes usando garrafas metálicas e quatro usando garrafas compósitas, testes 1-8, (Tabela 4.1). Os TH foram feitos em laboratório de qualidade especializado em garrafas de armazenamento de gases pressurizados (Figura 4.1). O TH é feito dentro de uma câmara, a água é bombeada para o interior das garrafas e, em simultâneo, a pressão é registada. O TH é concluído quando há uma queda abrupta de pressão, o que marca a rotura do reservatório. O rebentamento sob pressão hidráulica é requisito presente na norma EN 1442 (2018). Conforme essa norma, a pressão de rebentamento não deve ser inferior a 2,25 vezes a pressão de projeto e sendo no mínimo 50 bar.

Tabela 4.1: Testes hidrostáticos

Teste	Referência	Tipo do material da garrafa
1	HT1	Metal
2	HT2	
3	HT3	
4	HT4	
5	HT5	Compósito
6	HT6	
7	HT7	
8	HT8	



Figura 4.1: Câmara de testes usada para os testes de rotura das garrafas sob pressão hidrostática.

## 4.1.2 Testes de campo

### 4.1.2.1 Geral

Os testes foram feitos em uma pedreira (Figura 4.2) em Miranda do Corvo, Portugal, com o suporte dos bombeiros locais.

As garrafas usadas nos testes são as mesmas vendidas em Portugal, sem qualquer modificação nas configurações do fabricante. A garrafa de metal tem o volume de  $0,026 \text{ m}^3$  (26 litros) contendo 11 kg de propano, enquanto a garrafa compósita tem volume de  $0,024 \text{ m}^3$  contendo 12 kg de butano. O fornecedor comercializa as garrafas com nível de enchimento de 95% e pureza do GPL também 95%.

Três testes foram feitos, variando o tipo de garrafa (metal ou compósito), tipo de fluido (butano ou propano) e a presença ou ausência de PRD (Tabela 4.2)



Figura 4.2: Imagem aérea do local dos testes de campo (pedreira).

Tabela 4.2: Sumário dos testes sem proteção

Teste	Referência	GPL	Tipo	PRD
9	T1CB	Butano	Compósito	Sim
10	T2SP	Propano	Metal	Sim
11	T3SP	Propano	Metal	Não

A garrafa compósita (teste T1CB) estava equipada com uma PRD com configuração de abertura a 21 bar, além de um fusível que abre quando a temperatura é alta. A PRD acoplada à garrafa metálica do teste T2SP possuía configuração de abertura a 26 bar.

Três garrafas de metal vazias foram pesadas para saber a massa média. Dessa forma, ao fim dos testes T2SP e T3SP obter: a massa de gás remanescente do teste T2SP e o percentual da massa da garrafa coletada após o BLEVE do teste T3SP. Esse procedimento não foi feito com garrafa compósita por duas razões: o polímero desse tipo de garrafa é consumido pelas chamas, sendo a massa variável durante o teste; após a abertura do fusível o GPL flui para o exterior, restando apenas uma quantidade desprezável.

As garrafas de GPL foram colocadas na posição horizontal, deitadas sobre um suporte metálico que estava sobre o combustível florestal. Essa posição maximiza o contato com as chamas. O suporte tem 50 cm de altura, e ele foi fixado firmemente ao solo usando varões de aço. A fim de evitar movimentações devido ao jato de fogo, cabos de aço foram usados para fixar as garrafas ao suporte através das alças e da base. O design dos testes foi adaptado de outros testes feitos com garrafas de GPL (Stawczyk, 2003; Tschirschwitz et al., 2018, 2017).

Uma estação meteorológica Vantage Vue Wheeler Station da Davis Instruments foi usada para aquisição de: temperatura ambiente, humidade relativa do ar, intensidade e direção do vento. Essas informações são necessárias para os modelos de estimativa da bola de fogo e jato de fogo.

Um monitor (agulheta fixa) foi usado, posicionado a 20 metros do local de ensaios, para arrefecer as garrafas e o local de ensaios. Dessa forma, o aparato experimental pode ser novamente preparado de forma mais célere e segura após cada teste (Figura 4.3).



Figura 4.3: Monitor na direção do suporte com a garrafa para arrefecimento ou interrupção dos testes.

A quantidade de madeira (*Pinus Pinaster*) a ser usada nos testes 9-11 foi padronizada para garantir similar quantidade de combustível. Para isso, dez cavacas foram pesadas. Em cada teste foram usadas 60 cavacas, aproximadamente 120 kg de madeira. Seis quilogramas de arbustos (mistura de *Erica umbellata*, *Erica australis*, *Ulex minor*, *Chamaespartium tridentatum* e *Avena sativa*) com humidade de 16% foram usados para auxiliar a combustão das cavacas (Tabela 4.3).

Tabela 4.3 Padronização do combustível florestal

Total de amostras	10
Massa máxima de uma cavaca (kg)	2,998
Massa mínima de uma cavaca (kg)	1,136
Média (kg)	1,96
Desvio padrão (kg)	0,61

O tempo requerido para iniciar a combustão das cavacas e produzir chamas de grande intensidade é de 2 a 2,5 minutos. Isso fornece tempo seguro para os operadores envolvidos diretamente nos ensaios se distanciarem e abrigarem atrás de uma parede de betão que estava a 120 metros do local de ensaios. A ignição foi feita nos arbustos usando um maçarico.

#### 4.1.2.2 Aquisição de dados de temperatura, pressão e fluxo térmico

Quatro termopares tipo K com isolamento mineral e diâmetro de 1,6 milímetros foram usados, três deles anexados à superfície da garrafa e o outro entre a garrafa e as chamas. O primeiro (TI 1) foi colocado 10 centímetros abaixo da garrafa, entre a superfície inferior e as chamas. O segundo (TI 2) foi colocado na superfície inferior da garrafa. O terceiro (TI 3) foi colocado à meia altura da garrafa. E o quarto (TI 4) foi colocado no topo da garrafa.

Um transdutor de pressão (PI) modelo P2VA2 da HBM, com medição de 0 a 500 bar e precisão de 0,3 bar foi usado. Para evitar danos ao PI devido às chamas, um tubo metálico de 1,5 metro de comprimento foi usado. Em uma extremidade do tubo o PI foi acoplado e, na outra extremidade, a válvula da garrafa com o redutor. O tubo, redutor, válvula e demais peças foram protegidos por fibra de vidro e papel alumínio, a fim de obter o maior tempo de medição possível, pois o redutor possui peças poliméricas que, quando fundidos, a conexão com o PI é perdida (Figura 4.4). Os termopares e o PI foram conectados a um registador (data logger) Eurotherm Register Model 6100A. Esse registador foi conectado a um computador.

Um sensor de fluxo total IHF01 Hukseflux (FI) foi colocado a 0,5 metro do suporte para registrar o calor recebido pela garrafa. O sensor de fluxo tem incerteza de medição igual a  $\pm 0,98 \times 10^{-9} \text{ V} \cdot (\text{W} \cdot \text{m}^{-2})^{-1}$ . O FI foi conectado a um módulo 9211 ( $\pm 80 \text{ mV}$ ) da National Instruments

(NI). E o módulo foi conectado a um chassis modelo cDAQ-9174 da NI, permitindo sinal contínuo com frequência de 1 Hz, sendo os dados transmitidos simultaneamente ao computador.

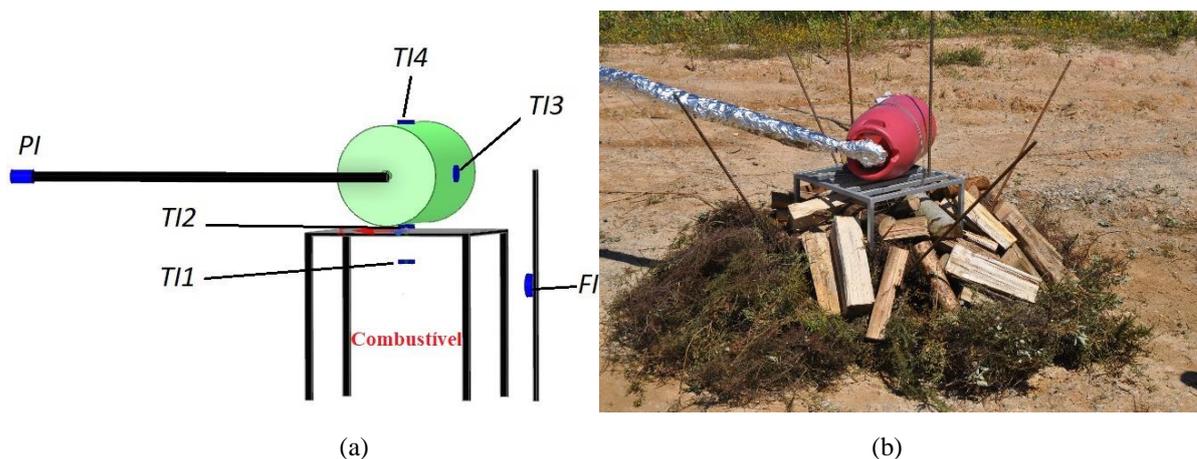


Figura 4.4: Imagens descritivas dos testes de campo; (a) desenho esquemático com o posicionamento dos instrumentos; (b) fotografia do teste T1CB.

#### 4.1.2.3 Aquisição de imagens, dimensões e perfil de fragmentação

Para a aquisição de imagens, foram usadas três câmaras visíveis e uma câmara termográfica na gama infravermelho (CAM IR). A CAM IR usada foi uma FLIR SC 660 (resolução 640x480, sensibilidade <math><30\text{ mK}</math>, gama de temperaturas de

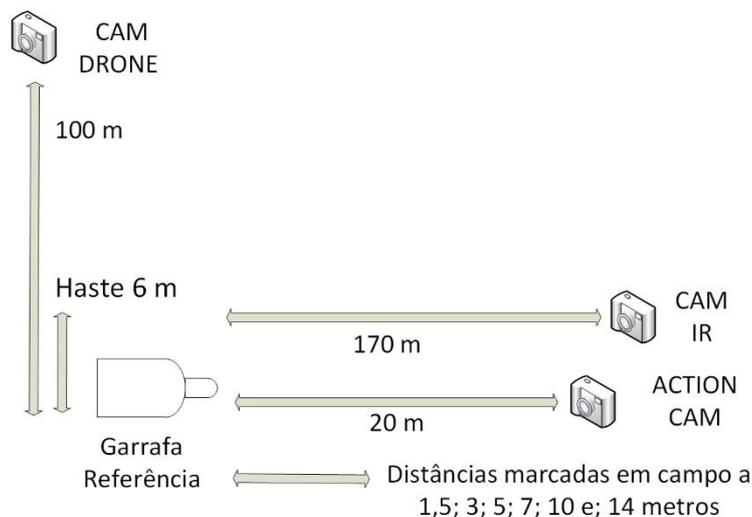


Figura 4.5: Desenho esquemático dos equipamentos de aquisição de imagens e das distâncias dos marcos em relação à garrafa para os testes de campo.

No campo de testes, o ponto onde a garrafa foi colocada foi marcado usando um GPS Garmin model ETREX 20 para ser ponto de referência para futuras medições de dispersão dos fragmentos.

Cones coloridos e varões de aço foram usados para marcar distâncias conhecidas a partir do ponto de referência (Figura 4.5). Uma haste de aço, de cor preta, com altura de 6 metros, com marcações vermelhas a cada 20 centímetros e uma marcação branca a cada 1 metro também foi usada no campo. Os cones, varões e haste com tamanhos e distâncias conhecidas foram usados para medir as dimensões da bola de fogo, como a altura e o diâmetro, e o comprimento do jato de fogo. Através das imagens dos testes contendo essas marcações em campo é possível estimar as dimensões da bola de fogo e do jato de fogo usando um software como o Power Point e suas ferramentas de edição de imagem. No software pode-se criar linhas de comprimento conhecido sobre a imagem do teste e usar os marcos em campo para se estimar as medidas reais da bola de fogo e do jato de fogo no campo.

As imagens, vídeo e as marcações no campo também foram usadas para estimar a velocidade média ( $V_m$ ) dos fragmentos primários (partes da garrafa) através da variação do tempo de gravação ( $\Delta t$ ) e da variação das distâncias conhecidas ( $\Delta S$ ), por meio da Eq. 54.

$$V_m = \frac{\Delta S}{\Delta t} \quad (\text{Eq. 54})$$

Após o BLEVE, foi feita uma busca no campo para a coleta dos fragmentos. Os fragmentos foram coletados, identificados e pesados. Cada ponto de coleta dos fragmentos foi marcado usando o GPS.

## 4.2 Simulações CFD

De forma comparativa, os resultados das simulações e dos testes experimentais serão avaliados e o erro relativo será apresentado a fim de validar o método computacional.

Trabalhos anteriores (D'Aulisa et al., 2014a, 2014b; Scarponi et al., 2019, 2018b) simularam propano em grandes reservatórios metálicos (0,4-125 m<sup>3</sup>), com graus de enchimento inferiores a 97%, em 2D e em 3D, com uma e com duas fases. Essas metodologias serão aplicadas na simulação de garrafas com 0,026 m<sup>3</sup>, contendo butano ou propano, com grau de enchimento de 95%.

As simulações foram feitas usando um computador com processador de 8 núcleos AMD Ryzen 7 5700U 1,80 GHz com boost até 4,3 GHz e memória RAM de 16 GB. Foram dedicados 4 núcleos para o processamento, sendo o máximo possível para a licença gratuita de estudante disponível para o ANSYS FLUENT.

As equações para os modelos de turbulência, multifase, combustão e radiação usadas nas simulações do incremento da pressão e do jato de fogo estão descritas no capítulo 3 desta tese. As equações de governo estão descritas no Anexo H.

### 4.2.1 Simulação do aumento de pressão na garrafa

A garrafa compósita possui 3 camadas, a mais interna é feita com aço. Devido à garrafa compósita ter o polímero consumido durante o teste sob fogo, perder massa durante a combustão, apresentar liberação de calor e rápida variação de espessura, as simulações do

aumento de pressão do butano foram feitas considerando uma garrafa metálica. Além de a camada metálica ser a única mantida durante todo o teste.

A pressão e temperatura usadas na configuração inicial das simulações foram as mesmas condições iniciais dos testes de campo. O grau de enchimento das garrafas usado foi o mesmo valor indicado pelo fabricante. O fluxo de calor incidente na superfície da garrafa usado nas simulações foi a média do fluxo medido nos testes de campo (Tabela 4.4).

Tabela 4.4: Condições iniciais das simulações e respectivos testes

Simulação	Teste	Temperatura (°C)	Pressão (bar)	Grau de enchimento (%)	Dimensão	Fluxo de calor (kW.m <sup>-2</sup> )
SIMU T1 3D	T1CB	34	5		3D	7
SIMU T2 2D	T2SP	38	9,7	95	2D	5,5
SIMU T2 3D	T2SP	38	9,7		3D	5,5
SIMU T32D	T3SP	39,7	10,9		2D	5,5

A SIMU T1 3D foi feita usando 3 dimensões, contudo devido ao custo computacional e tempo de processamento de aproximadamente 5 semanas, o método 3D foi aplicado novamente apenas ao teste T2SP, através da simulação SIMU T2 3D. Para o teste T3SP a simulação foi feita com o método 2D. As simulações 2D tiveram, cada uma, o tempo de processamento de aproximadamente 36 horas. Ambos os métodos podem apresentar erros relativos similares (D'Auilisa et al., 2014b; Scarponi et al., 2019)

#### 4.2.1.1 Domínio e malha 3D

Um domínio (Figura 4.6) com as mesmas dimensões do interior da garrafa de gás foi criado. A condição de não escorregamento foi usada para as paredes internas e a condição de simetria foi aplicada a fim de reduzir o custo computacional, considerando que a garrafa está envolta pelas chamas e que as condições são similares em ambos hemisférios da garrafa.

A qualidade da malha foi avaliada através do método *skewness*. Esse método avalia a proximidade da idealidade de uma célula. Quanto próximo o *skewness* for de zero, melhor a qualidade. Se o valor do *skewness* estiver entre 0,98 e 1 a malha não deve ser usada (Park et al.,

2022). Valores até 0,25 são considerados como uma qualidade excelente, entre 0,25 e 0,5 como boa qualidade(ANSYS Inc, 2022b).

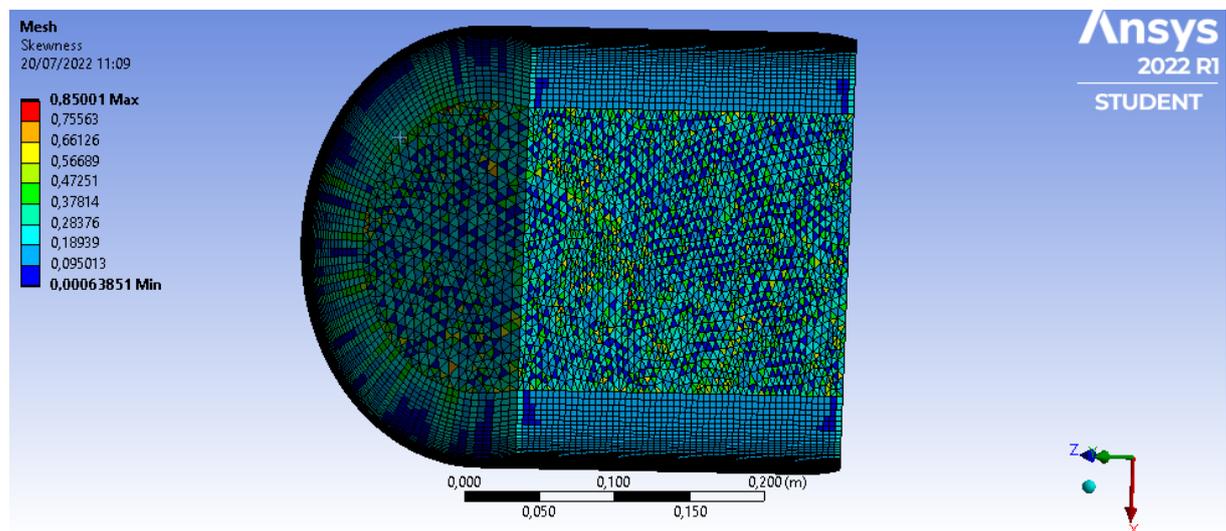


Figura 4.6: Malha gerada em 3 dimensões para as simulações do incremento de pressão.

A malha criada possui 366228 células, *skewness* máximo e médio iguais a 0,85 e 0,14, respectivamente (Figura 4.7), apresentando células tetraédricas e prismas. Um *inflation* (Figura 4.8), que de forma resumida é uma ferramenta de detalhamento da malha o qual pode criar camadas de espessura crescente, com 30 camadas, espessura máxima de 5 cm e taxa de crescimento igual 1,1, foi aplicado nas proximidades da parede interna, a fim de ter uma melhor discretização nessa área. Isso foi feito porque é nessa zona que é recebida a radiação térmica, há a existência de um gradiente de temperatura da parede ao centro da garrafa e também é onde o movimento convectivo do GPL é maior.

Além do *inflation*, foi usado o método *Patch Conforming* para geração de malhas tetraédricas no centro do domínio, com tamanho máximo de 1,3 centímetros. Essa malha teve maior número de camadas de *inflation* e menor tamanho máximo da célula que a malha usada por Scarponi et al. (2019).

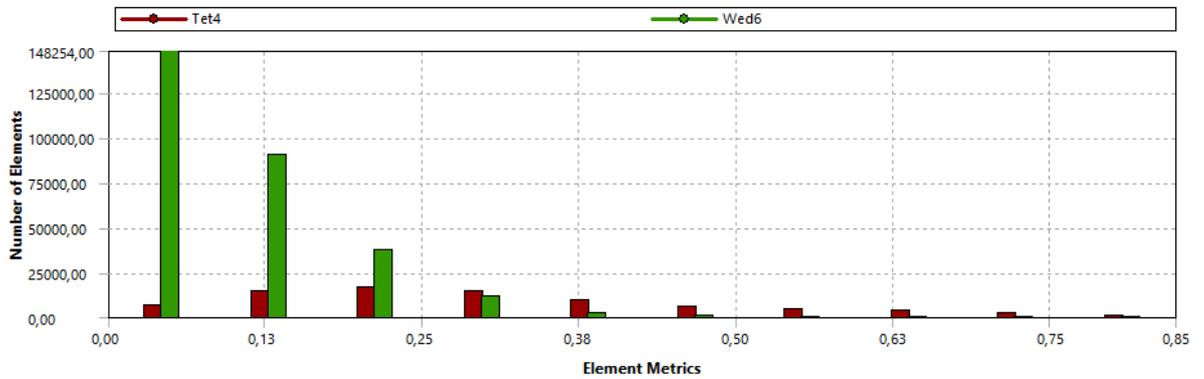


Figura 4.7: Distribuição da quantidade de elementos correspondente à métrica de qualidade da malha gerada para as simulações 3D.

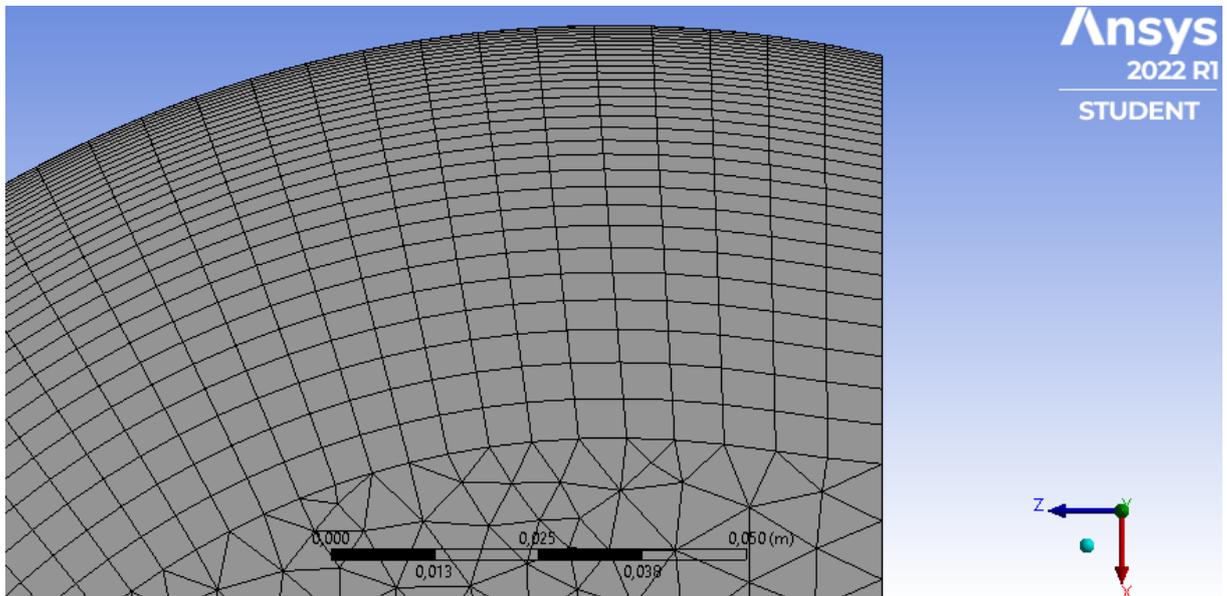


Figura 4.8: Malha gerada para as simulações 3D do incremento de pressão, com foco no *inflation* usado nas proximidades da parede interna.

#### 4.2.1.2 Domínio e malha 2D

A malha criada possui 3162 células (Figura 4.9), na ordem de 100 vezes menos que a malha 3D, com geometria maioritariamente quadrada.

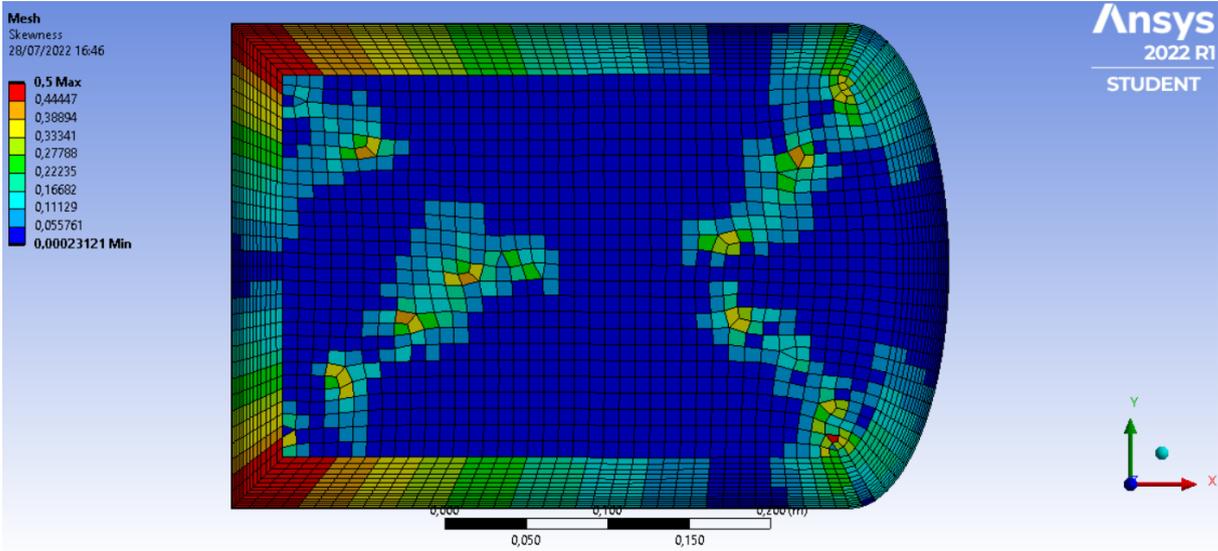


Figura 4.9:Malha usada nas simulações 2D do incremento de pressão com a escala colorida do valor do skewness.

Um *inflation* (Figura 4.10) foi usado com a mesma função usada na malha 3D, com taxa de crescimento de 1,1 e 15 camadas, tendo a mais próxima da parede a espessura de 1 milímetro. As demais células possuem comprimento e altura de 10 centímetros.

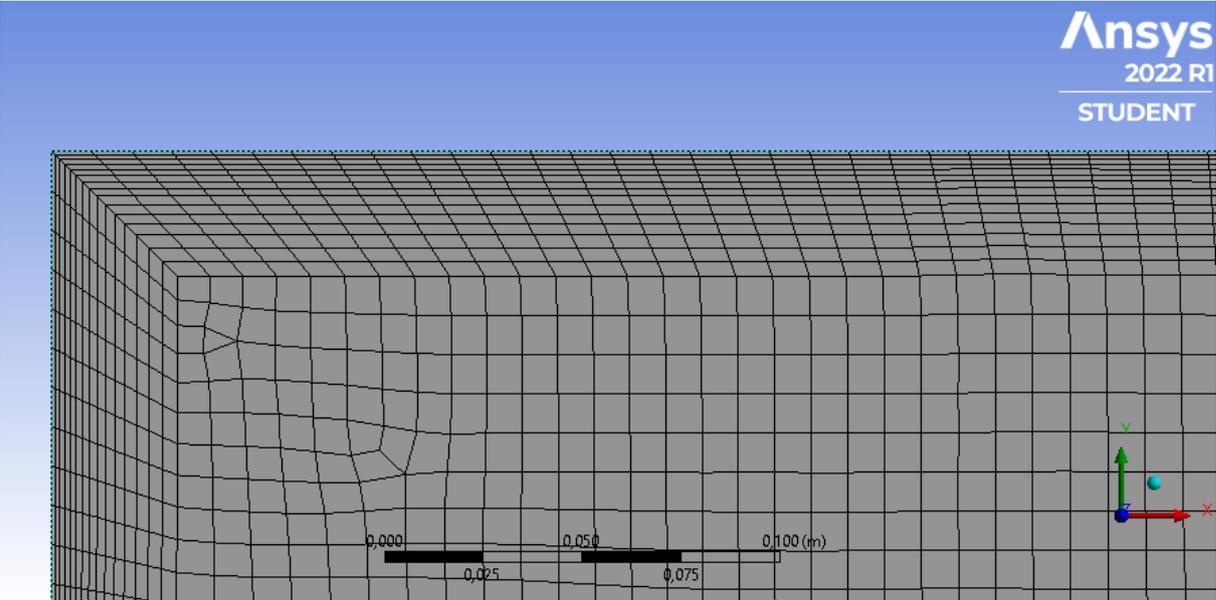


Figura 4.10: Malha gerada para as simulações 2D do incremento de pressão, com foco no *inflation* usado nas proximidades da parede interna.

Para a aferição da qualidade da malha foi usado o *skewness* como critério, apresentando valor máximo de 0,5 e médio de 0,15 (Figura 4.11).

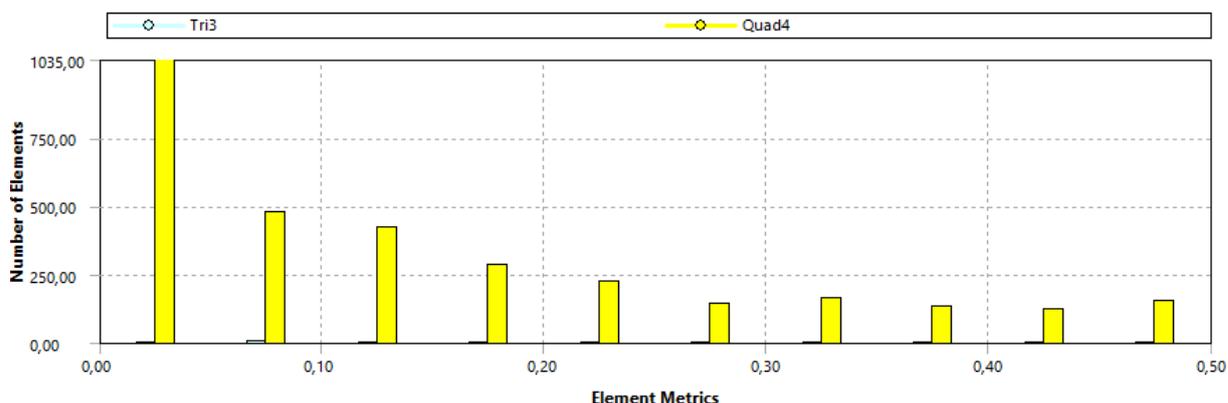


Figura 4.11: Distribuição da quantidade de elementos relativamente à métrica de qualidade da malha usada para as simulações 2D do incremento de pressão.

#### 4.2.1.3 Condições de contorno e iniciais

Para as simulações 3D, foi usada a ferramenta *shell conduction* para criar uma parede virtual para receber a carga térmica. Essa opção é uma solução para substituir a parede metálica da garrafa, pois a geração de malhas em geometrias de pequenas espessuras como a de uma garrafa de GPL (1,97 milímetros) causa malhas de qualidade inaceitável (*skewness* igual ou superior a 0,95), podendo gerar problemas de divergência. Para as simulações em 2D não é necessário usar a mencionada ferramenta, porque a fronteira do domínio fluido serve de recetor da carga térmica e pode ser especificada a sua espessura, além de não apresentar a significativa piora na qualidade da malha por não ter a terceira dimensão. O material usado para as paredes de todas as simulações foi o aço, disponível na biblioteca do ANSYS FLUENT. O passo de tempo usado para essas simulações com o propano e com o butano foi igual a 0,01 s.

A equação de Peng Robinson para gases reais foi usada. O sistema multifase foi habilitado sendo usado o VoF, com a fase primária correspondendo à fase gasosa, além de um mecanismo de evaporação-condensação ter sido adicionado baseado no modelo Lee (*Lee model*). O modelo de turbulência usado foi o k- $\omega$ -SST.

As Tabelas 4.5 e 4.6 apresentam as configurações de solução mais relevantes usadas nas simulações do incremento de pressão do butano e do propano. Esses parâmetros estão disponíveis no código e podem ser escolhidos pelo usuário. Destaque deve ser dado à escolha do método *SIMPLEC*. O *SIMPLEC* (*SIMPLE-Consistent*) foi usado em oposição ao *SIMPLE* e ao *PISO* principalmente devido ao tempo de convergência e custo computacional. Quando comparado ao *SIMPLE*, o *SIMPLEC* apresentará velocidade de convergência da solução igual ou superior, sem prejuízo para os resultados. Em relação ao *PISO*, o *SIMPLEC* apresenta menor custo computacional, pois o *PISO* tem ferramentas de correção para o skewness que não são necessárias para o caso, uma vez que o skewness médio para a simulação 3D foi 0,14, o que é excelente (ANSYS Inc, 2022a, 2022b).

Tabela 4.5: Relação da variável e respectiva discretização usada na configuração no Ansys Fluent

Variável	Discretização
Pressure-Velocity Coupling	SIMPLEC
Pressão	PRESTO!
Densidade	Second order upwind
Momentum	Second order upwind
Turbulência (k e $\omega$ )	Second order upwind
Fração do volume	Geo-reconstruction
Energia	Second order upwind

Tabela 4.6: Relação da variável e respectivo fatores de relaxação usada na configuração no Ansys Fluent

Variável	Fator de relaxação
Pressão	0,3
Densidade	1
Forças no corpo	0,8
Momentum	0,7
Vaporização	1
Energia cinética turbulenta	0,8
Viscosidade turbulenta	1
Taxa de dissipação turbulenta	0,8
Energia	1

## **Validação das simulações**

As simulações serão validadas através da comparação com os resultados experimentais de campo (testes T1CB, T2SP e T3SP).

As chamas apresentam um determinado tempo para estarem completamente desenvolvidas. Nos testes T1CB, T2SP e T3SP as chamas levaram de 2 a 2,5 minutos para estarem completamente desenvolvidas. Esse tempo de desenvolvimento das chamas, também verificado por Scarponi et al. (2019) e Tschirschwitz et al. (2017), será consistentemente ajustado quando a comparação entre as curvas para o incremento de pressão experimental e simulado for feita. Esse método de ajuste foi usado por Scarponi et al. (2019).

### **4.2.2 Simulação do jato de fogo**

#### **4.2.2.1 Domínio e malha**

Um domínio (Figura 4.12) com 17x8x5 metros foi criado. Para as simulações com o jato de fogo na direção horizontal, a gravidade foi configurada para direção e sentido  $-Y$ . E, para as simulações com o jato de fogo na direção vertical, a gravidade foi configurada na direção e sentido  $-X$ .



Figura 4.12: Domínio em 3 dimensões para as simulações do jato de fogo.

A malha atribuída foi tetraédrica, devido à melhor qualidade de transição entre os volumes do domínio: garrafa; semi-esfera; domínio-fluído. Para atribuição da malha foi usado o método *Patch Conforming* com taxa de crescimento de 1,2 e tamanho 20 cm (Figuras 4.13 e 4.14).

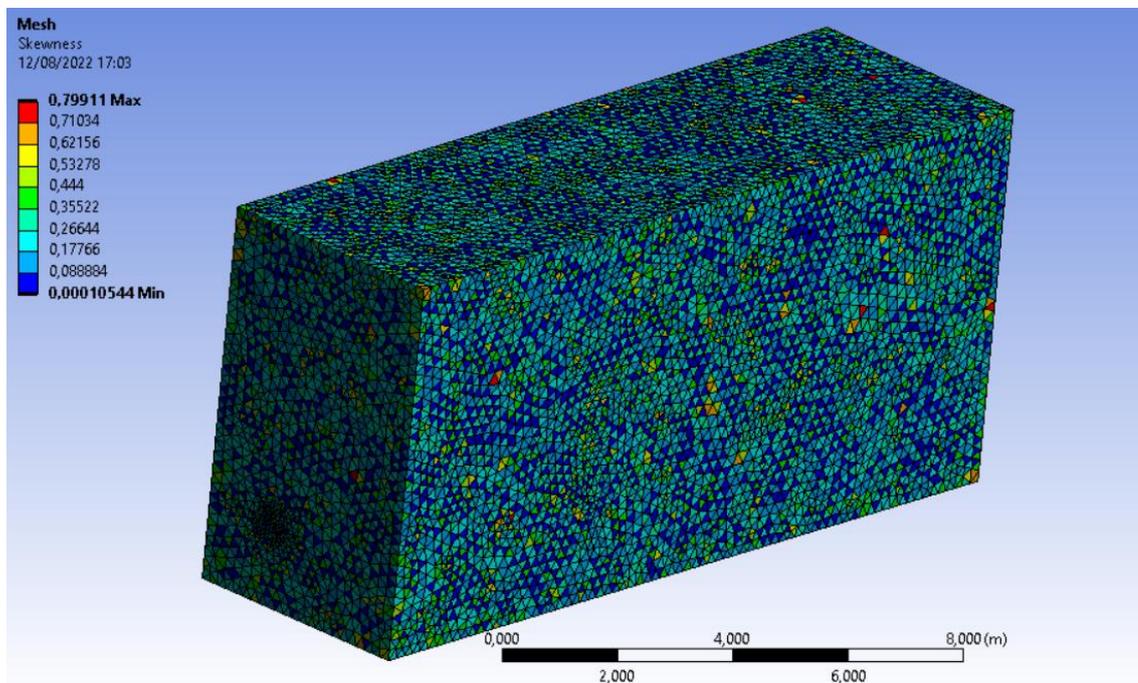


Figura 4.13: Malha usada nas simulações do jato de fogo e a distribuição da qualidade com cores.

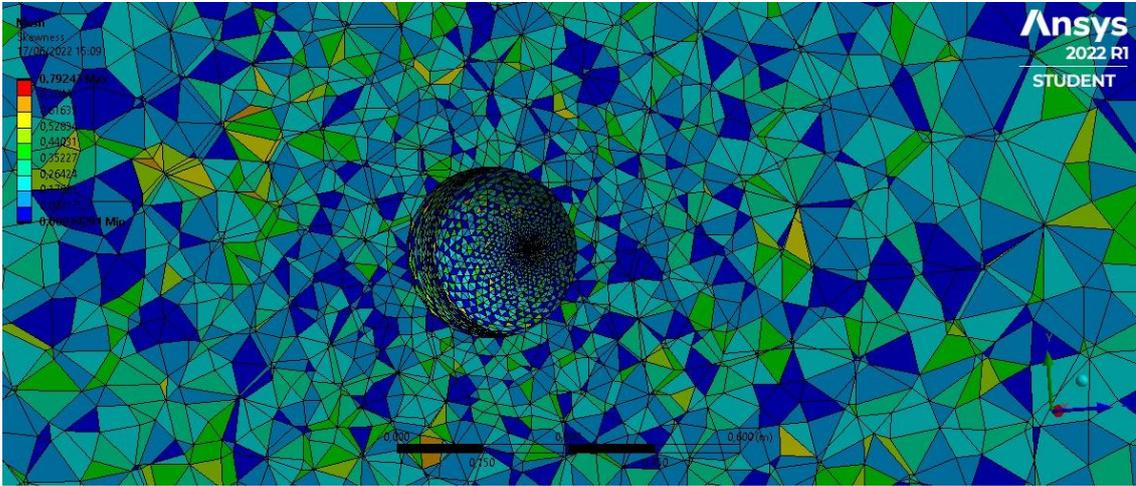


Figura 4.14: Malha usada nas simulações do jato de fogo e a distribuição da qualidade com cores, com foco no volume da garrafa.

A métrica para atribuição de qualidade da malha foi o *skewness*, devendo a malha ter *skewness* máximo de 0,9 a fim de evitar dificuldades de conversão ou divergências nos cálculos feitos pelo Ansys Fluent. Com isso, a malha atribuída teve *skewness* máximo de 0,8 com média de 0,21 e 312283 elementos (Figura 4.15). Conforme ANSYS Inc (2022) uma malha com *skewness* entre 0,25 e 0,50 é considerada uma malha de boa qualidade.

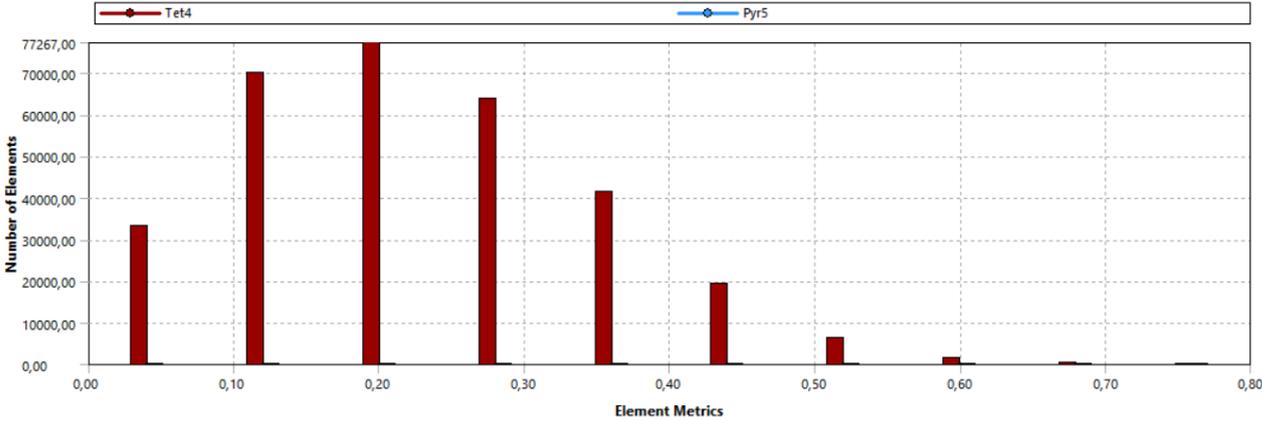


Figura 4.15: Distribuição da quantidade de elementos relativamente à métrica de qualidade da malha usada nas simulações do jato de fogo.

#### 4.2.2.2 Condições de contorno e iniciais

##### Simulação dos jatos de fogo dos testes de campo

As fronteiras laterais do sistema foram simuladas em condições de simetria. A fronteira inferior foi considerada fechada e adiabática. A fronteira superior, topo, foi considerada *pressure outlet* com 0 barg.

Na saída da válvula, início do escoamento, considerou-se como condição inicial a pressão de abertura válvula e 5 milímetros de diâmetro. A intensidade de turbulência foi configurada em 10% (Hooker et al., 2017).

O solver usado no FLUENT foi o *Pressure-Based (SIMPLE)* (Tabela 4.7) e a solução foi desenvolvida considerando o estado estacionário (Cirrone et al. 2019a; Mashhadimoslem et al., 2021). Os critérios de convergência usados para DO e energia foi  $10^{-6}$  e para as demais equações  $10^{-3}$ .

Tabela 4.7: Métodos de solução no FLUENT

Variável	Spatial Discretization	Fatores de relaxação
Pressure-Velocity Coupling	SIMPLE	-
Pressão	Second order upwind	0,5
Densidade	Second order upwind	0,25
Momentum	Second order upwind	0,5
Espécies	Second order upwind	0,75
Turbulência	First order upwind	0,75
Radiação	First order upwind	1
Energia	Second order upwind	0,75

A equação escolhida para a estimativa da massa específica do gás no jato de fogo foi a equação para gases ideais (Eq. 55), devido ao escoamento ocorrer para a pressão ambiente e sob altas temperaturas.

$$\rho = \frac{PM_c}{RT} \quad (\text{Eq. 55})$$

O modelo de combustão usado foi o EDM e para o escoamento foi usado o modelo k- $\epsilon$  Realizable. Para a radiação, foi usado o modelo DO (Eq. 53) com  $\Theta \times \phi$  iguais a 10x10 e respectivos pixels iguais 5x5 (ANSYS Inc, 2022b; Cirrone et al.<sup>a</sup> 2019a, 2019b).

A aquisição das informações de radiação térmica foi feita de forma similar ao método usado por Cirrone et al. (2019b, 2019a), através de radiômetros inseridos como superfícies com configuração isotérmica e emissividade igual a 1. A superfície isotérmica previne o aumento de temperatura dos sensores e a emissividade igual a 1 considera toda a radiação recebida pela superfície.

#### **4.2.2.3 Validação da simulação do jato de fogo dos testes de campo**

A validação será feita de duas formas:

- 1) As simulações para o jato de fogo dos testes de campo serão validadas através da comparação de resultados da forma da chama (comprimento e altura) obtidos nos testes experimentais de campo (T1CB e T2SP);
- 2) Testes laboratoriais do jato de fogo com medição do fluxo térmico incidente a diferentes distâncias da chama serão feitos. Também será medida a forma do jato de fogo (comprimento e altura). Em sequência, será simulado o jato de fogo para as condições laboratoriais, usando a mesma metodologia das simulações do jato de fogo dos testes de campo. Com isso, além da validação da forma do jato de fogo, também é possível validar a radiação incidente num alvo através da comparação dos valores experimentais e simulados.

Os testes laboratoriais do jato de fogo serão feitos com uma garrafa metálica contendo propano e com o redutor acoplado, colocado sobre uma balança. As mesmas condições de contorno, configuração e critérios de convergência das simulações do jato de fogo dos testes de campo será aplicada à simulação do jato de fogo dos testes laboratoriais. Contudo, o diâmetro do orifício de escoamento do jato de fogo laboratorial é igual a 6 milímetros, correspondente ao redutor acoplado à garrafa, e o caudal usado foi de 5,7 g.s<sup>-1</sup>, correspondente ao medido em laboratório.

A balança usada foi uma A & D HW-100KGL com frequência de 1Hz. O programa usado para aquisição de dados de perda de massa foi o RSKKey v.1.40. O caudal do jato de fogo esteve entre  $5,4$  e  $6 \text{ g}\cdot\text{s}^{-1}$ , quando o caudal reduzia a  $5,4 \text{ g}\cdot\text{s}^{-1}$  a garrafa era substituída por uma nova. Foi usado um sensor de temperatura e de fluxo térmico (total), IHF01 Hukseflux (FI 1, TI 1), já descrito no item 4.2.1. O mesmo sistema de aquisição de dados dos demais testes laboratoriais foi usado. O instrumento (FI 1, TI 1) foi posicionado perpendicularmente ao eixo axial do orifício de escoamento do jato de fogo, à mesma altura desse eixo e no ponto médio do seu comprimento, com diferentes distâncias ( $D_1$ ) do eixo axial (Figura 4.16). Foram feitos 24 testes a diferentes distâncias entre o instrumento e a chama (Tabela 4.8): 3 testes para cada distância de 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70 e 80 cm. A repetição para os testes foi feita devido à oscilação da chama no sentido lateral.

Os testes foram gravados usando uma câmara infravermelho (CAM IR) FLIR SC 660 e uma câmara de vídeo Sony 4K, posicionadas perpendicularmente ao jato de fogo, à distância de 7 metros.

O comprimento do jato de fogo foi medido manualmente por dois operadores usando os equipamentos de proteção adequados para evitar queimaduras. Para isso foi usada uma fita métrica metálica. As medições do comprimento foram feitas em cada teste com a fita métrica posicionada em paralelo ao jato, na lateral e na borda da chama.



Figura 4.16: Imagens dos testes laboratoriais do jato de fogo; (a) fotografia do teste; (b) desenho esquemático do aparato experimental.

Tabela 4.8: Sumário dos testes laboratoriais do jato de fogo

Teste	Referência	Distância (cm)
12-14	TJF10	10
15-17	TJF20	20
18-19	TJF30	30
20-22	TJF40	40
23-25	TJF50	50
26-28	TJF60	60
29-31	TJF70	70
32-34	TJF80	80

### 4.3 A proteção para as garrafas de GPL e seus testes

A fim de reduzir significativamente o calor que alcança a garrafa de GPL durante um incêndio e evitar futuros acidentes, dois materiais foram usados para compor dois dispositivos de proteção (PD1 e PD2). Testes laboratoriais e de campo foram planejados para avaliar a eficiência dos dispositivos. Esse é um sistema alternativo para pessoas que vivem em áreas rurais sem acesso a proteções industriais e comerciais, barato, leve, móvel e fácil de ser construído.

A proteção foi construída em duas partes. A primeira e mais externa é composta por um material incombustível, anexado sobre a segunda parte. A segunda parte, igual para PD1 e PD2, é uma estrutura feita em tubos de metal de secção quadrada, com geometria semelhante à de um cubo, com faces abertas e uma alça para movimentação. Na lateral de PD1 e PD2 há uma pequena abertura de 15x15 cm<sup>2</sup> para passar o tubo de gás. A proteção foi construída para garrafas com 11 a 13 kg de GPL e volume até 26 litros, fabricados sob as normas europeias (European Committee for Standardization, 2018, 2017, 2012). A proteção possui as seguintes dimensões: 65 cm de altura; 45 cm de comprimento e de largura.

PD1 é composto por um tecido (manta) contendo uma fina camada de alumínio na face externa. A manta é considerada incombustível de acordo com a classificação europeia para produtos de construção (EN 13501), como M0 (classificação antiga) ou “A” (atual classificação). A manta foi escolhida para compor a proteção da garrafa de GPL considerando uma investigação desenvolvida no CEIF, no escopo do projeto FIREPROTECT (CENTRO-

01-0246-FEDER-000015), o qual constatou que, dentre as quatro mantas testadas, essa é a melhor (Batista, 2019; Pereira et al., 2022; C. Viegas et al., 2021). A manta possui, conforme informações do fabricante, 0,5 milímetro de espessura,  $220 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$  de massa específica, calor específico de  $795 \text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$  e condutividade térmica de  $0,04 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ . A composição química é: 14-15,5 % de  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ; 53-55% de  $\text{SiO}_2$ , 16,5 – 17% de  $\text{CaO}_2$ ; 6,5-8,5% de  $\text{B}_2\text{O}_3$ . A emissividade pode ser considerada 0,85, valor comum para tecidos de fibra de vidro (Redmond and Mastropietro, 2015; C. Viegas et al., 2021).

PD2 é composto por placas cerâmicas e também é classificado como “A”, de acordo com a EN 13501. As características do material são: composto de óxido de magnésio (MgO) reforçado com fibra de vidro; possui 9 milímetros de espessura; condutividade térmica igual a  $0,213 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ .

#### 4.3.1 Testes da proteção: laboratoriais

Foram realizados 25 testes para a validação de PD1 e PD2, 24 testes laboratoriais e 1 de campo. Também foram feitos testes de referência sem proteção para obter o fluxo de calor e a temperatura na superfície da garrafa. Os testes laboratoriais foram feitos a 4 distâncias das chamas: 0,25; 0,50; 0,75 e 1 metro.

Devido à variação da humidade do combustível, diferentes valores de temperatura e humidade ambiente e, conseqüentemente, diferentes intensidades de fluxo térmico, para cada distância nos testes feitos com o PD1 foram feitas 2 repetições. Para o PD2, apenas os testes à 0,25 e a 1 metro tiveram 2 repetições (Tabela 4.9).

Em cada teste foram usados 10 kg de arbusto (mistura de *Erica umbelatta*, *Erica australis*, *Ulex minor*, *Chamaespartium tridentatum* e *Avena sativa*), colocados em um cesto com volume de  $1 \text{ m}^3$ , com diferentes teores de humidade. O arbusto foi usado de acordo com outros autores (Pinto et al., 2017; Rodrigues et al., 2019; D. X. Viegas et al., 2021; Viegas et al., 2006) e por ser vegetação similar à encontrada no local dos testes de campo.

Tabela 4.9: Sumário dos testes com as proteções

Teste	Referência	Distância (m)	Tipo	Humidade do combustível (%)	Temperatura do ambiente (°C)
35	F25-1	0,25		16,1	24,3
36	F25-2	0,25		11,5	19,7
37	F25-3	0,25		11,5	19,5
38	F50-1	0,50		14,3	15,1
39	F50-2	0,50		11,5	19,7
40	F50-3	0,50	Laboratório	11,5	19,7
41	F75-1	0,75	PD1	16	25,6
42	F75-2	0,75		11,5	19,7
43	F75-3	0,75		11,5	19,7
44	F100-1	1		16	22,5
45	F100-2	1		10	20
46	F100-3	1		10	19,8
47	R25-1	0,25		14	12,5
48	R25-2	0,25		12,9	18
49	R25-3	0,25		12,9	18
50	R50	0,50	Laboratório	14	12,5
51	R75	0,75	PD2	14	12
52	R100-1	1		14	12
53	R100-2	1		14	12
54	R100-3	1		12,9	16
55	Ref25	0,25		13,7	11,9
56	Ref50	0,50	Laboratório	14,2	12
57	Ref75	0,75	referência	13,7	11,6
58	Ref100	1		13,7	11,8
59	PSS	-	Campo PD1	40	21

#### 4.3.1.1 Aparato experimental

A superfície da garrafa foi equipada com um sensor de temperatura e de fluxo térmico (total), IHF01 Hukseflux (FI 1, TI 1), posicionado à meia altura da garrafa. O mesmo procedimento foi feito na superfície externa da manta (PD1) e da cerâmica (PD2) (FI 2, TI 2). Dois termopares tipo K foram usados. O primeiro foi colocado em uma superfície a 10 cm do cesto (TI 3); o segundo foi colocado na parede do laboratório, longe da influência das chamas (TI 4) (Figura

4.17). Os sensores de fluxo térmico foram configurados conforme descrito no item 4.1.2 para os testes de campo. Os termopares foram conectados a um módulo 9213 da NI e ambos os módulos foram conectados a um chassis modelo cDAQ-9174 da NI, permitindo sinal contínuo com frequência de 1 Hz, sendo os dados transmitidos simultaneamente ao computador. Os testes foram gravados usando uma câmera infravermelho (CAM IR) FLIR SC 660 e uma câmera de vídeo Sony 4K. As configurações dos instrumentos foram feitas de acordo com Barbosa et al. (2022) e Raposo (2016). A câmera IR e a de vídeo foram colocadas a 8 metros da face lateral do cesto.

A combustão no cesto durou aproximadamente 6 minutos. Aos 2,5 minutos as chamas começaram a reduzir. Aos 5 minutos apenas pequenas chamas restavam. O tempo de exposição nos testes laboratoriais com PD1 foi considerado 6 minutos, o qual é um maior tempo de residência para frente de chamas de fogos causados por vegetação sem madeira (Cohen, 1995; Cohen and Butler, 1996). Contudo, devido à inércia térmica de PD2, manteve-se a garrafa sob brando aquecimento mesmo após o cessar das chamas. Dessa forma, nos testes com PD2 foram considerados 8 minutos.

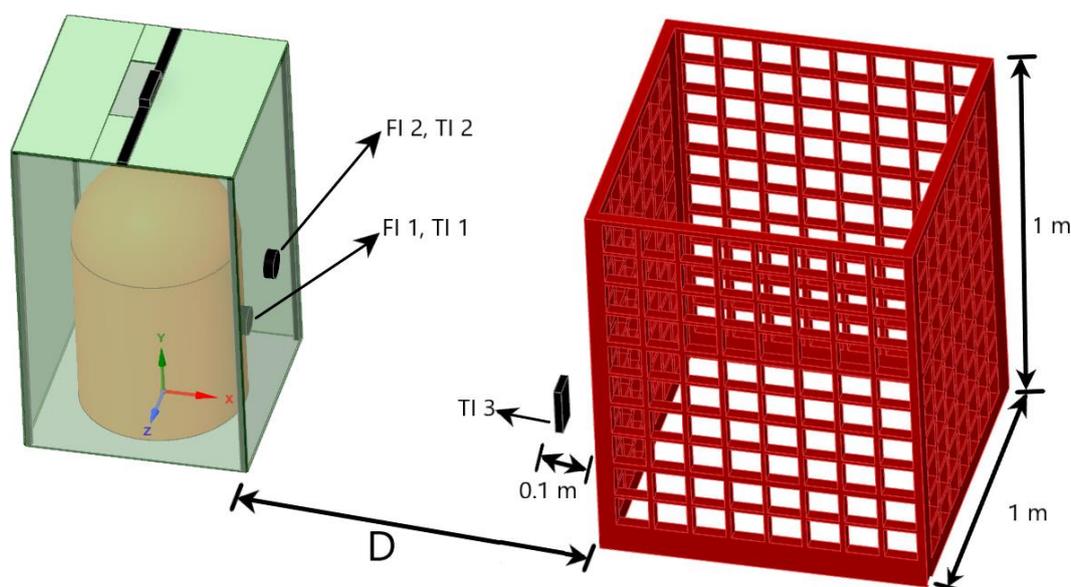


Figura 4.17: Desenho esquemático dos testes de proteção feitos no laboratório e respectivos instrumentos.

### 4.3.2 Teste da proteção: campo

No teste de campo (PSS) o aparato instrumental usado foi o mesmo dos testes laboratoriais. O teste de campo teve o objetivo de avaliar a proteção em um cenário real e de validar os resultados dos testes laboratoriais.

O teste foi feito sob condições adversas, diferentes do laboratório: influência do clima, vento e declive. Por essa razão, medições foram feitas usando uma estação meteorológica modelo Vantage Vue da Davis Instruments, para saber a velocidade e direção do vento, humidade relativa do ar e temperatura ambiente. Os testes de campo foram feitos com um declive de 30%, coberto por arbustos de até 50 centímetros de altura e humidade do combustível de 40%. A humidade relativa do ar estava a 57%, a temperatura ambiente a 21°C, e velocidade do vento entre 4,8 a 9,7 km.h<sup>-1</sup>.

A garrafa de GPL coberta pela proteção foi colocada em meio à vegetação. A ignição foi feita na base do declive (Figura 4.18).



Figura 4.18: Testes da proteção feitos em campo.

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 5.1 Testes sem proteção: comportamento, efeitos, estimativas

#### 5.1.1 Teste T1CB

Quando a garrafa compósita foi exposta ao fogo a sua superfície comportou-se como combustível, envolvendo a si pela própria chama. Isso gerou um acentuado incremento da pressão e da temperatura da superfície da garrafa. A camada mais externa, feita em PE, foi rapidamente consumida. Para a segunda camada, todo o PP foi consumido, restando apenas a FV danificada pelas chamas (Figura 5.1).



Figura 5.1: Teste T1CB; (a) garrafa compósita antes do teste; (b) garrafa compósita após o teste.

A aquisição de dados de pressão foi perdida após 6 minutos do início do teste. Isso ocorreu porque os componentes poliméricos do redutor foram consumidos pelas chamas, com isso a conexão entre o tubo metálico e a válvula foi perdida. A temperatura na superfície da garrafa foi superior aos 1000°C na base e 700°C no topo da garrafa (Figura 5.2).

A PRD funcionou evitando o BLEVE. Porém, não foi suficiente para impedir o acentuado incremento de pressão. A PRD tinha configuração de abertura aos 21 bar (Figura 5.3). A PRD manteve-se aberta por 120 segundos para a primeira abertura e por 95 segundos para a segunda

abertura. A garrafa alcançou a pressão máxima de 46,4 bar no mesmo momento em que a PRD estava aberta. Também foi visto o escoamento do gás através da abertura do fusível.

Esses resultados indicam que a abertura da PRD da garrafa compósita a uma pressão inferior à PRD da garrafa metálica e a presença do fusível tem - considerando a previsão da combustão do polímero aquecer o fluido armazenado – o objetivo de aumentar a segurança e equilibrá-la em contraponto ao prejuízo à segurança que o material polimérico combustível possa causar.

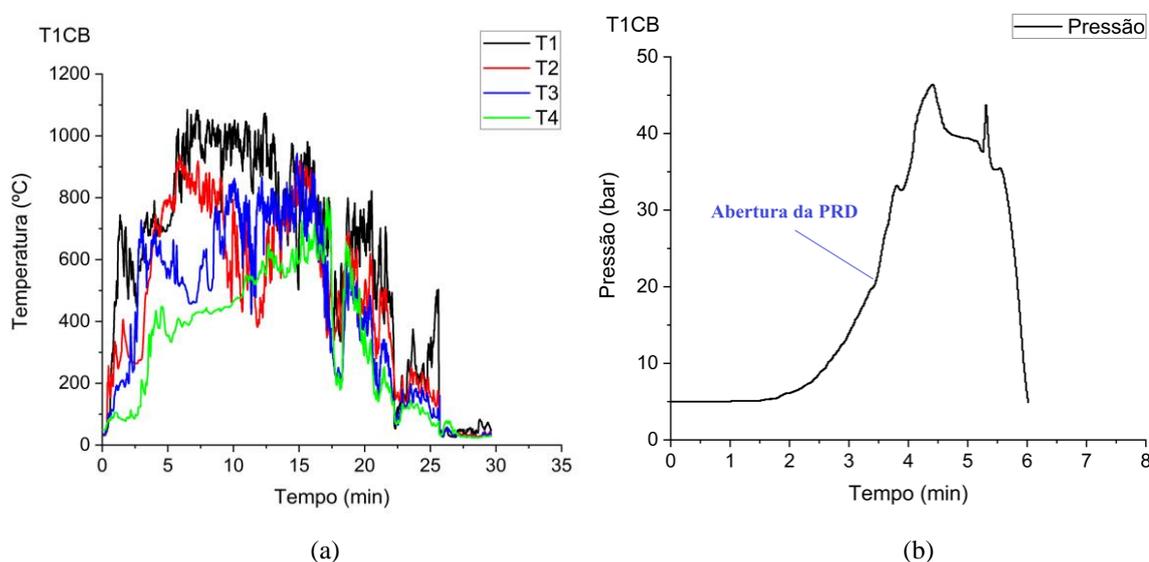


Figura 5.2: Aquisição de dados do teste T1CB; (a) Temperatura na superfície; (b) Pressão.

Com a abertura da PRD, um jato de fogo com o comprimento entre 6,8 e 8,3 metros e até 0,5 metros de largura foi formado (Figura 5.3), apresentando durante o teste uma geometria próxima a de um cilindro. Uma vez que a CAM IR estava configurada para registos de temperatura na gama 0 a 550 °C (273-824 K), a fim de obter-se a forma do jato de fogo através de suas bordas, a temperatura registada no centro do jato de fogo foi 824 K. Contudo, é possível afirmar que no centro do jato a temperatura era maior, uma vez que a imagem da CAM IR atingiu o valor máximo configurado. Outros autores também encontraram temperaturas de chama similares, na gama de 700 a 1200 K para o propano e 950-1050 K para o butano (Lowesmith et al., 2007).



Figura 5.3: Imagem do jato de fogo do teste T1CB; (a) câmara visível; (b) câmara IR

### 5.1.2 Teste T2SP

No teste T2SP, diferentemente do teste T1CB, a garrafa metálica não se torna combustível, com isso foram registadas temperaturas menores na superfície. Mesmo sendo o propano um fluido com maior pressão de vapor que o butano, no teste T2SP foi verificado menor incremento de pressão e menor pressão máxima (31,9 bar) que o teste T1CB contendo butano (Figura 5.4).

No teste T2SP, a PRD foi capaz de manter a garrafa em segurança, não ocorreu o BLEVE nem a deformação da garrafa devido a expansão do material. Após 11 minutos de teste a conexão entre o transdutor de pressão e o redutor foi perdida.

Um jato de fogo de comprimento e largura similar ao jato de fogo do teste T1CB foi formado (Figura 5.5). Nos testes T1CB e T2SP foi verificado que a geometria que melhor se adequa ao jato de fogo é a cilíndrica e, em ambos casos, a temperatura no centro do escoamento foi superior a 824 K. Essa geometria deve ser considerada para a estimativa do calor liberado pela superfície emissiva (SEP) do jato de fogo. Através das imagens da CAM IR, verificou-se que após o jato sem chama (*lift-off*) não existe área predominantemente com SEP maior ou menor, pois as temperaturas na superfície do jato mudam rapidamente e de forma aleatória. Por isso, para efeitos de estimativa de radiação térmica, o cilindro pode ser considerado com SEP uniforme. Em relação ao jato sem chama, o comprimento encontrado nos testes variou entre 10 e 40 centímetros.

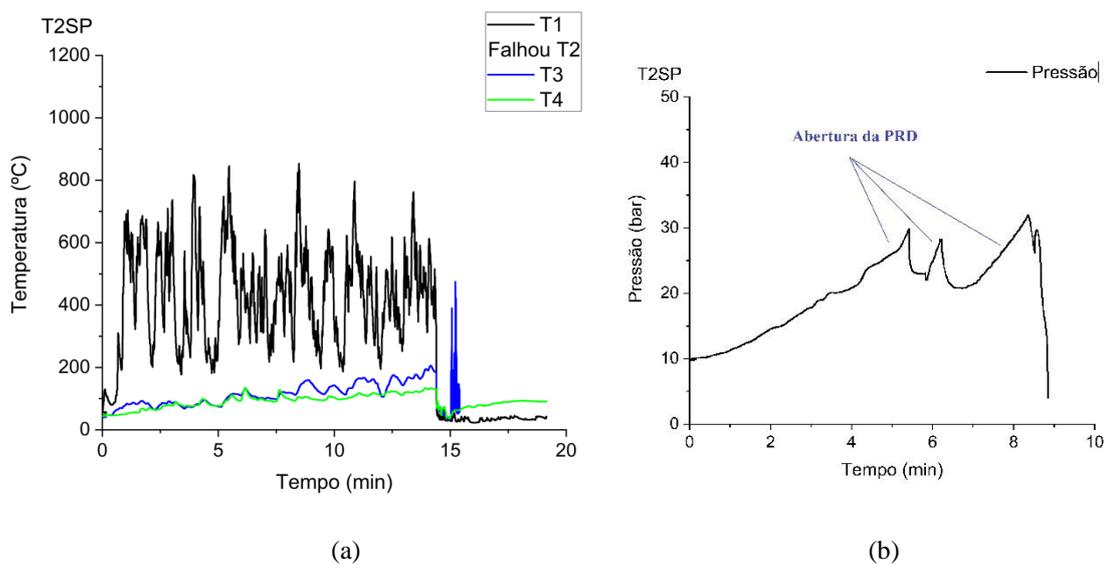


Figura 5.4: Aquisição de dados do teste T2SP; (a) Temperatura na superfície; (b) Pressão.

A PRD abriu 3 vezes durante o teste T2SP, sendo a primeira abertura por 55 segundos, a segunda por 20 segundos e a última por 25 segundos. Após o teste T2SP, 1 kg de propano restou na garrafa.



Figura 5.5: Imagem do Jato de fogo do teste T2SP; (a) câmara visível; (b) câmara IR.

### 5.1.3 Jato de fogo

O jato de fogo é um evento que, considerando o tempo de duração, causa em um alvo uma maior dose de radiação que a bola de fogo. Isso é uma característica perigosa relativamente à propagação de um incêndio, porque os materiais receberão radiação por mais tempo.

A intensidade da radiação térmica para o jato de fogo foi estimada (Figura 5.6) através das equações 19 e 27 e do Anexo E (fator de forma), considerando os seguintes parâmetros:

- valores experimentais de comprimento e largura (7 e 0,5m, respetivamente) do jato de fogo obtidos nos testes T1CB e T2SP;
- medições ambientais no momento dos testes experimentais, nomeadamente a humidade relativa com valor igual a 57% e a temperatura ambiente com o valor igual a 295 K;
- emissividade de 0,5 e temperatura média de chama igual a 1000 K (Lowesmith et al., 2007; Palacios et al., 2012);

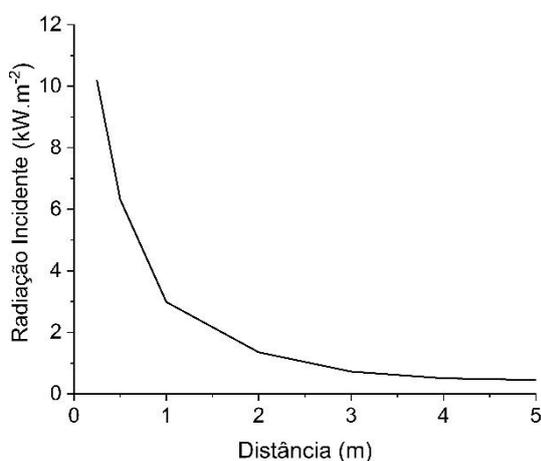


Figura 5.6: Radiação incidente do jato de fogo em alvos até a distância de 5 metros.

A distâncias até 1 metro do jato de fogo a radiação possui alta intensidade. Diferente da bola de fogo, que durou apenas 1,3 segundo, nos testes T1CB e T2SP o tempo de duração do jato de fogo foi de 215 segundos e 100 segundos, respetivamente. A radiação com intensidade até 10 kW·m<sup>-2</sup> durante tempo prolongado de exposição pode causar a ignição de materiais de

construção e mobília (DiNenno et al., 2002; Quintiere, 2006). Além disso, considerando o comprimento do jato de fogo, 6,8 – 8,3 metros, os materiais podem estar em contato direto com as chamas, o que causaria uma significativa redução do tempo para a ignição e propagação do incêndio.

Com isso, na IUF, uma garrafa de GPL sob aquecimento devido às chamas, por exemplo da vegetação nas imediações de uma casa, pode propagar o incêndio através do jato de fogo para essa casa, a depender da direção a qual a PRD esteja orientada.

#### 5.1.4 Testes T3SP e TH

Os TH foram feitos para efeitos de avaliação da influência das chamas na pressão de rotura. Os resultados são mostrados na Tabela 5.1. Os resultados para a pressão de rotura sem chamas para os dois tipos de garrafas são próximos, com uma ligeira superioridade para a garrafa metálica.

Tabela 5.1: Resultado dos testes hidrostáticos

Teste	Referência	Pressão (bar)	Tipo	Média (bar)
1	HT1	90,5	Metal	91,9 ± 0,94
2	HT2	91,5		
3	HT3	92,6		
4	HT4	92,8		
5	HT5	91,7	Compósito	90 ± 1,22
6	HT6	89,4		
7	HT7	88,4		
8	HT8	90,4		

A garrafa usada no teste T3SP não tinha uma PRD e alcançou a pressão máxima de 45,5 bar à temperatura de até 800°C (Figura 5.7). O BLEVE ocorreu ao fim de 14 minutos de teste. No exato momento da rotura da garrafa, a pressão era muito inferior à pressão máxima alcançada durante o teste. A pressão no momento do BLEVE era 16,3 bar e a temperatura na superfície da garrafa era 62°C. Quatro minutos antes do BLEVE já não havia chamas, apenas brasas. O BLEVE ocorreu durante o arrefecimento e podia-se perceber que a forma da garrafa tinha um diâmetro maior que o visto no início do teste.

A pressão de rotura no teste T3SP foi apenas 18% da média dos TH para garrafas metálicas (91.9 bar). As chamas reduziram significativamente a pressão de rotura. Isso é atribuído ao estresse térmico (altas temperaturas e o gradiente térmico na parede da garrafa devido ao contato superfície-líquido e superfície-vapor) e a alta pressão no interior do reservatório. Ambos combinados causam falhas na estrutura do material, principalmente nas zonas em contato com o vapor (zonas com maior temperatura) que apresentam maior concentração do estresse quando comparado às zonas com menor temperatura que estão em contato com o líquido (Crowl and Louvar, 2001; Manu et al., 2009; Tschirschwitz et al., 2017). Portanto, o perigo de um BLEVE não cessa com o término das chamas. Uma garrafa de GPL pode romper, inclusive, na ausência de chamas.

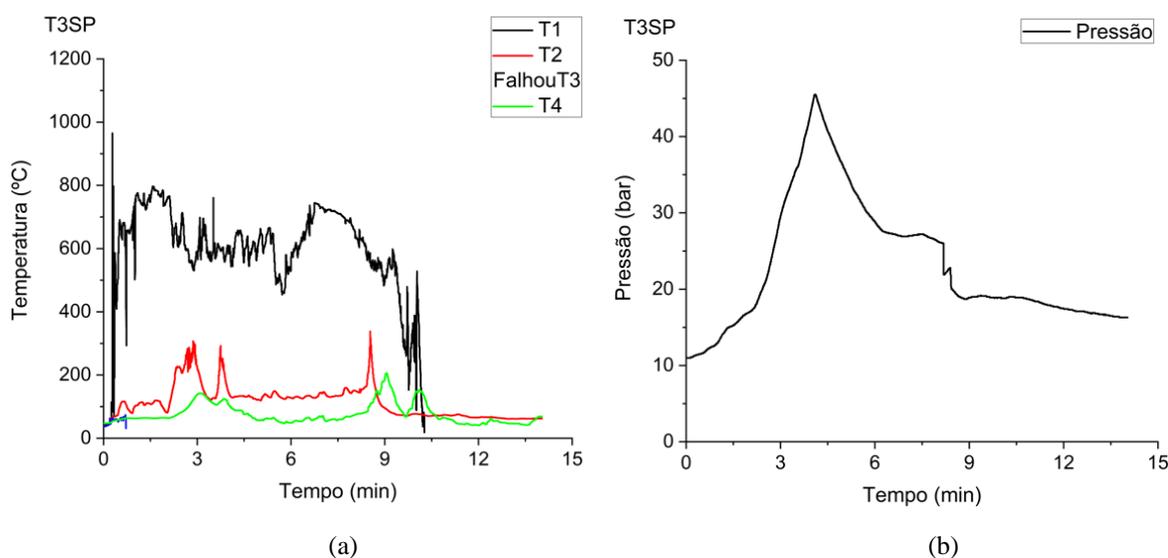


Figura 5.7: Aquisição de dados do teste T2SP; (a) Temperatura na superfície; (b) Pressão.

#### 5.1.4.1 Projeção de fragmentos

Como efeitos do BLEVE, fragmentos da garrafa (fragmentos primários) e fragmentos dos instrumentos, suporte, peças de fixação e outros (fragmentos secundários) foram lançados a longas distâncias.

A rotura da garrafa gerou duas peças, a primeira com 10,63 kg e a segunda com 4,33 kg. A garrafa vazia pesa em média 15,3 kg. Por isso, foi coletado 97,72% da massa da garrafa após o BLEVE, tornando fiável a medição da dispersão dos fragmentos primários.

Os fragmentos foram lançados de forma aleatória no campo de testes. A distância máxima alcançada pelos fragmentos foi 113 metros e a velocidade média até  $252 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ . Os fragmentos que alcançaram as maiores distâncias foram os fragmentos primários (Figura 5.8 e Tabela 5.2). Pode ser notado que os fragmentos primários, apesar da maior massa, alcançaram maiores distâncias que os fragmentos secundários. Isso pode ser devido a: já estarem sob tensão desde antes da rotura, tendo recebido inicialmente grande parte da transferência energética da pressão do fluido aquecido; terem uma maior área para a ação das forças de arrasto que os fragmentos secundários.



Figura 5.8: Dispersão dos fragmentos após explosão no teste T3SP; fragmentos 10 e 11, em azul, são primários; posição inicial do cilindro em vermelho.

Tabela 5.2: Dados de fragmentação do teste T3SP

Fragmento	Origem	Tipo	Massa (kg)	Distância (m)
1	Suporte	Secundário	0,38	24
2	Suporte	Secundário	0,38	50
3	Suporte	Secundário	0,74	43
4	Suporte	Secundário	0,38	23
5	Varão	Secundário	1,4	9
6	Suporte	Secundário	2,754	6
7	Suporte	Secundário	0,46	14
8	Suporte	Secundário	0,375	18
9	Suporte	Secundário	0,63	56
10	Garrafa	Primário	4,325	113
11	Garrafa	Primário	10,63	86
12	Válvula	Secundário	0,167	22

A Tabela 5.3 mostra o percentual acumulado dos fragmentos relativamente ao alcance. A maior quantidade de fragmentos (10) foi encontrada até 80 metros. Apenas os fragmentos primários alcançaram distâncias maiores que 80 metros.

Tabela 5.3: Relação percentual e acumulada entre os fragmentos e a distância

$\Sigma$ Quantidade de fragmentos	% de fragmentos	Distância (m)
2	16,7	até 10
7	58,3	até 40
10	83,3	até 80
12	100,0	até 113

A Tabela 5.4 apresenta a velocidade média ( $V_m$ ) dos fragmentos primários em dois momentos e à respetiva distância do ponto de referência. Pode ser visto na tabela que a velocidade diminui à medida que a distância aumenta. O fragmento primário 11, mais pesado, alcançou menor distância que o fragmento primário 10, mais leve. Com as velocidades médias apresentadas, os fragmentos podem colocar em risco a vizinhança e causar mortes.

Em relação ao perfil de rotura da garrafa, a fratura não ocorreu na solda (Figura 5.9). O perfil de rotura foi longitudinal e transversal, similar ao descrito por outros autores (Baum, 1999; Casal, 2008).

Tabela 5.4: Velocidade média estimada dos fragmentos primários em dois momentos, a 0,3 e 1 segundo

Fragmento	Estimativa	Tempo (s)	Distância (m)	$V_m$ ( $m.s^{-1}$ )	$V_m$ ( $km.h^{-1}$ )
11	11-1	0,3	15	50	180
	11-2	1	40	40	144
10	10-1	0,3	21	70	252
	10-2	1	70	60	216

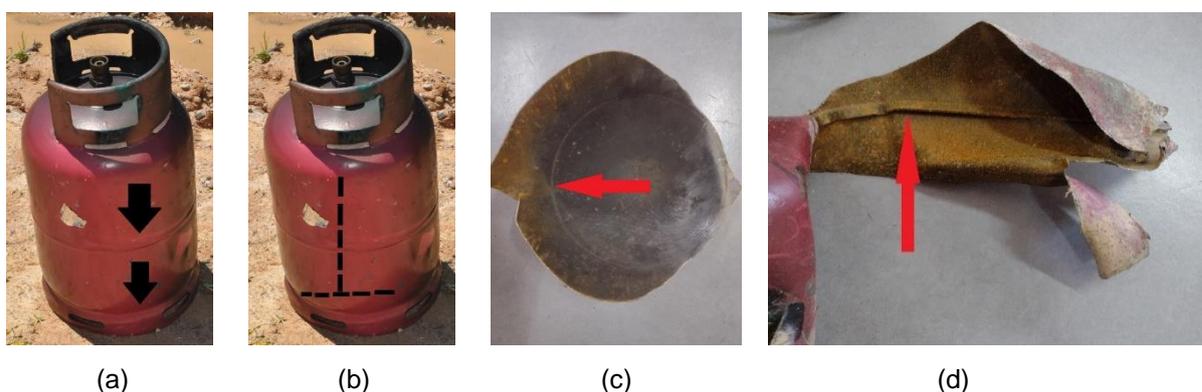


Figura 5.9: Fotografias do perfil de rotura da garrafa do teste T3SP; (a) soldadura antes da rotura; (b) perfil de rotura; (c) e (d) perfil de rotura e soldadura após rotura.

Outros autores também fizeram testes com reservatórios de GPL, propano e mistura de propano e butano, com massa armazenada entre 5 e 12 kg, sob fogo até a explosão. O resumo das informações das explosões é mostrado na Tabela 5.5. Essas são informações significantes uma vez que foram obtidas de forma experimental e não através de estimativa. A diferença de pressão no momento da rotura ocorre principalmente devido à carga térmica: no trabalho feito por Stawczyk (2003), a fonte de calor foi um queimador a gás o que proporciona carga térmica uniforme durante o período de teste, ao contrário dos testes feitos nesta tese; e no trabalho feito por Tschirschwitz et al. (2017) a carga térmica foi superior à usada nesta tese.

Tabela 5.5: Resumo das informações de diferentes autores sobre as explosões

Sobrepresão $5 \leq d \leq 10\text{m}$ (bar)	Tempo para a falha (min)	Pressão de rotura (bar)	Diâmetro/altura da Bola de fogo (m)	Velocidade dos fragmentos (km·h <sup>-1</sup> )	Distância máxima dos fragmentos (m)	Referência
-	14	16,3	11,5/14,5	até 252	113	Este trabalho
0,27	1,5-2,5	70,7-98,2	-	-	262	Tschirschwitz <i>et al.</i> , 2017
0,5	-	120	-	-	300	Stawczyk, 2003

#### 5.1.4.2 Bola de fogo

O BLEVE gerou uma bola de fogo de 14,5 metros de altura e largura de 11,5 metros (Figura 5.10), com duração de 1,3 segundo. Uma vez que a gama de aquisição de imagens da CAM IR foi 0 a 550 °C (273 a 824 K), o centro da bola de fogo alcançou temperatura maiores que 550 °C.

O centro da bola de fogo foi movido no mesmo sentido do vento, a 6 metros do ponto de referência. Considerando as medições em campo, a radiação emitida pela bola de fogo e seus efeitos podem ser estimados.

Para valores de fração de calor radiado ( $\mu_{rad}$ ) iguais a 0,33, calor de combustão do propano de 46000 kJ.kg<sup>-1</sup> (C.J.H. van den Bosch, 2005; Casal, 2008; Gómez-Mares et al., 2010), o tempo de duração da bola de fogo igual a 1,3 segundo, diâmetro e altura da bola de fogo iguais a 11,5 e 14,5 metros, respetivamente, 40% de humidade relativa e temperatura ambiente de 299,05 K, tem-se através das equações 9, 10, 17-23 o perfil de fluxo de calor incidente e a dose num alvo com valores até 120 kW.m<sup>-2</sup> e 800 (kW.m<sup>-2</sup>)<sup>4/3</sup>, respetivamente (Figura 5.11).

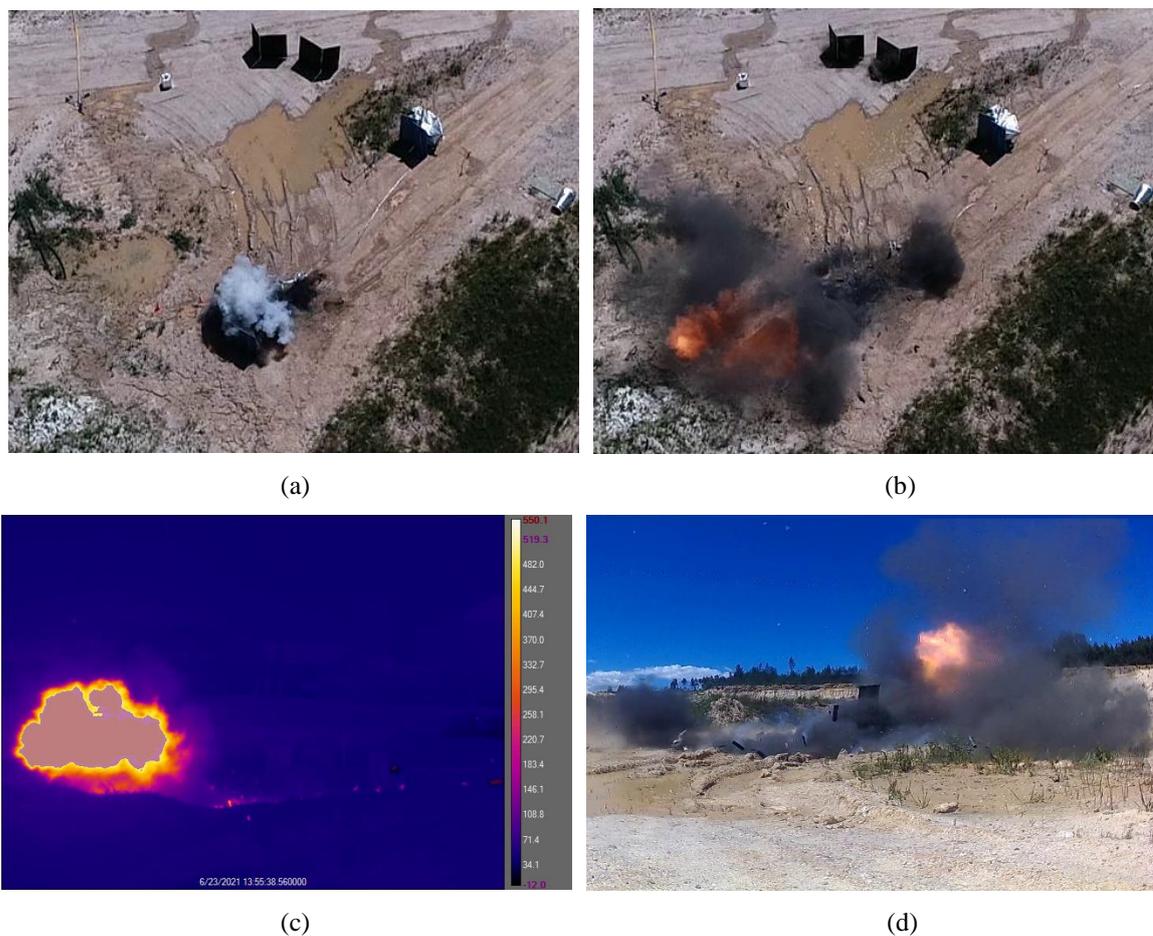


Figura 5.10: Fotografias da bola de fogo do teste T3SP; (a) e (b) Imagens do DRONE; (c) CAM IR; (d) Action cam.

A bola de fogo causa grande efeito visual e a radiação térmica estimada mostra valores altos. Contudo, considerando a curta duração da bola de fogo de uma garrafa de GPL, a dose pode não ser letal. Para a radiação incidente encontrada, a probabilidade de queimaduras de 2º grau é de 50%, sendo pequena a probabilidade de letalidade (Anexos F e G)

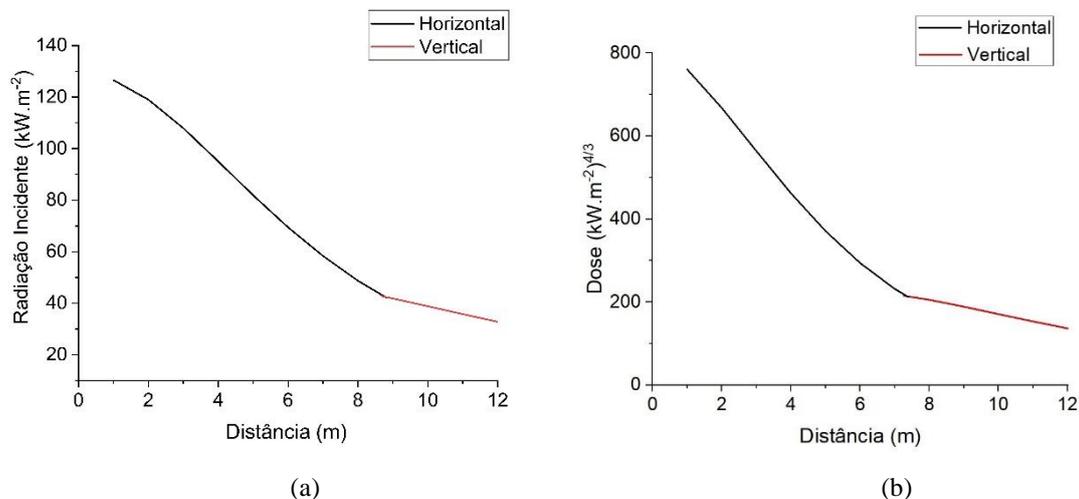


Figura 5.11: (a) Radiação incidente e (b) dose recebida; ambos para a bola de fogo em alvos até 12 metros, considerando os maiores valores para o fluxo e a dose recebidos pelo alvo nas posições vertical e horizontal.

### 5.1.4.3 Sobrepressão

A sobrepressão e seus efeitos podem ser estimados através: das equações 3 e 4; do Anexo B; valor de  $\beta$  igual a 0,45; 95% de FD; temperatura no momento da rotura igual a 343,15 K; e o Anexo A. A figura 5.12 apresenta a sobrepressão a diferentes distâncias.

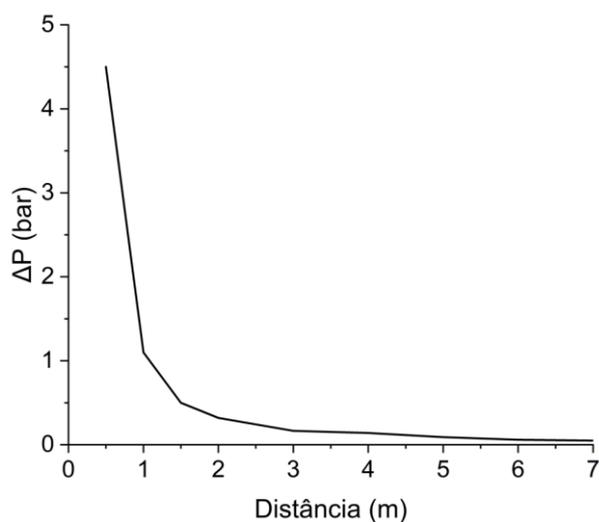


Figura 5.12: Variação de pressão para distâncias até 7 metros do centro da explosão.

Com o valor de sobrepressão (Figura 5.12) e das equações de probit 5 e 6 para danos em humanos, a letalidade a distâncias até 1 metro do ponto de referência tem probabilidade igual a 99,9% (Casal, 2008; Norman A. Eisenberg et al., 1975; Anexo C). De acordo com o Anexo C, à distância até 3 metros a sobrepressão pode projetar um humano adulto e causar rotura dos tímpanos.

Avaliando danos em estruturas e de acordo com o Anexo B, em uma distância até 2 metros a explosão pode causar a destruição de uma casa, como verificado nos casos 5 e 13 descritos no item 1.3 dessa tese. Para distâncias maiores, janelas e telhados podem ser destruídos, além de danos estruturais menores (Casal, 2008; Crowl and Louvar, 2001).

Com isso, é possível afirmar que a curtas distâncias (menores que 3 metros) a sobrepressão causada na vizinhança pela explosão de uma garrafa de GPL é um evento com maior probabilidade de lesão e letalidade que a bola de fogo.

## 5.2 Simulações

### 5.2.1 Simulações do aumento de pressão na garrafa

A Figura 5.13 apresenta o calor incidente aproximado para os testes de campo (T1CB e T3SP) e os respectivos valores médios de fluxo de calor usados nas simulações.

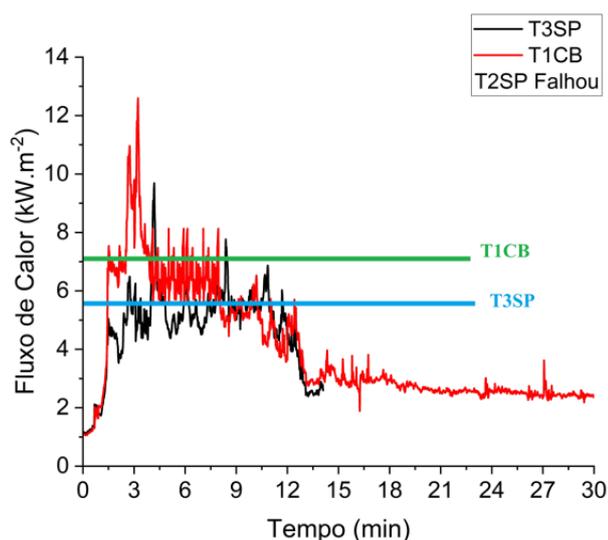


Figura 5.13: Calor incidente na garrafa aproximado para os testes T1CB e T3SP.

As chamas levaram de 2 a 2,5 minutos para se desenvolverem, isso pôde ser visto nas gravações dos testes e na Figura 5.13. Esse tempo para o desenvolvimento ocorreu devido a ação do vento inclinar a chama na direção oposta ao centro do combustível onde estava a garrafa e também por característica intrínseca do combustível florestal. Foram aproximadamente 2 minutos para o teste T1CB e T3SP e 2,5 minutos para o teste T2SP. Esse ajuste é consistentemente feito para a avaliação do incremento de pressão experimental e o simulado, conforme método também usado por Scarponi et al. (2019).

#### **5.2.1.1 Simulação do teste T1CB**

A SIMU T13D apresentou um perfil de incremento de pressão com significativa proximidade dos resultados obtidos no teste T1CB. Contudo, a partir dos 4 minutos (Figura 5.14) há um aumento do erro relativo entre as duas curvas de pressão (experimental x simulada). Esse ponto corresponde no teste T1CB aos efeitos na pressão causado pelo pico de fluxo de calor (aproximadamente 13 kW) que ocorreu entre 3 e 4 minutos de teste, correspondente à combustão do polímero da garrafa. Além disso, nesse intervalo ocorreu a abertura da PRD. Antes desse ponto, ou seja, antes do pico de fluxo de calor e da abertura da PRD, o erro relativo encontrado entre as curvas de pressão real e simulada teve valor máximo igual a 12,5%.

O ponto máximo de combustão do polímero e a abertura da PRD, conforme descrito na metodologia (item 4.4.3), são eventos complexos e não são previstos na simulação. Então, é possível afirmar que, com o erro máximo de 12,5%, a SIMU T1 3D possui considerável correspondência com os resultados experimentais. A secção 5.2.1.4 aborda com maior detalhe a diferença entre as curvas de pressão simulada e experimental.

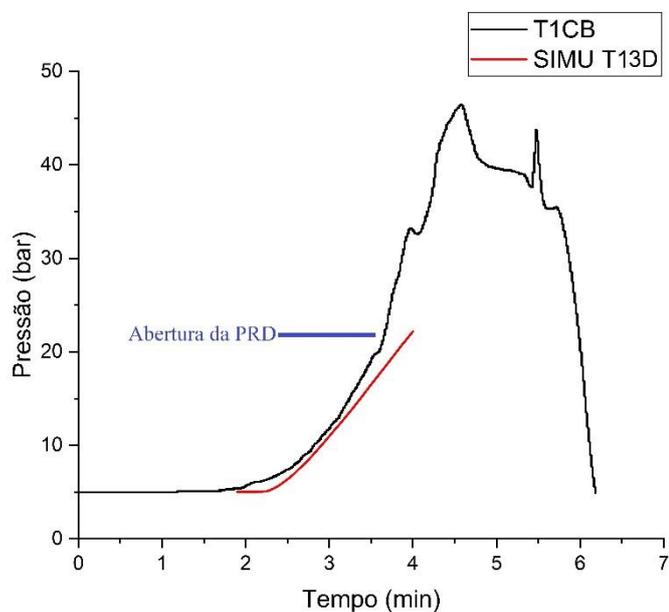


Figura 5.14: Perfil do incremento de pressão do teste T1CB e da simulação SIMU T13D .

Em relação ao perfil de escoamento no interior do reservatório, ele é fortemente influenciado pelo gradiente de temperatura que existe entre a parede da garrafa e o seu centro. Na lateral da garrafa, onde há maior temperatura (Figura 5.15), corresponde à zona de maior velocidade de escoamento (Figura 5.16), com fluxo ascendente nas proximidades da parede e descendente ao centro da garrafa, com velocidades de até  $0,05 \text{ m.s}^{-1}$ .

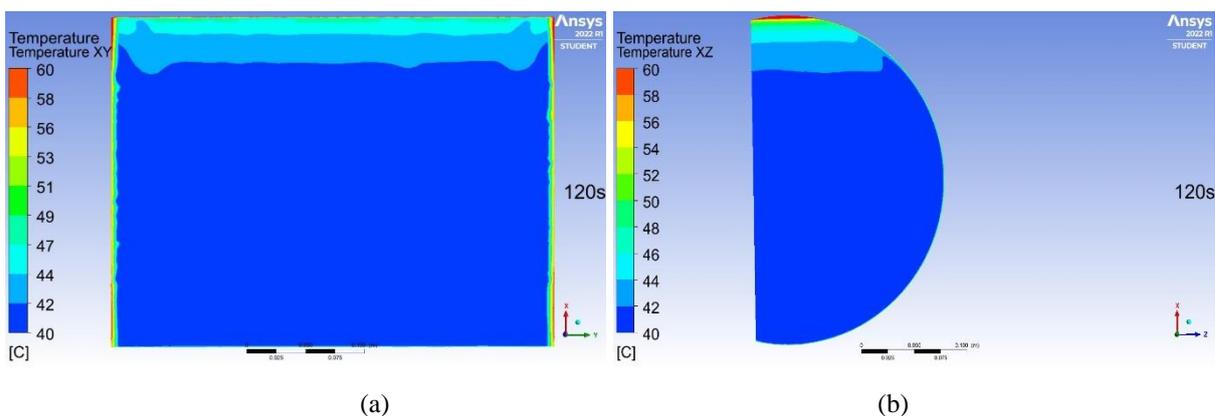
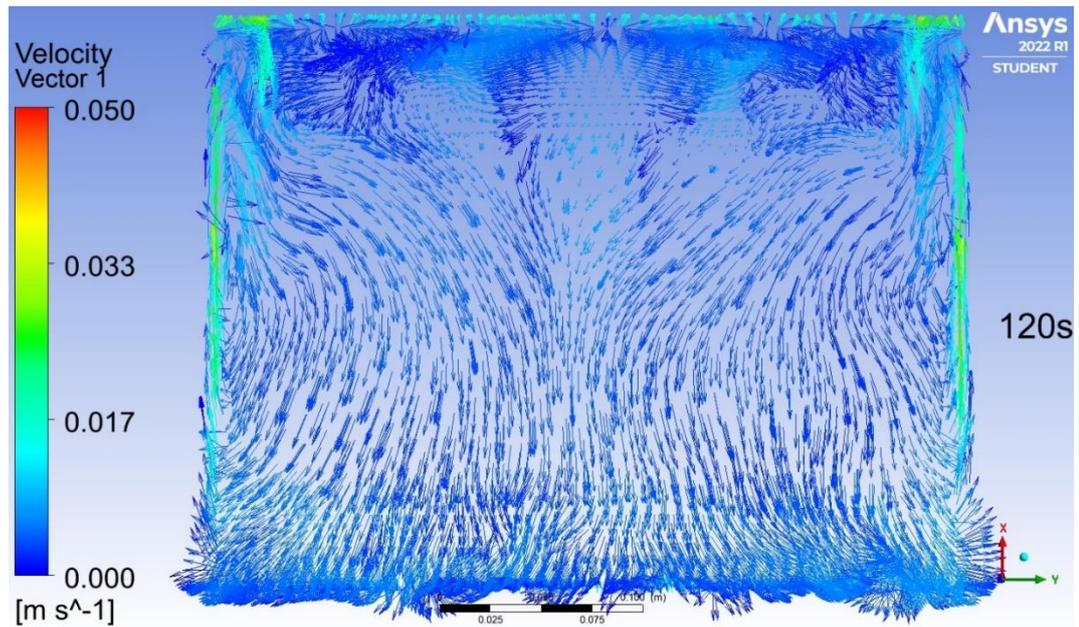
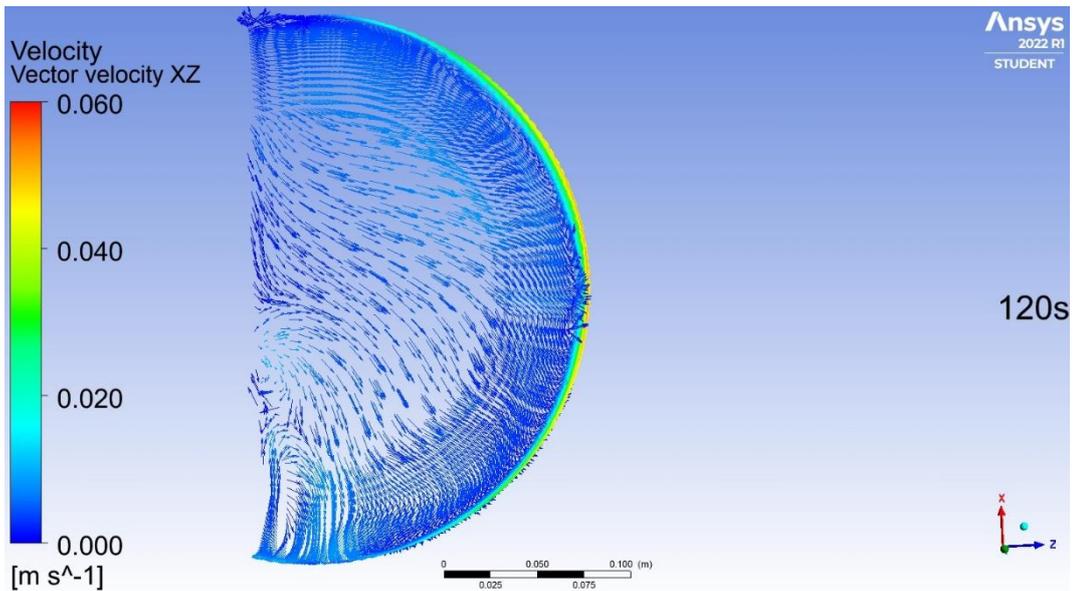


Figura 5.15: Perfil de temperatura da SIMU T13D aos 120 segundos, (a) vista vertical e (b) vista lateral



(a)



(b)

Figura 5.16: Perfil de escoamento e gama de velocidade da SIMU T13D aos 120 segundos, (a) vista vertical e (b) vista lateral.

### 5.2.1.2 Simulação do teste T2SP

O incremento de pressão obtido nas simulações SIMU T2 2D e SIMU T2 3D obtiveram boa aproximação (Figura 5.17) com o incremento de pressão encontrado no teste experimental. As simulações apresentaram erro relativo até 18,6% para a simulação 3D e 15,6% para a simulação 2D. Não houve diferença significativa entre os erros das duas simulações quando se compararam as pressões experimentais e as simuladas durante todo o tempo.

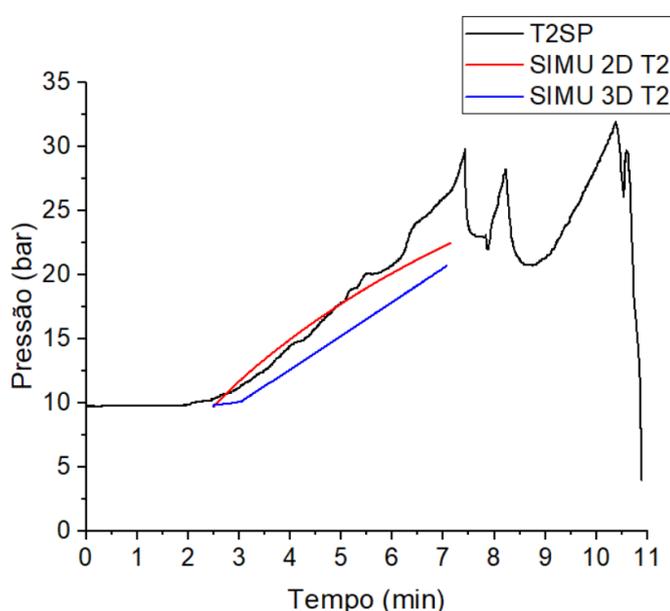


Figura 5.17: Perfil do incremento de pressão do teste T2SP e das simulações 2D e 3D para o teste T2SP.

Considerando a SIMU T2 2D, na Figura 5.17, aos 4,5 minutos (correspondente a 2 minutos simulados), a temperatura média do reservatório é 185°C (Figura 5.18a), sendo a temperatura crítica ( $T_C$ ) do propano igual a 96,74°C (National Institute of Standards and Technology, n.d.). Nesse momento, o erro relativo entre a pressão experimental e a pressão simulada é igual a 7,65% com a respectiva temperatura reduzida ( $T_R$ ) igual a 1,9. Após os 6,5 minutos, correspondente a 4 minutos simulados (Figura 5.17), o erro relativo aumenta, sendo superior a 12% com a respectiva  $T_R$  tendo um valor de aproximadamente 3. Isso mostra que o erro relativo aumenta com o aumento da temperatura reduzida, ou seja, com o distanciamento da temperatura crítica.

Na SIMU T2 3D, de forma similar à SIMU T2 2D, os maiores erros também são encontrados em temperaturas mais elevadas.

Considerando os valores de erro relativo encontrados entre as pressões simulada e a experimental, e considerando o acentuado caráter dinâmico dos testes experimentais, também se verifica que o modelo usado no FLUENT, através da equação de Peng Robinson, tem boa aproximação com os valores experimentais, mesmo com temperaturas simuladas superiores à respectiva temperatura crítica.

Uma forma de indicar, ou mostrar, que existe a superestimativa da temperatura simulada é comparar os valores de pressão e temperatura simulados com a curva para o equilíbrio líquido-vapor (ELV) encontrada através da equação de Wagner. Essa comparação não proporciona uma exatidão de valores, mas uma afirmação de que a superestimativa ocorre. Pois, os valores obtidos pela Equação de Wagner não consideram o grau dinâmico que tem os testes experimentais e o método CFD.

A Figura 5.18a e 5.18b apresentam, respectivamente, as pressões e temperaturas das simulações 2D e 3D do teste T2SP. A Figura 5.18c apresenta o diagrama PxT do propano. O diagrama PxT do propano, encontrado através da aplicação da Equação de Wagner, mostra a curva de pressão que o propano tem no ELV a cada temperatura até as proximidades do ponto crítico. Pode-se verificar nesse diagrama que à pressão de 20 bar a temperatura correspondente é aproximadamente 60°C. Entretanto, para a simulação 2D (Figura 5.18a), no mesmo instante em que a pressão é 20 bar, aos 3,5 minutos, a temperatura é cerca de 273°C. E para a simulação 3D (Figura 5.18b), no instante em que a pressão é 20 bar, a temperatura é 160°C. Comparando-se os três gráficos e tendo como referência a pressão de 20 bar, verifica-se que as temperaturas durante as simulações 2D e 3D estão superestimadas, sendo este comportamento mais acentuado na simulação em 2D.

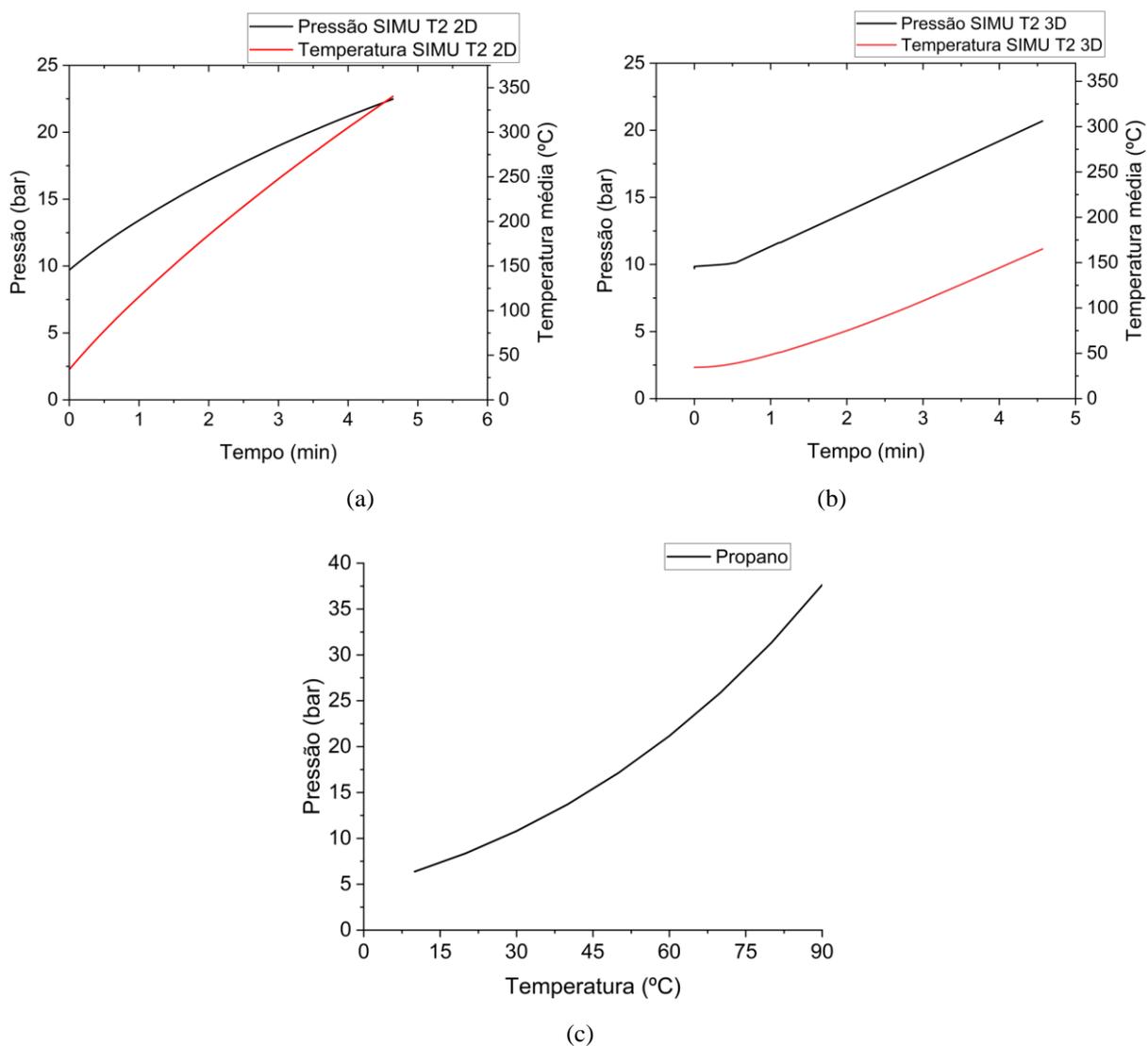


Figura 5.18: (a) Perfil de pressão e temperatura média da simulação SIMU T2 2D; (b) Perfil de pressão e temperatura média da simulação SIMU T2 3D; (c) Diagrama PxT para o propano.

A figura 5.19 apresenta o perfil de temperatura da SIMU T2 2D a diferentes instantes da simulação. As temperaturas mais elevadas estão nas proximidades das paredes do reservatório, local de incidência da radiação térmica, e no topo, zona de maior presença do gás. Comportamento similar foi encontrado na SIMU T2 3D.

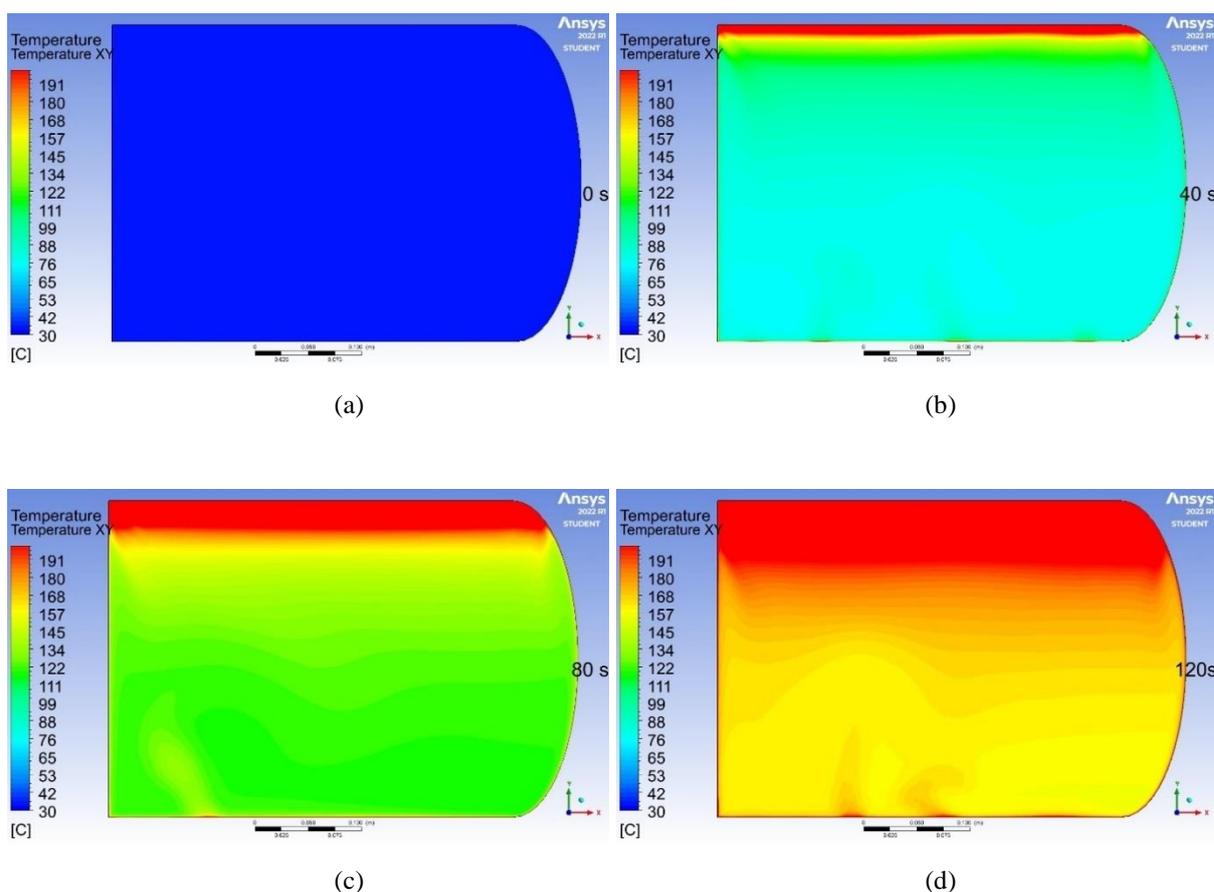


Figura 5.19: Perfil de temperatura da simulação SIMU T2 2D a diferentes tempos de simulação: 0s (a); 40s (b); 80s (c); 120s (d).

A Figura 5.20 refere-se a SIMU T2 2D. Esta figura apresenta a relação de áreas de maior temperatura nas proximidades da parede com a maior velocidade do fluido e o sentido ascendente do escoamento devido à convecção. O escoamento ascendente nas proximidades da parede possui velocidades até  $0,23 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ . Resultados similares foram encontrados por outros autores, inclusive havendo a redução da velocidade quando o grau de enchimento é maior (D'Aulisa et al., 2014b; Scarponi et al., 2019).

Ao centro da garrafa, abaixo da linha média da altura, é possível perceber duas zonas de recirculação (Figura 5.20) causadas pelo movimento descendente da zona média da garrafa, distante das paredes. O escoamento ascendente é acentuado apenas nas proximidades das paredes laterais, onde é encontrada a zona de maior velocidade e temperatura. As velocidades nas simulações com propano são maiores que a velocidade encontrada na SIMU T1 3D. Pois o

butano por ter uma molécula maior e ter maior massa armazenada para um mesmo volume, apresenta menor mobilidade e maior inércia térmica que o propano.

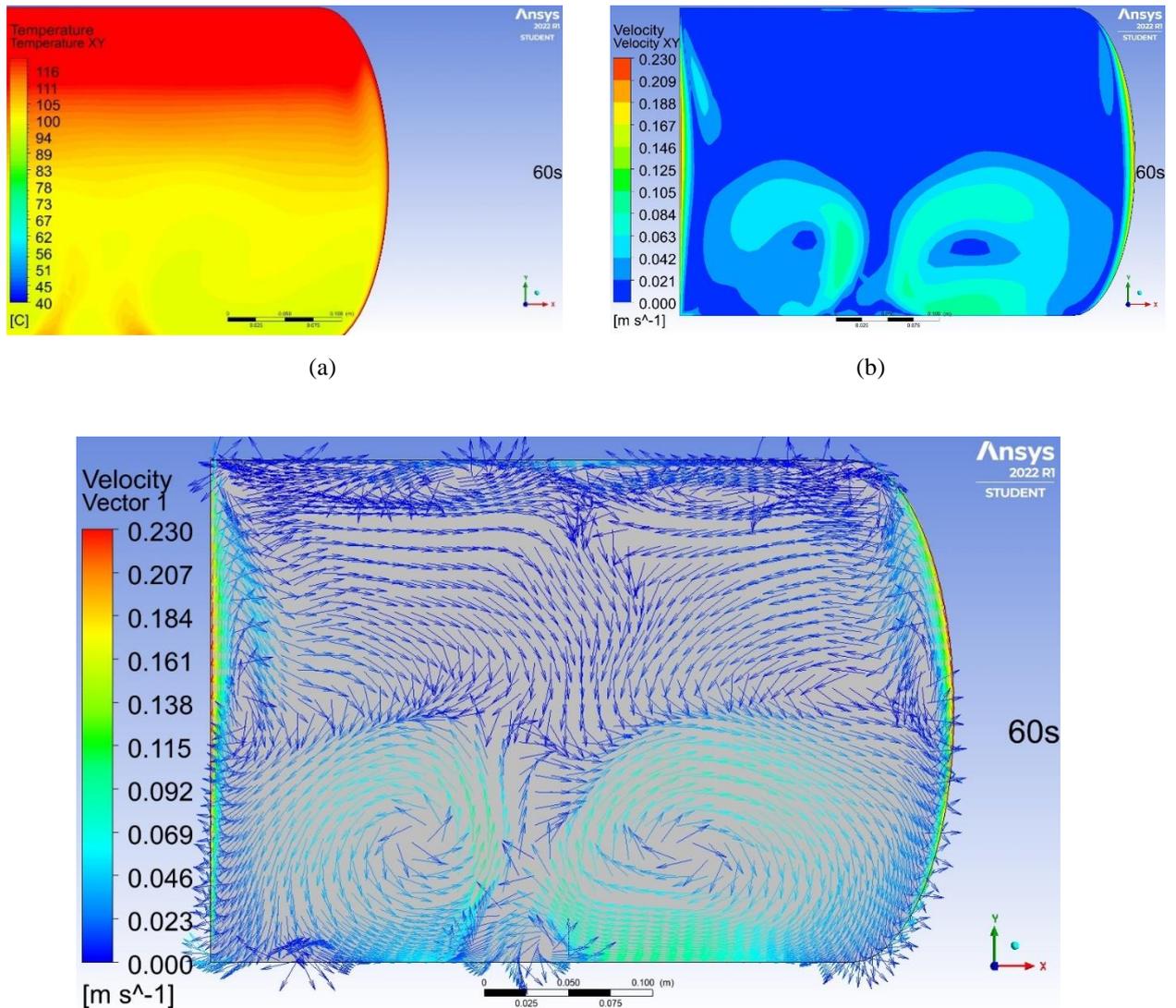


Figura 5.20: Perfis de (a) temperatura; (b) velocidade, (c) vetor velocidade; sendo (a), (b) e (c) para a simulação SIMU T2 2D aos 60 segundos.

A Figura 5.21 refere-se a SIMU T2 3D. Esta figura apresenta a relação de áreas de maior temperatura nas proximidades da parede com a maior velocidade do fluido e o sentido ascendente do escoamento devido à convecção. O escoamento ascendente nas proximidades da parede possui velocidades até  $0,18 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ , ligeiramente inferior à SIMU T2 2D.

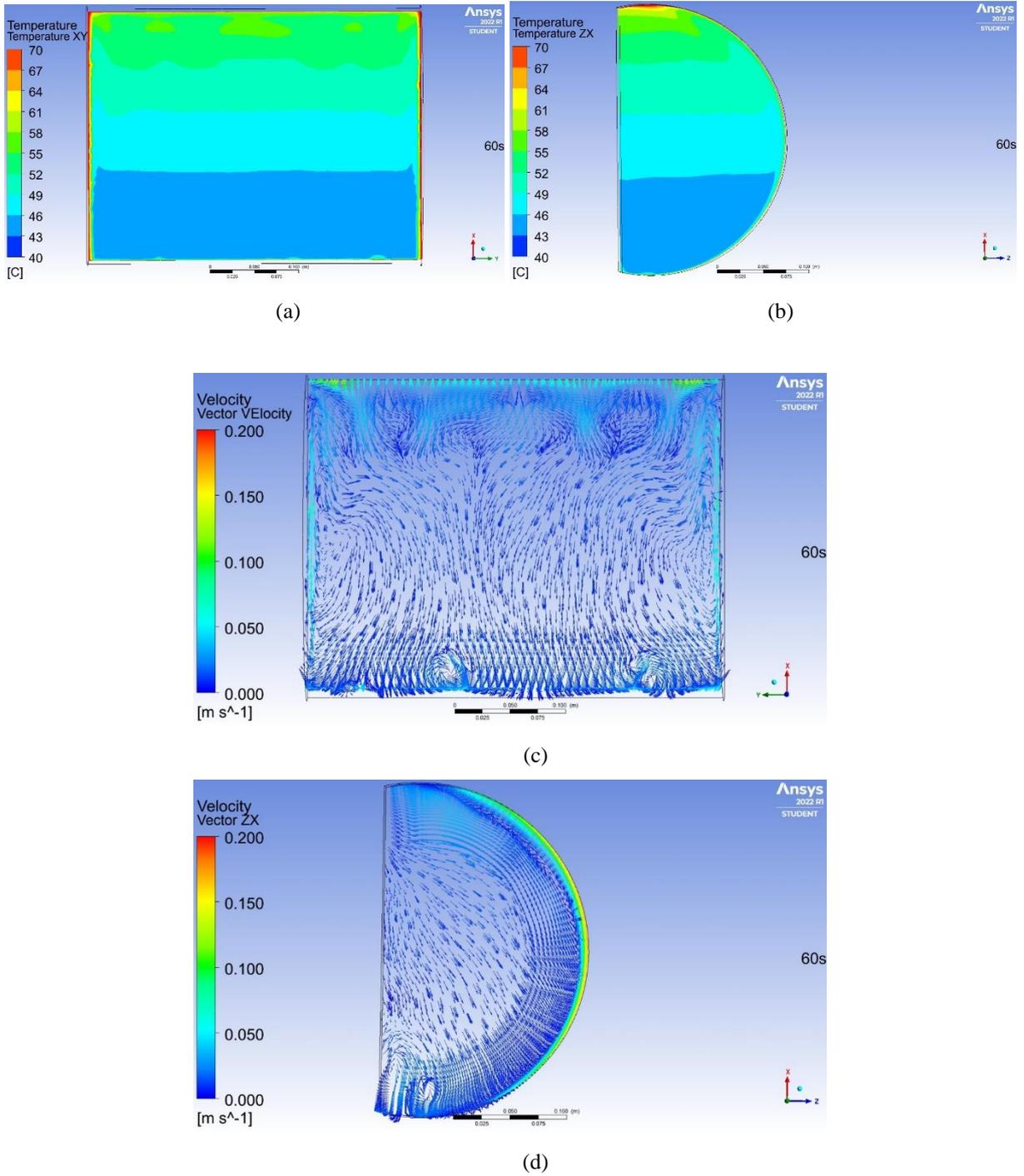


Figura 5.21: Perfis de (a) temperatura vista frontal; (b) temperatura vista lateral, (c) vetor velocidade vista frontal; (d) vetor velocidade vista lateral; todas figuras para a simulação SIMU T2 3D.

### 5.2.1.3 Simulação do teste T3SP

O incremento de pressão obtido na simulação (SIMU T3 2D) apresentou boa aproximação (Figura 5.22) com o incremento de pressão obtido no teste experimental. Após 4 minutos é vista uma divergência entre as curvas de pressão. Na Figura 5.22, o tempo de 4 minutos é o correspondente aos 120 segundos simulados (curva em vermelho), nesse momento a temperatura média do reservatório é 193°C (Figura 5.23). Tal como ocorrido nas simulações anteriores, com o aumento da temperatura reduzida, ou seja, quanto mais distante da temperatura crítica, o erro relativo torna-se maior. Aos 4 minutos (Figura 5.22) a  $T_r$  é igual a 1,65. Até este instante, o erro relativo entre as curvas de pressão (simulada e experimental) esteve entre 0,41% e 12%. Contudo, aos 5 minutos, com  $T_r$  igual a 2,6, o erro relativo é igual a 40%.

Assim como nas simulações do teste T2SP, para a simulação do teste T3SP a temperatura também está superestimada, apresentado cerca de 200°C aos 20 bar (Figura 5.23),

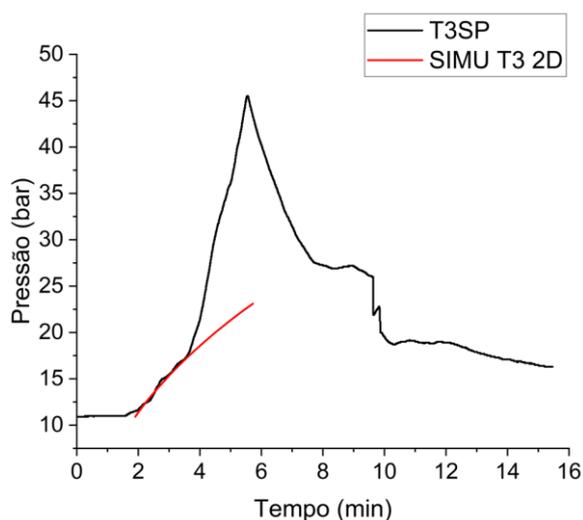


Figura 5.22: Perfil do incremento de pressão para o teste T3SP e simulação T32D.

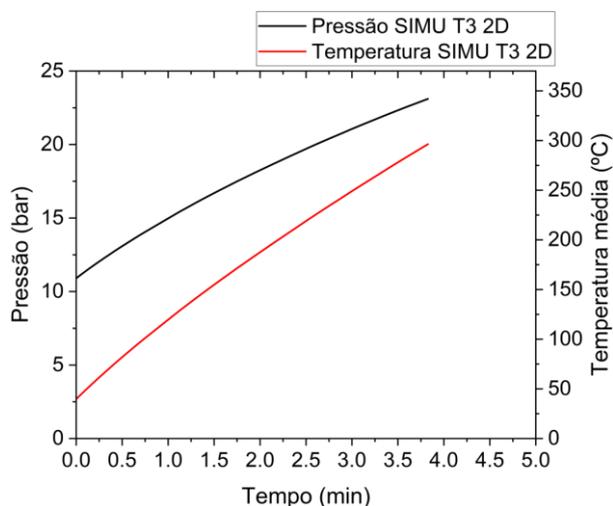


Figura 5.23: Perfis de pressão e temperatura média da simulação SIMU T3 2D.

A Figura 5.24 apresenta a relação da pressão e da temperatura reduzidas com o erro associado às curvas do incremento de pressão simulado e real. Como pode ser visto, a variação da pressão reduzida é mínima quando comparada à variação da temperatura reduzida. Com isso, destaca-se a significativa influência de maiores temperaturas no erro relativo entre a pressão simulada e a real. Essa relação também foi verificada nas demais simulações.

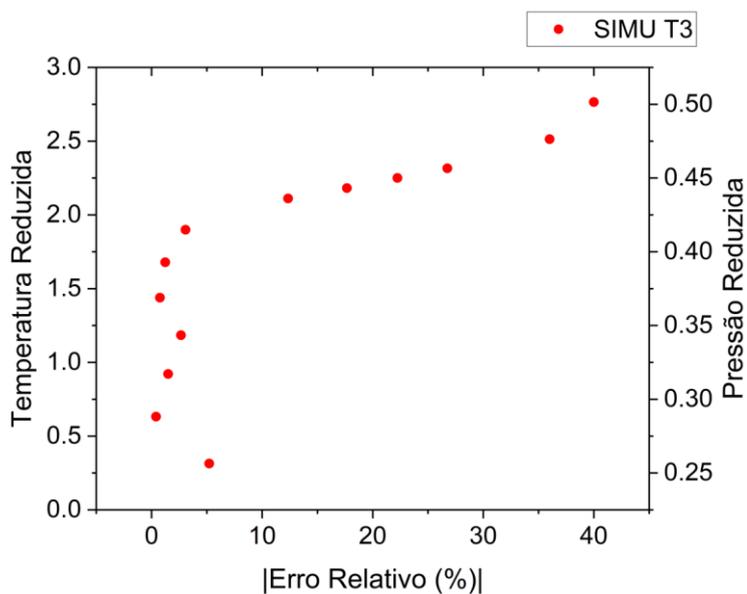


Figura 5.24: Relação de  $P_R$  e  $T_R$  com o erro relativo na simulação SIMU T32D.

Em relação à fluidodinâmica do interior do reservatório, a SIMU T3 2D tem um comportamento similar à SIMU T2 2D.

#### 5.2.1.4 Simulações do incremento de pressão: finalização

Os resultados das simulações feitas nesta tese para o incremento de pressão de um reservatório de GPL sob aquecimento, na posição horizontal, com capacidade até 26 litros, grau de enchimento de 95% e razão comprimento diâmetro (L/D) de 1,33, complementam os resultados encontrados por Scarponi et al. (2019). Neste último, as simulações foram feitas em reservatórios até 5 toneladas, graus de enchimento de até 72%, L/D aproximadamente 3 e com erro relativo até 17,1%. O complemento mencionado ocorre devido a introdução da relação da  $T_R$  com o erro relativo e dos resultados obtidos com o butano, ambos descritos a seguir.

Foi verificado que para cada uma das simulações feitas no âmbito do presente trabalho, os maiores erros são encontrados a partir do terceiro minuto simulado, momento no qual a temperatura simulada já está muito acima da temperatura crítica. Portanto, essa situação está distante da previsão de um modelo que usa a equação de Peng Robinson e não usa dados para o fluido supercrítico.

A sobre-estimativa da temperatura do fluido ocorreu de forma mais acentuada nas simulações 2D (SIMU T3 2D e SIMU T2 2D). Isso pode estar relacionado à imprecisão da absorção de energia pelo fluido (e posterior incremento de temperatura) em apenas duas dimensões, por não considerar a terceira dimensão.

Das simulações feitas nesta tese, verifica-se também que o método para o incremento de pressão possui razoável aproximação com os valores experimentais. Erros até 19% foram encontrados para temperaturas reduzidas até 2, sendo uma temperatura reduzida igual a 2 o dobro da temperatura crítica, que para o propano corresponde a aproximadamente 200°C. À medida que a temperatura reduzida aumenta, há uma tendência ao aumento do erro relativo. Essa relação pode ser vista na Figura 5.25.

As simulações com o butano mostraram ter menor influência do aumento da  $T_R$  no erro relativo. Com isso pode-se afirmar que o método CFD para o incremento de pressão apresenta melhor resultado para alcanos maiores.

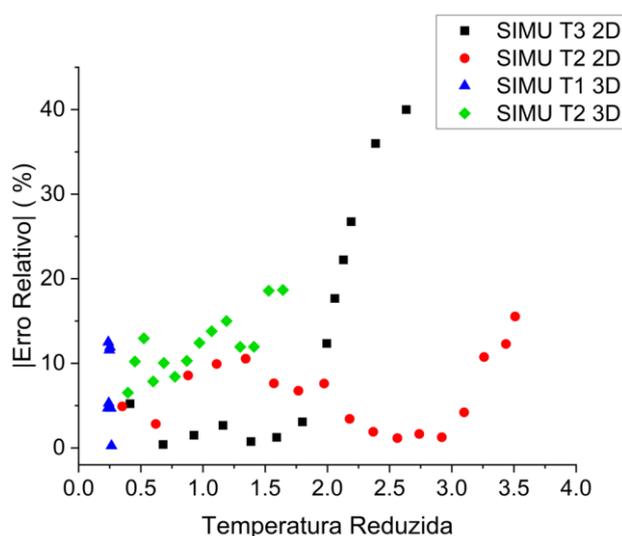


Figura 5.25: Relação de  $T_R$  com o erro relativo de todas as simulações 2D e 3D.

Independente da metodologia a ser usada, 2D ou 3D, o aumento do erro em temperaturas maiores ocorre. E isso é atribuído a:

- Os parâmetros para a equação de Peng Robinson que estão disponíveis na biblioteca do FLUENT não contemplam dados no estado supercrítico para sistemas com duas fases. Por isso, o erro é maior quanto maior é o afastamento do ponto crítico (quanto maior for a  $T_R$ ).

*Os modelos de equações cúbicas de estado podem ser usados para resolver problemas em regimes de gases, líquidos e fluidos supercríticos. Os modelos para a região de duas fases sob o diagrama de fases não estão disponíveis. (ANSYS Inc, 2022b)*

Outros modelos termodinâmicos baseados em termodinâmica estatística como a equação de SAFT (Gross and Sadowski, 2001), que não estão presentes na biblioteca do FLUENT, podem ser usados apresentando resultados com maior precisão na faixa supercrítica. Para trabalhos futuros que tenham o objetivo de

investigar o GPL supercrítico, podem ser usados outros programas que tenham em sua biblioteca modelos termodinâmicos específicos para fluidos supercríticos. Esses modelos não foram usados nesta tese pois não faz parte do seu escopo a imersão no comportamento de fluidos supercríticos;

- O fluido no interior do reservatório não é 100% propano ou butano. A simulação considerando fluido puro é uma aproximação da realidade tendo em vista o grau de pureza do GPL comercializado e por não conter água ou fluidos com alto caráter polar na mistura. Em realidade, as diferentes frações de outros fluidos (os quais não são propano ou butano) que estão misturados no GPL terão comportamento diverso ao comportamento do propano e do butano, tanto na faixa do ELV como no estado supercrítico, podendo, inclusive, frações estarem em estado supercrítico enquanto outras não estão;
- O GPL contém traços de frações mais pesadas do petróleo, condensáveis, o que contribui para o erro;
- Scarponi et al. (2019) verificou que o FLUENT sobre-estima a temperatura para a fase vapor, tanto para simulações 2D como para simulações 3D, comportamento que também foi encontrado nas simulações desta tese.

Outros pontos importantes a serem destacados em relação às simulações são:

- A diferença no tempo de simulação entre as simulações 2D e 3D é uma questão de grande relevância. A diferença no processamento de uma dimensão a mais é significativa e causa grande aumento de tempo de processamento. Caso o tempo necessário para obter o resultado seja inferior ao tempo necessário para o processamento de uma simulação 3D, isso pode tornar essa ferramenta inviável, principalmente em computadores não dedicados para custos computacionais severos. Para as simulações 2D o tempo de processamento foi aproximadamente 36 horas. Para as simulações 3D, o tempo necessário foi aproximadamente 5 semanas. Contudo, em posse de um computador com grande capacidade de processamento, o tempo para o resultado pode ser significativamente reduzido.

## 5.2.2 Simulações jato de fogo

### 5.2.2.1 Simulação do jato de fogo laboratorial

Os resultados dos testes de campo e laboratoriais foram comparados com as simulações a fim de validar a sua aplicabilidade.

No teste laboratorial, o jato de fogo teve um comprimento médio de chama igual a 1,24 metro (Figura 5.26). Entretanto, o comprimento do jato de fogo simulado é igual 1,31 metro (Figura 5.27), existindo um erro relativo de apenas 5,6% na estimativa do comprimento de chama.



Figura 5.26: Fotografia do jato de fogo laboratorial.

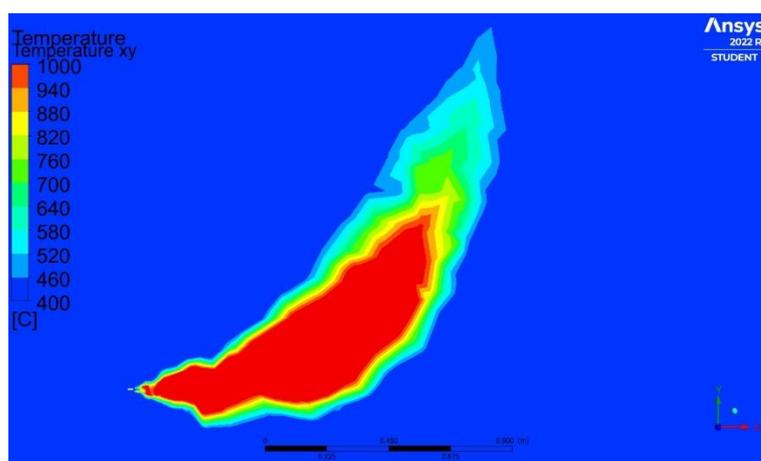


Figura 5.27: Imagem do contorno da chama da simulação do jato de fogo laboratorial.

Em relação à radiação térmica emitida pelo jato de fogo laboratorial, o erro relativo em relação ao método CFD esteve entre 4,5%, a 0,3 metro da chama, e 29%, a 0,8 metro da chama (Figura 5.28). Contudo, o calor incidente medido à distância de 0,8 metro, tem um erro absoluto igual a 0,55, correspondente ao pequeno valor de  $0,55 \text{ kW}\cdot\text{m}^{-2}$ .

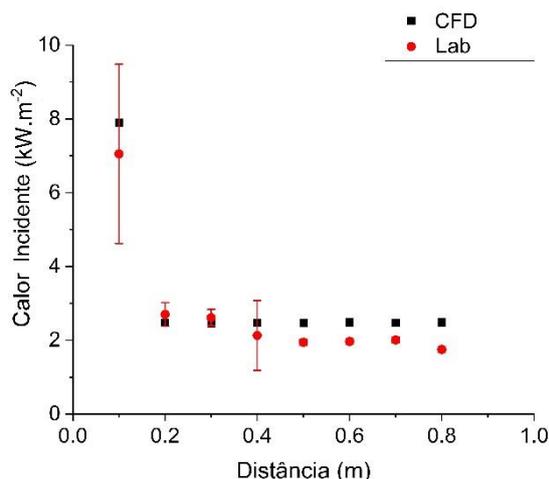


Figura 5.28: Perfil de calor incidente do jato de fogo laboratorial (Lab) e simulado (CFD).

Com os resultados obtidos da avaliação entre o teste laboratorial e o método CFD, tendo as estimativas um baixo erro relativo, verifica-se que esse método pode ser aplicado ao jato de fogo do teste de campo para estimar a radiação térmica emitida e o comprimento máximo de um jato de fogo de uma garrafa de GPL sob aquecimento.

### 5.2.2.2 Resultados da simulação do jato de fogo dos testes de campo

A simulação para o jato de fogo do teste T1CB (SIMUJET T1) mostrou boa aproximação em relação ao comprimento de chama, estando o valor real máximo igual a 8,3 metros, e o simulado com 8 metros (Figura 5.29), apresentando erro relativo de 3,75%.

A simulação do jato de fogo do teste T2SP (SIMUJET T2) comparativamente à simulação SIMUJET T1 mostrou maior erro. O jato de fogo ocorrido em T2SP apresentou comprimento máximo similar ao visto no teste T1CB. Contudo, na simulação SIMUJET T2 (Figura 5.30), o comprimento encontrado foi igual a 10,8 metros, portanto com erro relativo de 30%.

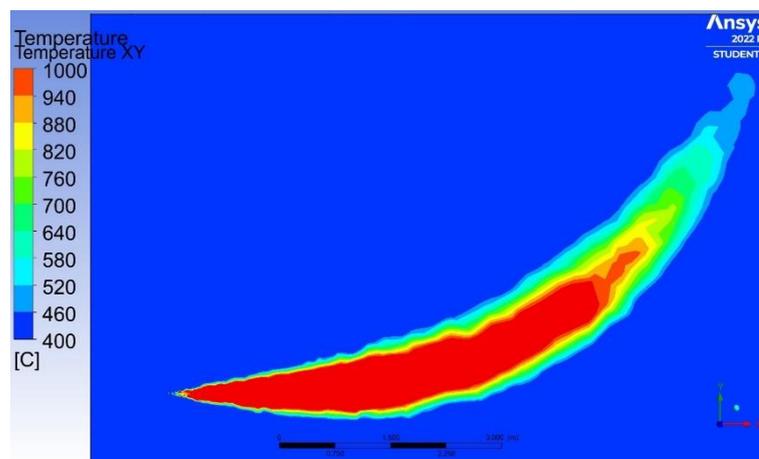


Figura 5.29: Imagem do contorno da chama da simulação do jato de fogo do teste T1CB (SIMUJET T1).

A significativa diferença do erro relativo quando se comparam as duas simulações é atribuído à direção do jato de fogo. No teste T1CB a direção era horizontal, entretanto no teste T2SP, vertical. Os efeitos convectivos e a temperatura da chama no FLUENT são superestimados, causando o alongamento da pluma na direção vertical em ambas as simulações.

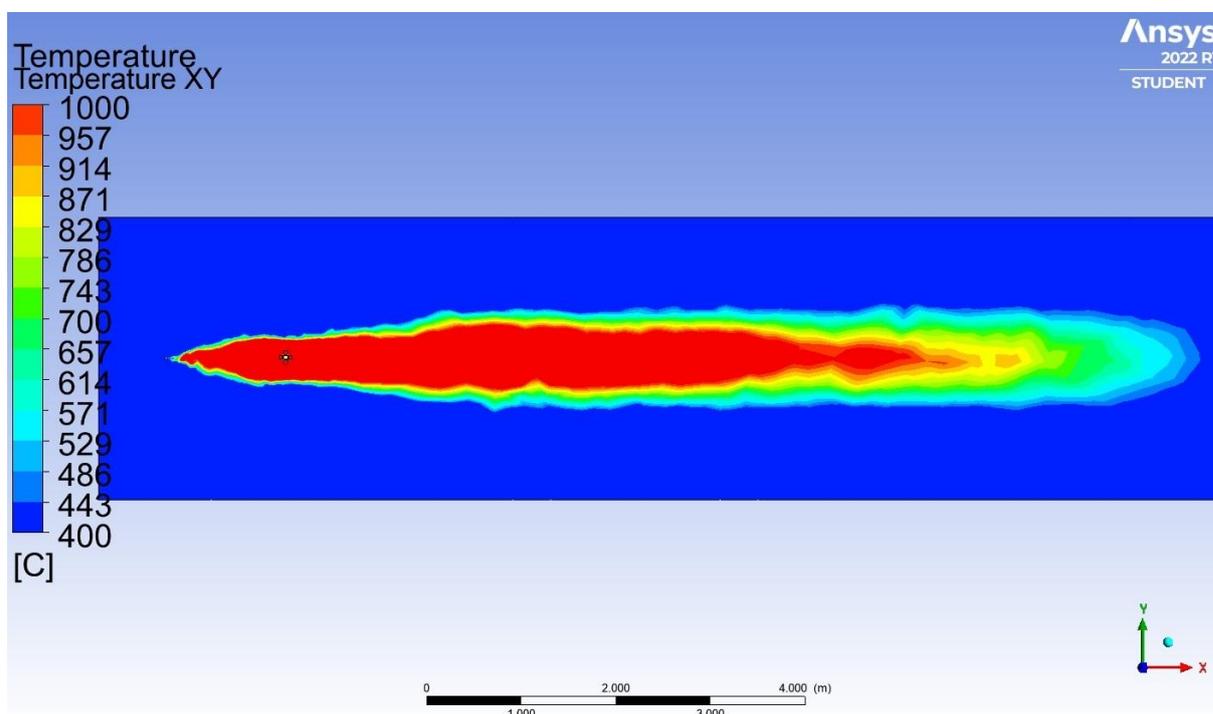


Figura 5.30: Imagem do contorno da chama da simulação do jato de fogo do teste T2SP (SIMUJET T2), com a gravidade no sentido oposto ao escoamento (-x).

A estimativa do fluxo térmico do jato de fogo dos testes T1CB e T2SP podem ser vistos na Figura 5.31. Nota-se que em distâncias inferiores a 50 centímetros a intensidade do fluxo de calor é alta, até  $100 \text{ kW.m}^{-2}$ .

Na SIMUJET T1, até a distância de 0,3 metro, os radiômetros estão imersos nas chamas, devido ao diâmetro do jato de fogo. E, para a SIMUJET T2, até 0,2 metro, os radiômetros também estão envoltos pelas chamas. Por isso, a essas distâncias, o fluxo de calor apresenta valores de 24 a  $100 \text{ kW.m}^{-2}$ .

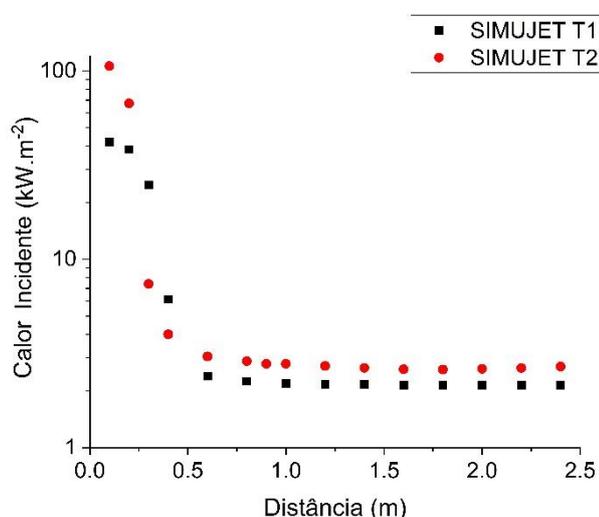


Figura 5.31: Perfil do calor incidente em relação à distância para as simulações SIMUJET T1 e T2.

Considerando a estimativa da intensidade de radiação térmica emitida por um jato de fogo e o tempo de duração verificado nos testes T1CB e T2SP, a dose recebida por um alvo é alta, podendo levar a ignições de diversos tipos de materiais que estejam na vizinhança da garrafa de GPL, conforme descrito no item 5.2.3 dessa tese.

### 5.3 A proteção da garrafa

#### 5.3.1 Testes laboratoriais

Para os testes laboratoriais (Figura 5.32), avaliando o fluxo térmico em PD1 e PD2, e o fluxo na superfície da garrafa, comparativamente, houve grande diferença. O fluxo de calor incidido

na superfície da proteção teve valores até  $12 \text{ kW.m}^{-2}$ , enquanto a superfície da garrafa manteve-se, durante todos os testes laboratoriais com proteção, com fluxo de calor médio recebido próximo a  $1 \text{ kW.m}^{-2}$  e inferior a  $1,5 \text{ kW.m}^{-2}$  (Figura 5.33), valores próximos ao fluxo de calor sem chamas. Isso corresponde a até 87% de redução do fluxo de calor que incidiria na garrafa se ela estivesse sem a proteção. Essa diferença mostra que a proteção possui um alto percentual de redução da incidência de calor e isso é decisivo para a segurança, pois, se o fluxo térmico tem baixa intensidade, não há incremento de pressão, nem jet fite, tampouco o BLEVE.



Figura 5.32: Fotografias do teste laboratorial com a proteção composta pela manta ignífuga; (a) CAM UV; (b) CAM IR.

Para os testes com os dispositivos de proteção a 0,25 metro do cesto, a diferença de valores para o fluxo térmico entre as superfícies da garrafa e da proteção é até  $11 \text{ kW.m}^{-2}$ , o que mostra que o sistema de proteção funciona inclusive para pequenas distâncias das chamas. Quanto maior a distância das chamas, menor é a diferença de fluxo térmico entre as superfícies da proteção e da garrafa. Nas Figuras 5.33 e 5.34, abaixo, pode ser visto o perfil do fluxo térmico nas superfícies avaliadas nas quatro distâncias para PD1 e PD2, respetivamente.

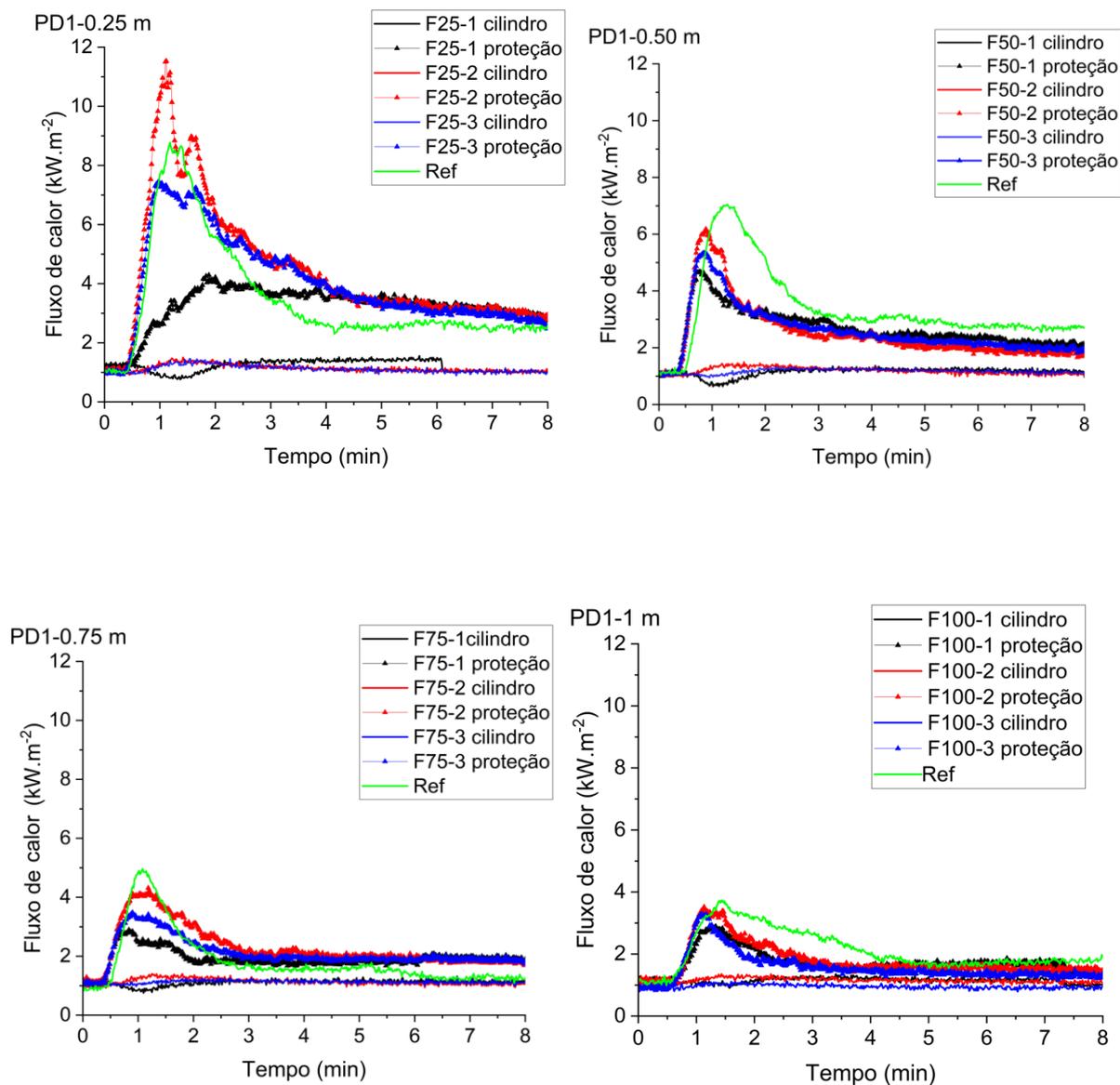


Figura 5.33: Fluxo de calor incidente em PD1 e na garrafa para os testes laboratoriais nas quatro diferentes distâncias (0,25, 0,50, 0,75 e 1m).

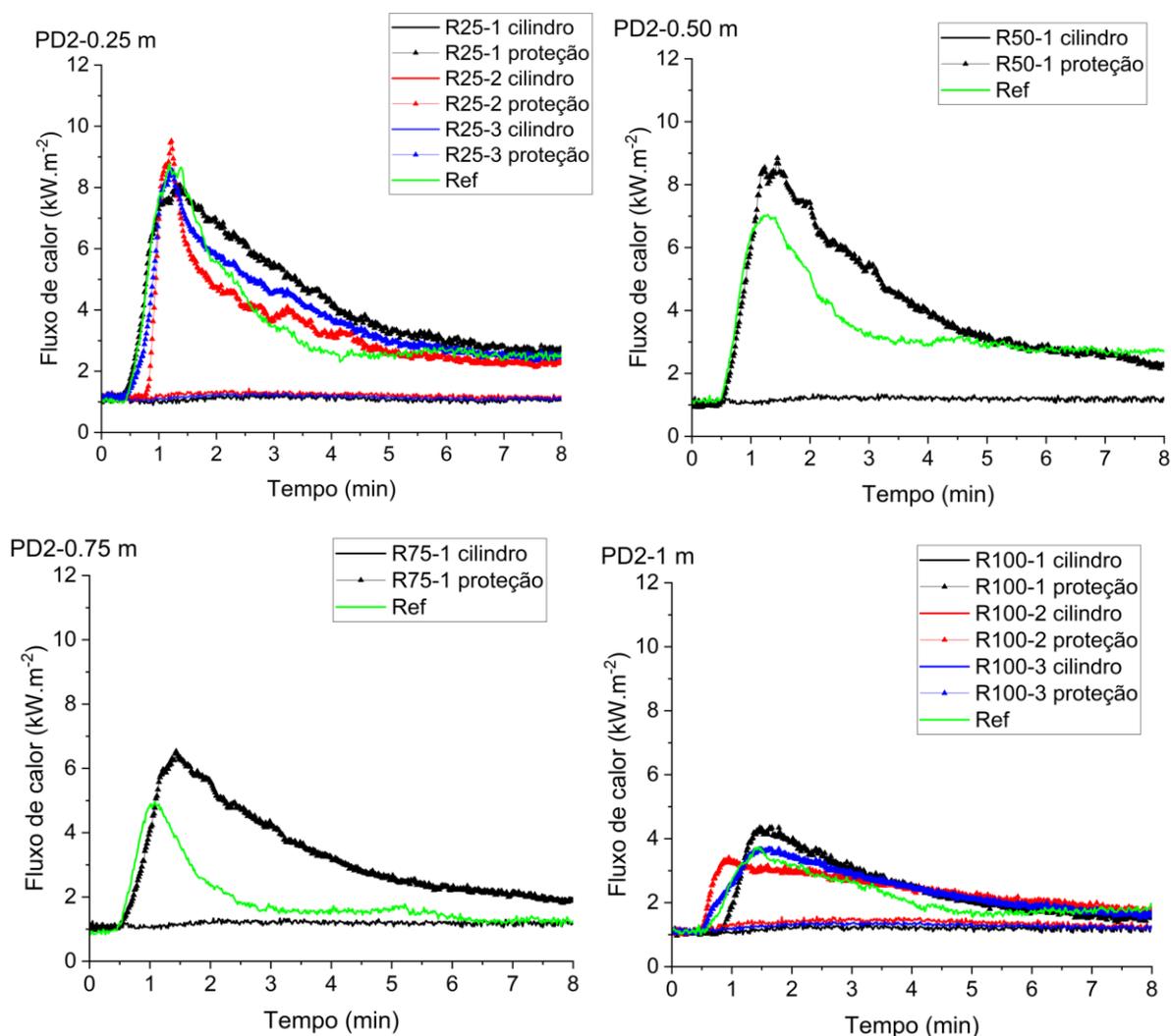


Figura 5.34: Fluxo de calor incidente em PD2 e na garrafa para os testes laboratoriais nas quatro diferentes distâncias (0,25, 0,50, 0,75 e 1m).

A temperatura da chama foi superior a  $550\text{ }^{\circ}\text{C}$ , enquanto as temperaturas das superfícies de PD1 e PD2 mantiveram-se inferiores a  $120\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Relativamente às temperaturas das superfícies das proteções e da garrafa, foi verificado que há grande diferença, até  $80\text{ }^{\circ}\text{C}$  (Figuras 5.35 e 5.36).

A Figura 5.35 mostra a temperatura da garrafa e a temperatura da proteção às quatro distâncias e suas respetivas repetições. Pode ser visto que a temperatura da garrafa esteve em valores seguros durante todo o período de exposição às chamas, próximos aos valores da

temperatura do laboratório. A garrafa de GPL não foi significativamente aquecida, portanto os dispositivos de proteção puderam minimizar os efeitos do fogo de modo a manter a condição segura. De acordo com o teste de referência, sem PD1 e PD2, a superfície da garrafa alcançaria temperaturas superiores a 100 °C, o que representaria elevado risco de BLEVE e de jato de fogo.

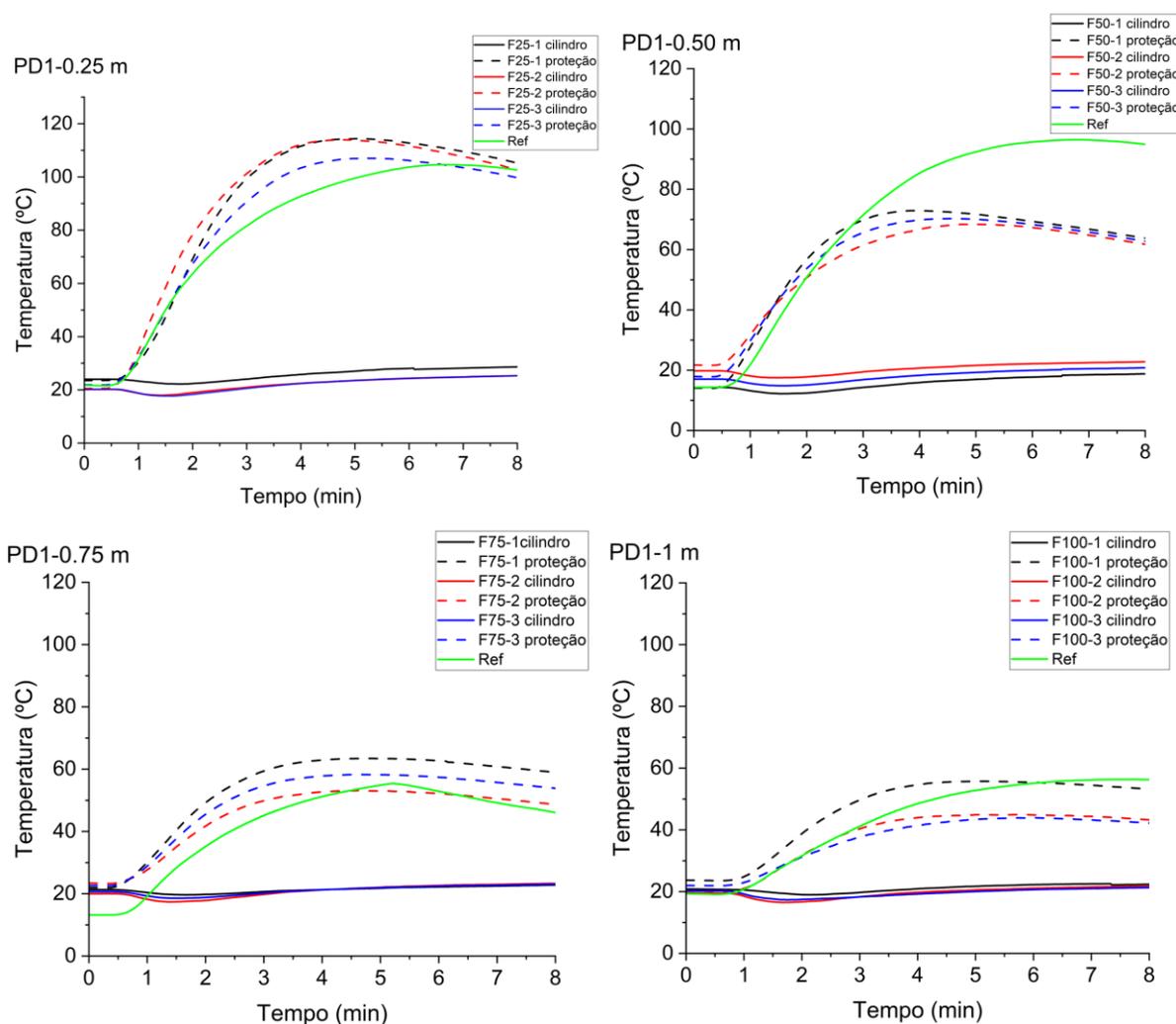


Figura 5.35: Temperatura nas superfícies de PD1 e da garrafa para os testes laboratoriais nas quatro diferentes distâncias (0,25, 0,50, 0,75 e 1m).

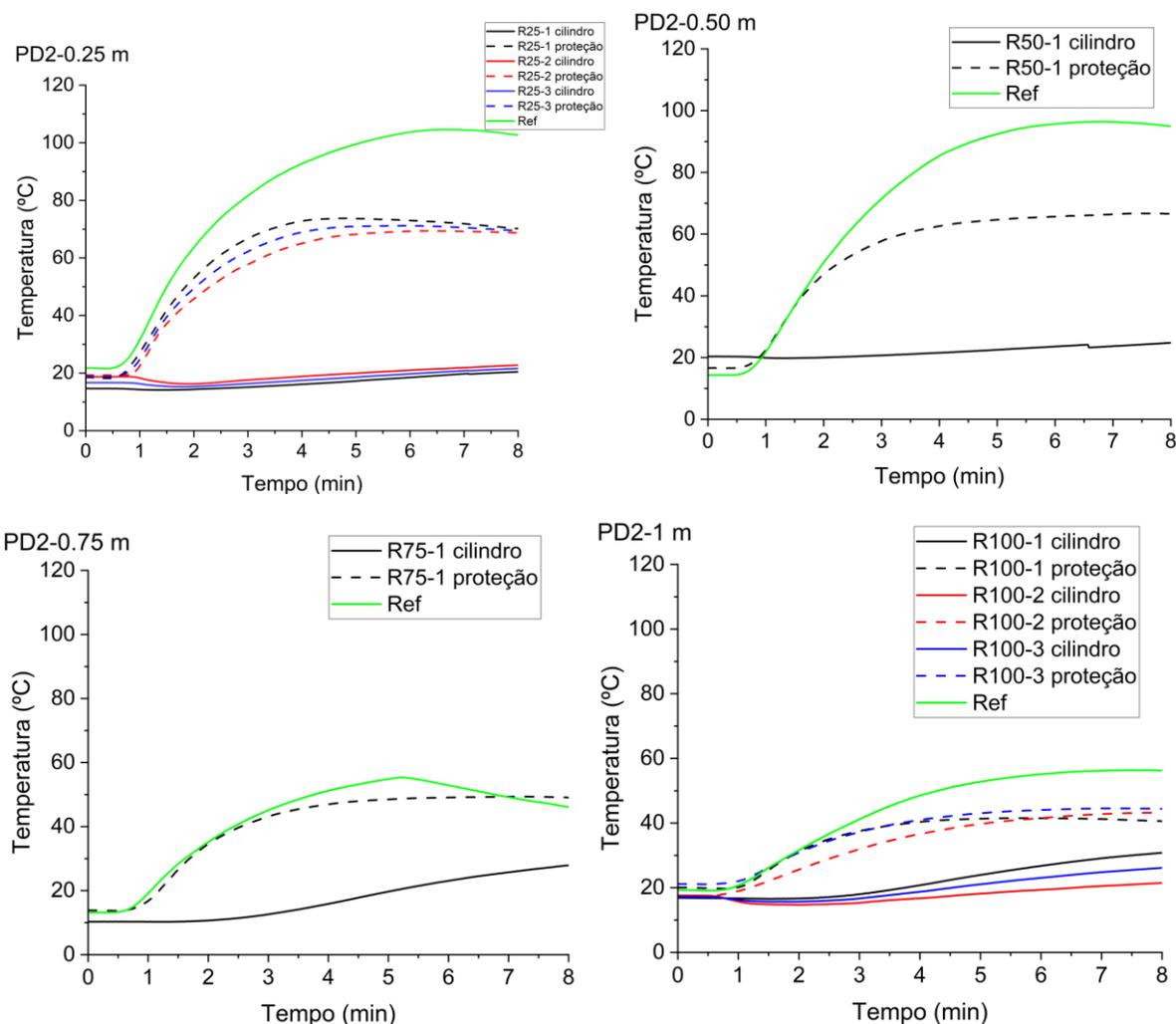


Figura 5.36: Temperatura nas superfícies de PD2 e da garrafa para os testes laboratoriais nas quatro diferentes distâncias (0,25, 0,50, 0,75 e 1m).

Comparando PD1 e PD2, pode-se dizer que, em termos do fluxo de calor e temperatura, os valores encontrados na superfície da garrafa são similares. Porém, há grande diferença na ergonomia e mobilidade dos dispositivos de proteção. PD1, composto pela manta, tem massa igual a 6,3 kg, entretanto PD2 possui 18,5 kg. São 12,2 kg de diferença entre PD1 e PD2, tendo PD2 aproximadamente o triplo da massa de PD1. Isso causa significativa dificuldade de mobilidade. Portanto, PD1 torna-se uma melhor solução.

### 5.3.2 Teste de campo

No teste de campo feito com PD1, o perfil de temperatura da garrafa e da proteção foram similares aos testes laboratoriais. Houve grande diferença entre as temperaturas das superfícies da garrafa e da manta (Figura 5.37). A mesma similaridade é vista com fluxo térmico que alcançou ambas superfícies. Na superfície da manta, o pico de fluxo térmico foi  $7 \text{ kW}\cdot\text{m}^{-2}$  e o pico de temperatura foi  $174 \text{ }^\circ\text{C}$ . Na garrafa o pico de fluxo térmico foi  $2,5 \text{ kW}\cdot\text{m}^{-2}$  e de temperatura  $51^\circ\text{C}$ . Esses resultados mostram que PD1 possui alta fiabilidade na minimização dos riscos.

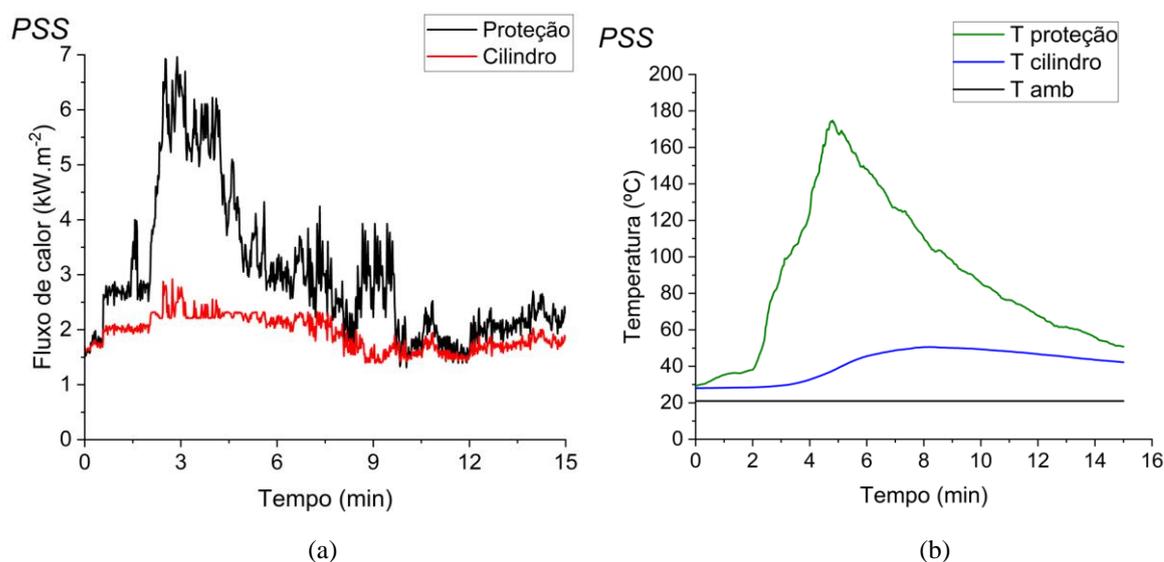


Figura 5.37: (a) Fluxo de calor incidente nas superfícies de PD1 e da garrafa; (b) Temperaturas nas superfícies de PD1 e da garrafa; ambas para o teste de campo.

Os resultados laboratoriais e de campo mostraram que os reservatórios de GPL podem ser previamente protegidos, mantidos em segurança durante um incêndio, ainda que a distância das chamas seja curta.

### 5.3.3 A temperatura da superfície da garrafa e a respetiva pressão

A pressão interna pode ser estimada (Tabela 5.6) considerando que o fluido está à mesma temperatura da superfície. A equação de Wagner, já apresentada (Eq. 40), foi usada considerando o propano como fluido presente na garrafa, uma vez que o propano apresenta maior pressão de vapor que o butano.

Tabela 5.6: Temperatura máxima na superfície e a respetiva estimativa de pressão na garrafa.

Teste	Temperatura ambiente (°C)	Máx. temperatura na manta (°C)	Max temperatura na garrafa (°C)	Diferença de temperatura (°C)	Estimativa da pressão (bar)
F25-1	21	110	30	80	10,8
F50-1	10	73	18	55	7,93
F75-1	20	63	22	41	8,81
F100-1	19	56	23	33	9,04
PSS	21	174	51	123	17,5

A pressão estimada através da maior temperatura registada na superfície da garrafa (51 °C) gera uma pressão igual a 17,5 bar. Esse valor é inferior ao necessário para abrir uma PRD, 21 bar para PRD de garrafas compósitas e 26 bar para PRD das metálicas.

### 5.4 Recomendações para o armazenamento de GPL na IUF.

É comum ocorrerem focos secundários nas proximidades das casas, causados por fragmentos incandescentes carregados pelo vento. Os focos podem ocorrer em móveis, telhados, jardins, próximos às janelas e outras superfícies que possam acumular as partículas incandescentes. Isso pode causar o aquecimento de garrafas levando a ocorrência de BLEVE, principalmente na ausência de PRD, ou jato de fogo.

Por isso, o local onde a garrafa é colocada deve ser cuidadosamente escolhido, distante de qualquer tipo de combustível como: vegetação, inclusive ornamental; madeira; e mobília. Os efeitos causados pelo aquecimento do GPL podem tornar o cenário de um incêndio pior.

Devido ao longo comprimento do jato de fogo que pode alcançar 8,3 metros, o reservatório pode iniciar um incêndio na habitação.

É relevante a alteração da forma da garrafa. Se a garrafa estiver deformada, é um importante sinal de insegurança, pois a deformação ocorre quando há alta temperatura e pressão, causando a fragilidade do material. No teste T3SP, a rotura ocorreu com apenas 18% da pressão dos TH e na ausência de chamas.

A ocorrência de um fogo rápido (*flash fire*) também é possível. Foi visto nos testes que em momentos de chamas pequenas o GPL escoou sem ignição. Isso pode ocorrer devido ao espalhamento do gás liberado sem ignição imediata.

Em relação ao teste T1CB com garrafa compósita contendo butano (que é um fluido com menor pressão de vapor que o propano) a sua superfície alcançou temperaturas maiores, 200°C acima das garrafas metálicas com propano. Temperaturas mais elevadas geram efeitos diretos na pressão do reservatório. O pico de pressão no teste T1CB foi igual a 46,4 bar, aos 4,5 minutos do teste. Entretanto, no teste T2SP, com garrafa metálica e propano, a pressão máxima foi 31,9 bar, alcançando esse valor após 7 minutos de teste. Além disso, o tempo de abertura da PRD no teste T1CB foi mais longo que no teste T2SP. Portanto, mesmo com um fluido que gera menor pressão, a garrafa compósita teve maior pressão e maior tempo de abertura da PRD, sendo considerado mais sensível às chamas, com uma taxa de incremento de pressão superior à taxa de uma garrafa metálica.

Em Portugal, até a conclusão deste trabalho, as garrafas metálicas ainda podem ser vendidas sem PRD. Essas garrafas sem PRD, estando dentro ou fora de casa, não são recomendadas para uso. Para áreas de IUF, recomenda-se que sejam apenas usadas garrafas metálicas, com butano e sempre com PRD.

Com a ausência de PRD, utentes, bombeiros, vizinhos e estruturas podem tornar-se alvo dos fragmentos que são lançados a longas distâncias. Para cada garrafa de GPL, a distância de segurança em caso de explosão é de 300 metros. O maior risco no lançamento de fragmentos oriundos da explosão é referente aos fragmentos primários. Esses fragmentos alcançam maiores distâncias e maiores velocidades. O teste T3SP também mostrou que os fragmentos apresentam dispersão aleatória.

Por fim, através das informações encontradas nos testes e nos 14 acidentes e incidentes descritos nessa tese, encontramos práticas inseguras que se repetem e que deveriam ser evitadas.

Então, acidentes podem ser evitados através de boas práticas como:

- As garrafas serem colocadas distantes de combustíveis, quer sejam florestais ou artificiais;
- Armazenar apenas 1 garrafa, inclusive não estocando garrafas consideradas vazias, pois ainda há uma pequena quantidade de GPL;
- Limpar os combustíveis da vizinhança da habitação;
- Usar garrafas contendo butano ao invés de propano;
- Usar garrafa que tenha PRD;
- Usar a proteção testada nessa tese;
- Fazer a troca da mangueira que conduz o gás da garrafa ao fogão com fiel cumprimento do prazo de validade descrito na embalagem.

## 6 CONCLUSÃO

Essa tese apresentou uma avaliação das configurações de garrafas de GPL mais comercializadas em Portugal - compósito, metal, com e sem PRD, com butano ou propano - e a sua relação com a segurança e seus efeitos para os utilizadores. Para isso, foram feitos testes de campo com as citadas configurações, inclusive até a explosão da garrafa. Também foram usadas simulações computacionais (CFD) para a previsão dos efeitos do jato de fogo e do perfil de incremento de pressão. Além disso, dois dispositivos de proteção para as garrafas de GPL foram testados.

O revestimento polimérico da garrafa compósita, por ser combustível, aumenta a temperatura e pressão no interior da garrafa contribuindo para aumentar o tempo de duração do jato de fogo. As garrafas de aço atingem temperaturas de superfície consideravelmente mais baixas do que as que apresentam o revestimento polimérico.

Os resultados mostraram que pode ser mais seguro armazenar o propano nas garrafas metálicas. Pois, considerando que uma garrafa compósita sob própria combustão contendo propano terá uma taxa de incremento de pressão superior a essa mesma garrafa contendo butano. Independente do tipo de reservatório e do fluido armazenado, deve-se sempre haver a PRD. Para uso doméstico e usos em zonas de IUF recomenda-se apenas o uso de garrafas com PRD e contendo butano.

A PRD apresentou seguro funcionamento sendo capaz de evitar a explosão das garrafas testadas. A ausência de mecanismo de alívio levou a garrafa ao BLEVE. A garrafa sem PRD não suportou o estresse térmico combinado com a elevada pressão. Um BLEVE ocorreu lançando fragmentos a longas distâncias, até 113 metros, além de uma bola de fogo com 14,5 metros de altura e 11,5 de diâmetro, com uma radiação térmica estimada em até 120 kW.m<sup>-2</sup>. Considerando resultados de outros autores, 300 metros é a distância segura tendo em vista o alcance máximo encontrado nos testes desses autores.

A intensidade radiativa do BLEVE é suficiente para impacto sobre as pessoas. Dessa forma, a distância mínima para evitar queimaduras é de 15 metros. O BLEVE pode ocorrer a pressões muito mais baixas que a pressão de rotura hidráulica. A garrafa metálica têm a resistência

consideravelmente reduzida devido ao estresse causado pelas elevadas temperaturas e aumento da pressão interna. Foi visto que o BLEVE ocorreu sem a presença de chamas e a uma pressão de apenas 18% da média encontrada para as pressões de rotura dos testes hidrostáticos.

Jatos de fogo causados pela abertura da PRD podem iniciar outros focos de incêndio na vizinhança das habitações, a depender da direção em que esteja orientada a PRD, devido ao longo comprimento, radiação e tempo de duração.

Uma proteção com dois materiais diferentes foi testada. Ambos materiais mostraram-se em condições de conter o aquecimento das garrafas de GPL quando há um incêndio na vizinhança. Destaque-se a manta como o material mais adequado devido às melhores condições ergonómicas e facilidade para a montagem. Esse dispositivo de proteção poderia ter evitado diversos acidentes citados nessa tese. Essa proteção apresentou um bloqueio até  $11 \text{ kW.m}^{-2}$ , o que representa redução até 87% do calor incidente na superfície da garrafa.

Os modelos em CFD para o jato de fogo e incrementos de pressão devido ao aquecimento da garrafa apresentaram significante aproximação com os resultados dos testes experimentais, podendo ser usados como ferramentas para avaliação de cenários diversos. Há limitações a ambos métodos CFD. Para o incremento de pressão há razoável fiabilidade até temperaturas reduzidas iguais a 2. Para o jato de fogo, o comprimento é sobrestimado em simulações de jatos de fogo na posição vertical.

## **7 SUGESTÃO DE TRABALHOS FUTUROS**

Devido à flutuação da chama do combustível florestal o uso do queimador a gás para aquecimento das garrafas é proposto. Isso reduz a variação da carga térmica na superfície da garrafa, o que pode aproximar os resultados simulados do experimental. Como medida de segurança adicional, o caudal do gás através do queimador deve ser regulado para que a carga térmica não seja suficientemente grande ao ponto de levar a garrafa a rotura, o que também causaria a rotura da estrutura do queimador.

Inserir na simulação: a abertura da válvula de alívio de pressão, com o respetivo escape de gás e a redução da pressão; usar uma função de usuário (UDF) com o adequado perfil de carga térmica na garrafa, o que aproximaria os resultados simulados dos experimentais.

Melhorar o aspeto do dispositivo de proteção, pois o que existe atualmente é um protótipo laboratorial.

---

## REFERÊNCIAS

- Abbasi, T., Abbasi, S.A., 2007. The boiling liquid expanding vapour explosion (BLEVE): Mechanism, consequence assessment, management. *J. Hazard. Mater.* 141, 489–519. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2006.09.056>
- Almeida, M.A. de F.B. de, 2015. Relatório resumo do Incêndio da Quinta do Colaço (Almalaguês).
- ANSYS Inc, 2022a. *Ansys Fluent Theory Guide*, Release 20. ed. Canonsburg.
- ANSYS Inc, 2022b. *ANSYS FLUENT User 's Guide*, Release 20. ed. Canonsburg.
- Barbosa, T.F., Reis, L., Raposo, J., Viegas, D.X., 2022. A Protection for LPG Domestic Cylinders at Wildland-Urban Interface Fire. *Fire* 5, 63. <https://doi.org/10.3390/fire5030063>
- Bartholomew, D., 2016. Old Fire in Calabasas burns more than 500 acres, threatens thousands of homes. *Los Angeles Dly. News*. Disponível em: <https://www.dailynews.com/2016/06/04/old-fire-in-calabasas-burns-more-than-500-acres-threatens-thousands-of-homes/> (acessado em 13.05.2022).
- Batista, R.M., 2019. Mechanisms for Active Protection of People and Infrastructures against Forest Fires. *Mech. Act. Prot. People Infrastructures against For. Fires*.
- Baum, M.R., 1999. Failure of a horizontal pressure vessel containing a high temperature liquid: The velocity of end-cap and rocket missiles. *J. Loss Prev. Process Ind.* 12, 137–145. [https://doi.org/10.1016/S0950-4230\(98\)00051-5](https://doi.org/10.1016/S0950-4230(98)00051-5)
- Bradley, D., Gaskell, P.H., Gu, X., Palacios, A., 2016. Jet flame heights, lift-off distances, and mean flame surface density for extensive ranges of fuels and flow rates. *Combust. Flame* 164, 400–409. <https://doi.org/10.1016/j.combustflame.2015.09.009>
- Buettner, K., 1951. Effects of extreme heat and cold on human skin. II. Surface temperature, pain and heat conductivity in experiments with radiant heat. *J. Appl. Physiol.* 3, 703–713. <https://doi.org/10.1152/jappl.1951.3.12.703>
- C.J.H. van den Bosch, R.A.P.M.W., 2005. *Yellow Book. Methods for the calculation of Physical Effects*, Third. ed, TNO - The Netherlands Organization of Applied Scientific

- Research.
- C.M. Pietersen, 1990. Consequences of accidental releases of hazardous material. *J. Loss Prev. Process Ind.* 3, 136–141. [https://doi.org/10.1016/0950-4230\(90\)90000-C](https://doi.org/10.1016/0950-4230(90)90000-C)
- Caballero, D., Sjöström, J., Pastor, E., 2019. Deliverable D5.1: Inventory of pattern scenarios. Wuiview 1–70.
- Canico, T.J.M., 2018. Proteção de Infraestruturas com sprinkler e recirculação de água. Universidade de Coimbra.
- Casal, J., 2008. Evaluation of the Effects and Consequences of Major Accidents in Industrial Plants, First. ed. Elsevier B.V.
- Casal, J., Salla, J.M., 2006. Using liquid superheating energy for a quick estimation of overpressure in BLEVEs and similar explosions. *J. Hazard. Mater.* 137, 1321–1327. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2006.05.001>
- Cirrone, D.M.C., Makarov, D., Molkov, V., 2019a. Thermal radiation from cryogenic hydrogen jet fires. *Int. J. Hydrogen Energy* 44, 8874–8885. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2018.08.107>
- Cirrone, D.M.C., Makarov, D., Molkov, V., 2019b. Simulation of thermal hazards from hydrogen under-expanded jet fire. *Int. J. Hydrogen Energy* 44, 8886–8892. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2018.08.106>
- Clarke, H., Cirulis, B., Penman, T., Price, O., Boer, M.M., Bradstock, R., 2022. The 2019–2020 Australian forest fires are a harbinger of decreased prescribed burning effectiveness under rising extreme conditions. *Sci. Rep.* 12, 1–10. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-15262-y>
- Cohen, J.D., 1995. The Structure Ignition Assessment Model (SIAM) 85–92.
- Cohen, J.D.J.J.D., Butler, B.W.B., 1996. Modeling potential structure ignitions from flame radiation exposure with implications for wildland/urban interface fire management. *Thirteen. Fire For. Meteorol.* 81–87.
- Crowl, D.A., Louvar, J.F., 2001. Chemical and Process Safety: Fundamentals with applications, Second. ed. Pearson College.
- D’Aulisa, A., Simone, D., Landucci, G., Tugnoli, A., Cozzani, V., Birk, M., 2014a. Numerical

- simulation of tanks containing pressurized gas exposed to accidental fires: Evaluation of the transient heat up. *Chem. Eng. Trans.* 36, 241–246. <https://doi.org/10.3303/CET1436041>
- D'Aulisa, A., Tugnoli, A., Cozzani, V., Landucci, G., Birk, A.M., 2014b. CFD modeling of LPG vessels under fire exposure conditions. *AIChE J.* 60, 4292–4305. <https://doi.org/10.1002/aic.14599>
- Davidy, A., 2019. CFD simulation and mitigation with boiling liquid expanding vapor explosion (BLEVE) caused by jet fire. *ChemEngineering* 3, 1–22. <https://doi.org/10.3390/chemengineering3010001>
- DiNenno, P.J., Drysdale, D., Beyler, C.L., Walton, W.D., Custer, R.L.P., John R. Hall, J., John M. Watts, J., 2002. *Handbook of Fire Protection Engineering*, Third. ed. NFPA.SFPE, Massachusetts.
- Drysdale, D., 1999. *An Introduction to Fire Dynamics*, Second. ed, Dairy Science & Technology, CRC Taylor & Francis Group. JOHN WILEY & SONS, West Sussex.
- Efthimiou, N., Psomiadis, E., Panagos, P., 2020. Fire severity and soil erosion susceptibility mapping using multi-temporal Earth Observation data: The case of Mati fatal wildfire in Eastern Attica, Greece. *Catena* 187, 104320. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2019.104320>
- European Committee for Standardization, 2018. EN ISO 15995.
- European Committee for Standardization, 2017. NP EN 1442.
- European Committee for Standardization, 2012. EN 12245:2009+A1.
- Favrin, S., Busini, V., Rota, R., Derudi, M., 2018. Practical LES modelling of jet fires: Issues and challenges. *Chem. Eng. Trans.* 67, 259–264. <https://doi.org/10.3303/CET1867044>
- Gómez-Mares, M., Muñoz, M., Casal, J., 2010. Radiant heat from propane jet fires. *Exp. Therm. Fluid Sci.* 34, 323–329. <https://doi.org/10.1016/j.expthermflusci.2009.10.024>
- Gross, J., Sadowski, G., 2001. Reply to Comment on “perturbed-Chain SAFT: An Equation of State Based on a Perturbation Theory for Chain Molecules.” *Ind. Eng. Chem. Res.* 40, 1244–1260. <https://doi.org/10.1021/acs.iecr.9b01515>
- Hankinson, G., 1986. Method for Calculating the Configuration Factor Between a Flame and a Receiving Target for a Wide Range of Flame Geometries Relevant To Large Scale Fires.

- FIRE Saf. Sci. FIRST Int. Symp. 197–206. <https://doi.org/10.3801/iafss.fss.1-197>
- Hemmatian, Behrouz, Casal, J., Planas, E., 2017. A new procedure to estimate BLEVE overpressure. *Process Saf. Environ. Prot.* 111, 320–325. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2017.07.016>
- Hemmatian, B., Planas, E., Casal, J., 2017. Comparative analysis of BLEVE mechanical energy and overpressure modeling, *Process Safety and Environmental Protection*.
- Heymes, F., Aprin, L., Forestier, S., Slangen, P., Baptiste Jarry, J., François, H., Dusserre, G., 2013. Impact of a distant wildland fire on an LPG tank. *Fire Saf. J.* 61, 100–107. <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2013.08.003>
- Hooker, P., Hall, J., Hoyes, J.R., Newton, A., Willoughby, D., 2017. Hydrogen jet fires in a passively ventilated enclosure. *Int. J. Hydrogen Energy* 42, 7577–7588. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2016.07.246>
- IPMA, 2016. Análise Preliminar do Período 5 a 10 Agosto 2016 na Madeira. Disponível em: <https://www.ipma.pt/pt/media/noticias/news.detail.jsp?f=/pt/media/noticias/arquivo/2016/madeira-5-10-ago-2016.html> (acessado em 02.03.2022).
- Jang, C.B., Choi, S.W., 2017. Simulation and Damage Analysis of an Accidental Jet Fire in a High-Pressure Compressed Pump Shelter. *Saf. Health Work* 8, 42–48. <https://doi.org/10.1016/j.shaw.2016.06.005>
- Kim, B.J., Kwan Seo, J., Hyo Park, J., Sung Jeong, J., Keun Oh, B., Hoon Kim, S., Hee Park, C., Kee Paik, J., 2010. Load characteristics of steel and concrete tubular members under jet fire: An experimental and numerical study. *Ocean Eng.* 37, 1159–1168. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2010.05.006>
- Koksal, K., McLennan, J., Every, D., Bearman, C., 2019. Australian wildland-urban interface householders' wildfire safety preparations: 'Everyday life' project priorities and perceptions of wildfire risk. *Int. J. Disaster Risk Reduct.* 33, 142–154. <https://doi.org/10.1016/j.ijdrr.2018.09.017>
- Landucci, G., D'Aulisa, A., Tugnoli, A., Cozzani, V., Birk, A.M., 2016. Modeling heat transfer and pressure build-up in LPG vessels exposed to fires. *Int. J. Therm. Sci.* 104, 228–244. <https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2016.01.002>

- 
- Lemmon, E.W., McLinden, M.O., Wagner, W., 2009. Thermodynamic properties of propane. III. A reference equation of state for temperatures from the melting line to 650 K and pressures up to 1000 MPa. *J. Chem. Eng. Data* 54, 3141–3180. <https://doi.org/10.1021/je900217v>
- Loureiro, M.C., 2018. Incendios Florestais no Concelho de Tondela: Uma visão da Comunidade.
- Lowesmith, B.J., Hankinson, G., Acton, M.R., Chamberlain, G., 2007. An overview of the nature of hydrocarbon jet fire hazards in the oil and gas industry and a simplified approach to assessing the hazards. *Process Saf. Environ. Prot.* 85, 207–220. <https://doi.org/10.1205/psep06038>
- Magnussen, B.F., 1981. On the structure of turbulence and a generalized eddy dissipation concept for chemical reaction in turbulent flow. <https://doi.org/10.2514/6.1981-42>
- Manu, C.C., Birk, A.M., Kim, I.Y., 2009. Stress rupture predictions of pressure vessels exposed to fully engulfing and local impingement accidental fire heat loads. *Eng. Fail. Anal.* 16, 1141–1152. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2008.07.018>
- Manzello, S.L., Almand, K., Guillaume, E., Vallerent, S., Hameury, S., Hakkarainen, T., 2018. FORUM position paper: The growing global wildland urban interface (WUI) fire Dilemma: Priority needs for research. *Fire Saf. J.* 100, 64–66. <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2018.07.003>
- Mashhadimoslem, H., Ghaemi, A., Palacios, A., 2021. A comparative study of radiation models on propane jet fires based on experimental and computational studies. *Heliyon* 7, e07261. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2021.e07261>
- Menter, F.R., 1994. Two-equation eddy-viscosity turbulence models for engineering applications. *AIAA J.* 32, 1598–1605. <https://doi.org/10.2514/3.12149>
- Molina-Terrén, D.M., Xanthopoulos, G., Diakakis, M., Ribeiro, L., Caballero, D., Delogu, G.M., Viegas, D.X., Silva, C.A., Cardil, A., 2019. Analysis of forest fire fatalities in Southern Europe: Spain, Portugal, Greece and Sardinia (Italy). *Int. J. Wildl. Fire* 28, 85–98. <https://doi.org/10.1071/WF18004>
- National Institute of Standards and Technology, n.d. Saturation Properties for Propane —
-

- Temperature Increments [WWW Document].
- Norman A. Eisenberg, Cornelius J. Lynch, Rozer J. Breedin, 1975. VULNERABILITY MODEL: A Simulation System for Assessing Damage Resulting from Marine Spills. *Natl. Tech. Inf. Serv.* 335.
- Oliveira, R., Oliveira, S., Zêzere, J.L., Viegas, D.X., 2020. Uncovering the perception regarding wildfires of residents with different characteristics. *Int. J. Disaster Risk Reduct.* 43. <https://doi.org/10.1016/j.ijdrr.2019.101370>
- Palacios, A., Casal, J., 2011. Assessment of the shape of vertical jet fires. *Fuel* 90, 824–833. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2010.09.048>
- Palacios, A., García, W., Rengel, B., 2020. Flame shapes and thermal fluxes for an extensive range of horizontal jet flames. *Fuel* 279, 118328. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2020.118328>
- Palacios, A., Muñoz, M., Darbra, R.M., Casal, J., 2012. Thermal radiation from vertical jet fires. *Fire Saf. J.* 51, 93–101. <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2012.03.006>
- Palmos, D., Papavasileiou, C., Papakitsos, E.C., Vamvakeros, X., Mavrakis, A., 2021. Enhancing the environmental programmes of secondary education by using web-tools concerning precaution measures in civil protection: The case of Western Attica (Greece). *Saf. Sci.* 135, 105117. <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2020.105117>
- Park, H., Lee, J., Lim, J., Cho, H., Kim, J., 2022. Optimal operating strategy of ash deposit removal system to maximize boiler efficiency using CFD and a thermal transfer efficiency model. *J. Ind. Eng. Chem.* 110, 301–317. <https://doi.org/10.1016/j.jiec.2022.03.004>
- Pastor, E., Muñoz, J.A., Caballero, D., Àgueda, A., Dalmau, F., Planas, E., 2020. Wildland–Urban Interface Fires in Spain: Summary of the Policy Framework and Recommendations for Improvement. *Fire Technol.* 56, 1831–1851. <https://doi.org/10.1007/s10694-019-00883-z>
- Pereira, D.J.S., Viegas, C., Panão, M.R.O., 2022. Heat transfer model of fire protection fiberglass thermal barrier coated with thin aluminium layer. *Int. J. Heat Mass Transf.* 184, 122301. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2021.122301>
- Pinto, C., Viegas, D., Almeida, M., Raposo, J., 2017. Fire whirls in forest fires: An experimental

- analysis. *Fire Saf. J.* 87, 37–48. <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2016.11.004>
- Planas-Cuchi, E., Salla, J.M., Casal, J., 2004. Calculating overpressure from BLEVE explosions. *J. Loss Prev. Process Ind.* 17, 431–436. <https://doi.org/10.1016/j.jlp.2004.08.002>
- Poling, B.E., Prausnitz, J.M., O’Connell, J.P., 2001. *The properties of gases and liquids*. McGraw-Hill.
- Pordata.pt, 2022. Incêndios rurais e área ardida – Continente. Disponível em: <https://www.pordata.pt/Portugal/Incêndios+rurais+e+área+ardida+--+Continente-1192> (acessado em 01.02.2022).
- Prieler, R., Belohradsky, P., Mayr, B., Rinner, A., Hochenauer, C., 2017. Valiation of Turbulence/Chemistry Interaction Models for use in Oxygen Enhanced Combustion, in: *Energy Procedia*. 11th European Conference on Industrial Furnaces and Boilers, INFUB-11, pp. 548–555.
- Quintiere, J.G., 2006. *Fundamentals of Fire Phenomena*, First. ed, Fundamentals of Fire Phenomena. John Wiley & Sons, Ltd, Chichester. <https://doi.org/10.1002/0470091150>
- Radeloff, V.C., Helmers, D.P., Anu Kramer, H., Mockrin, M.H., Alexandre, P.M., Bar-Massada, A., Butsic, V., Hawbaker, T.J., Martinuzzi, S., Syphard, A.D., Stewart, S.I., 2018. Rapid growth of the US wildland-urban interface raises wildfire risk. *Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A.* 115, 3314–3319. <https://doi.org/10.1073/pnas.1718850115>
- Raposo, J.R.N., 2016. *Extreme fire behaviour associated with the merging of two linear fire fronts*. Coimbra University, Coimbra.
- Redmond, M., Mastropietro, A.J., 2015. *Thermophysical and Optical Properties of Materials Considered for use on the LDSD Test Vehicle*. 45th Int. Conf. Environ. Syst.
- Ribeiro, L.M. et al, 2017. The Fire Episode of Funchal (Madeira) in August 2016 – An Extraordinary Event of WUI and Fire Safety Risk., in: *Proceedings of the 14th International Wildland Fire Safety Summit & International Congress on Prescribed Fires*.
- Ribeiro, L.M., 2016. *Os Incêndios Na Interface Urbano-Florestal Em Portugal: Uma Análise De Diagnóstico*. Universidade de Coimbra.
- Ribeiro, L.M., Rodrigues, A., Lucas, D., Viegas, D.X., 2020. *The impact on structures of the*

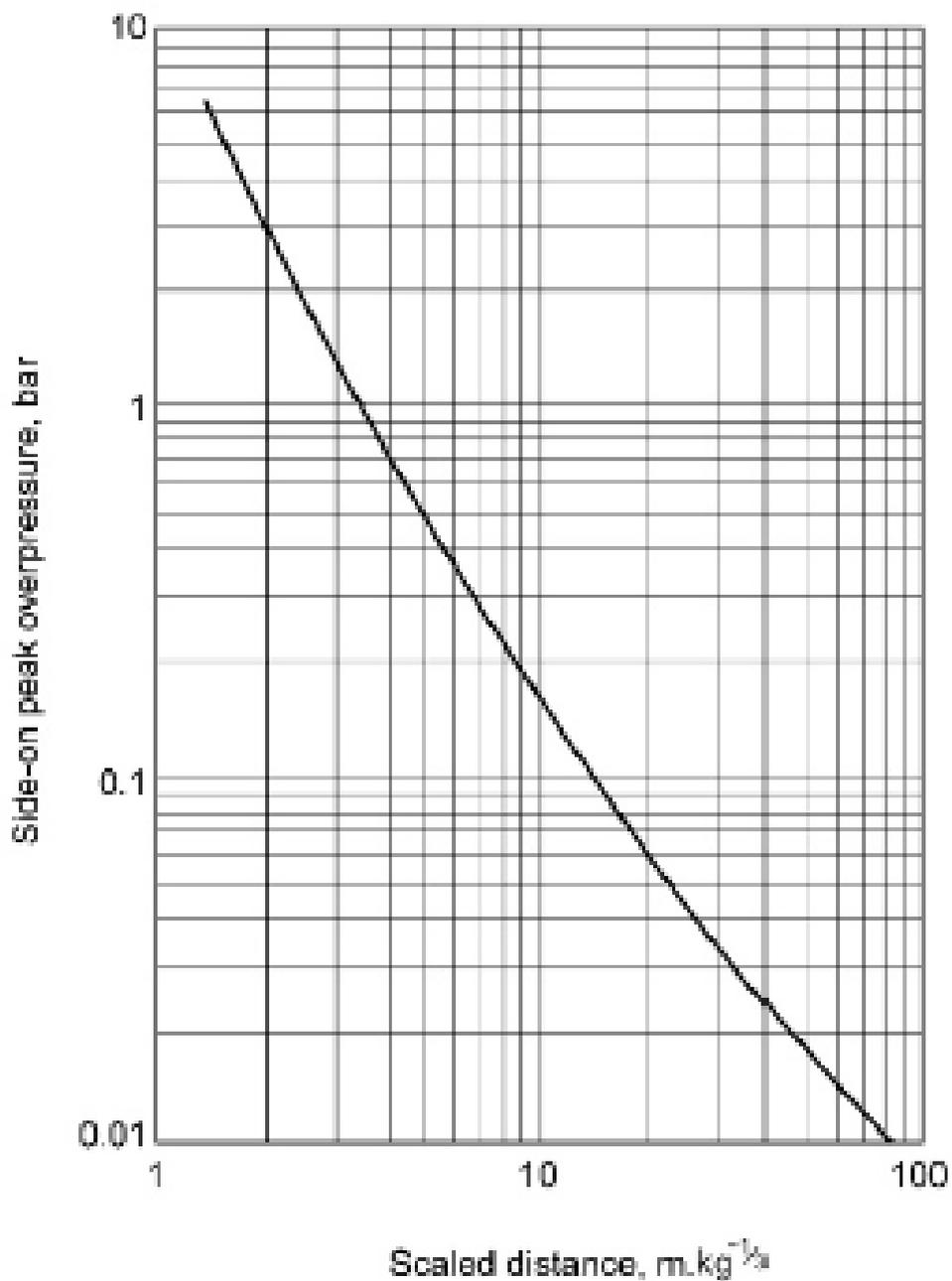
- pedrógão grande fire complex in June 2017 (Portugal). *Fire* 3, 1–22. <https://doi.org/10.3390/fire3040057>
- Ricci, F., Scarponi, G.E., Pastor, E., Planas, E., Cozzani, V., 2021. Safety distances for storage tanks to prevent fire damage in Wildland-Industrial Interface. *Process Saf. Environ. Prot.* 147, 693–702. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2021.01.002>
- Rodrigues, A., Ribeiro, C., Raposo, J., Viegas, D.X., André, J., 2019. Effect of Canyons on a Fire Propagating Laterally Over Slopes. *Front. Mech. Eng.* 5, 1–9. <https://doi.org/10.3389/fmech.2019.00041>
- Rodríguez-García, E., Santana, V.M., Alloza, J.A., Ramón Vallejo, V., 2022. Predicting natural hyperdense regeneration after wildfires in *Pinus halepensis* (Mill.) forests using prefire site factors, forest structure and fire severity. *For. Ecol. Manage.* 512. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2022.120164>
- Rohsenow, W.M., Hartnett, J.P., Cho, Y.I., 1998. *Handbook of heat transfer*, Third. ed. McGraw Hill, New York. <https://doi.org/10.1002/9783527630868.ch4>
- Scarponi, G.E., Landucci, G., Birk, A.M., Cozzani, V., 2019. An innovative three-dimensional approach for the simulation of pressure vessels exposed to fire. *J. Loss Prev. Process Ind.* 61, 160–173. <https://doi.org/10.1016/j.jlp.2019.06.008>
- Scarponi, G.E., Landucci, G., Birk, A.M., Cozzani, V., 2018a. LPG vessels exposed to fire: Scale effects on pressure build-up. *J. Loss Prev. Process Ind.* 56, 342–358. <https://doi.org/10.1016/j.jlp.2018.09.015>
- Scarponi, G.E., Landucci, G., Heymes, F., Cozzani, V., 2018b. Experimental and numerical study of the behavior of LPG tanks exposed to wildland fires. *Process Saf. Environ. Prot.* 114, 251–270. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2017.12.013>
- Scarponi, G.E., Pastor, E., Planas, E., Cozzani, V., 2020. Analysis of the impact of wildland-urban-interface fires on LPG domestic tanks. *Saf. Sci.* 124. <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2019.104588>
- Shen, R., Jiao, Z., Parker, T., Sun, Y., Wang, Q., 2020. Recent application of Computational Fluid Dynamics (CFD) in process safety and loss prevention: A review. *J. Loss Prev. Process Ind.* 67, 104252. <https://doi.org/10.1016/j.jlp.2020.104252>

- 
- Stawczyk, J., 2003. Experimental evaluation of LPG tank explosion hazards, *Journal of Hazardous Materials*.
- Tedim, F., Leone, V., Amraoui, M., Bouillon, C., Coughlan, M., Delogu, G., Fernandes, P., Ferreira, C., McCaffrey, S., McGee, T., Parente, J., Paton, D., Pereira, M., Ribeiro, L., Viegas, D., Xanthopoulos, G., 2018. Defining Extreme Wildfire Events: Difficulties, Challenges, and Impacts. *Fire* 1, 9. <https://doi.org/10.3390/fire1010009>
- Tedim, F., Leone, V., Mcgee, T.K., 2020. Extreme Wildfire Events and Disasters. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-815721-3.00002-3>
- Tschirschwitz, R., Krentel, D., Kluge, M., Askar, E., Habib, K., Kohlhoff, H., Krüger, S., Neumann, P.P., Storm, S.U., Rudolph, M., Schoppa, A., Szczepaniak, M., 2018. Experimental investigation of consequences of LPG vehicle tank failure under fire conditions. *J. Loss Prev. Process Ind.* 56, 278–288. <https://doi.org/10.1016/j.jlp.2018.09.006>
- Tschirschwitz, R., Krentel, D., Kluge, M., Askar, E., Habib, K., Kohlhoff, H., Neumann, P.P., Storm, S.U., Rudolph, M., Schoppa, A., Szczepaniak, M., 2017. Mobile gas cylinders in fire: Consequences in case of failure. *Fire Saf. J.* 91, 989–996. <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2017.05.006>
- Vacca, P., Caballero, D., Pastor, E., Planas, E., 2020. WUI fire risk mitigation in Europe: A performance-based design approach at home-owner level. *J. Saf. Sci. Resil.* 1, 97–105. <https://doi.org/10.1016/j.jnlssr.2020.08.001>
- Viegas, C., Batista, R., Albino, A., Coelho, M., Andrade, J., Alves, D., Viegas, D.X., 2021. Active Barrier Combining Fire-Resistant Fiberglass Fabric and Water Sprinkler System for Protection Against Forest Fires. *Fire Technol.* 57, 189–206. <https://doi.org/10.1007/s10694-020-00991-1>
- Viegas, D.X., Figueiredo Almeida, M., Ribeiro, L.M., Raposo, J., Viegas, M.T., Oliveira, R., Alves, D., Pinto, C., Jorge, H., Rodrigues, A., Lucas, D., Lopes, S., Silva, L.F., 2017. O complexo de incêndios de Pedrógão o Grande e concelhos limítrofes, iniciado a 17 de Junho de 2017.
- Viegas, D.X., Palheiro, P.M., Pita, L.P., Ribeiro, L.M., Cruz, M.G., Ollero, A., Arrue, B.,
-

- 
- Ramiro, M.D., 2006. Analysis of fire behaviour in Mediterranean shrubs: The Gestosa fire experiments (Portugal). *For. Ecol. Manage.* 234, S101. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2006.08.137>
- Viegas, D.X., Rodrigues, A., Abouali, A., Almeida, M., Raposo, J., 2021. Fire downwind a flat surface entering a canyon by lateral spread. *Fire Saf. J.* 122, 103349. <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2021.103349>
- Viegas, X., Almeida, M.F., Ribeiro, M., Almeida, M.A., Raposo, J., Viegas, M.T., Oliveira, R., Alves, D., Pinto, C., Rodrigues, A., Ribeiro, C., Lopes, S., Jorge, H., Viegas, C.X., 2019. Análise Dos Incêndios Florestais Ocorridos a 15 De Outubro De 2017 - Principais incêndios e resposta operacional.
- Weber, C., 2016. Evacuations canceled near Calabasas wildfire. *Press Democr.* Disponível em: <https://www.pressdemocrat.com/article/news/evacuations-canceled-near-calabasas-wildfire/?artslide=1> (acessado em 22.05.2022).
- Yi, H., Feng, Y., Wang, Q., 2019. Computational fluid dynamics (CFD) study of heat radiation from large liquefied petroleum gas (LPG) pool fires. *J. Loss Prev. Process Ind.*

## ANEXOS

### Anexo A: Diagrama Scaled distance X sobrepressão usado no método equivalência de TNT



Fonte: (Casal, 2008)

## Anexo B: Tabela com a sobrepressão e respectivos danos a estruturas

Damage to buildings and structures (blast)		
Peak overpressure, kPa	Damage	Peak overpressure, bar
0.15	Annoying noise	0.0015
0.2	No structural damage; occasional breaking of large window panes already under strain	0.002
0.3	Loud noise similar to sonic boom; occasional glass failure	0.003
0.7	Breakage of small windows under strain	0.007
1	Typical threshold for glass breakage	0.01
2	Probability of 0.95 of no serious damage beyond this value; some damage to house ceilings; 50% of window glass broken	0.02
3	Limited minor structural damage	0.03
3.5-7	Windows usually shattered; occasional damage to window frames	0.035-0.07
5	Minor damage to house structures	0.05
7	Collapse of roof of a tank	0.07
8	Partial demolition of houses, made uninhabitable	0.08
7-15	Corrugated asbestos shattered. Corrugated steel or aluminum panels fastenings fail, followed by buckling; wood panel fastenings fail, panels blown in	0.07-0.15
10	Steel frame of clad buildings slightly distorted	0.1
15	Partial collapse of walls and roofs of houses	0.15
15-20	Unreinforced concrete or cinderblock walls shattered	0.15-0.2
18	Lower limit of serious structural damage; 50% destruction of brickwork of houses	0.18
20	Heavy machines in industrial buildings suffer little damage; steel frame building distorted and pulled away from foundations	0.2
20-28	Frameless, self-framing steel panel building demolished; rupture of oil storage tanks	0.2-0.28
20-40	Large trees fall down	0.2-0.4
30	Cladding of light industrial buildings ruptured. Panelling torn-off	0.3
35	Breakage of wooden telephone poles; most buildings destroyed, except for concrete reinforced shear wall buildings; "plating" of cars and trucks pressed inwards	0.35
35-40	Displacement of pipe bridge, failure of piping	0.35-0.4
35-50	Near-complete destruction of houses	0.35-0.5
40-55	Collapse of pipe bridge	0.4-0.55
50	Loaded tank cars/train wagons overturned; brick walls, 20-30 cm thick, collapse	0.5
50-55	Unreinforced brick panels, 25-35 cm thick, fail by shearing or flexure	0.5-0.55
60	Loaded train boxcars completely demolished	0.6
70	Probable total destruction of buildings; heavy machine tools moved and badly damaged	0.7

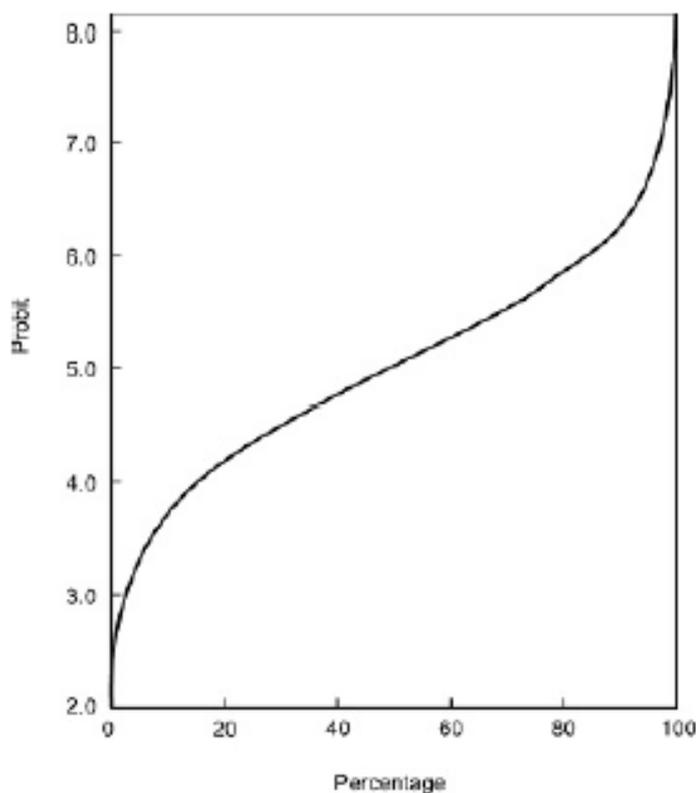
Fonte: Casal, 2008

**Anexo C: Tabela com a sobrepressão e respectivos danos a pessoas.**

Consequences of overpressure on people

Overpressure, bar	Consequences
<1	Individuals should be reasonably safe inside a reinforced structure away from windows or lying on the ground if outdoors
0.07-0.014	Casualties or fatalities are to be expected as a result of missiles or self-impact against objects
>0.21	Dynamic pressure loading is likely to hurl a human being to the ground
0.34	Eardrums rupture
1	Lung damage

Fonte: Casal, 2008

**Anexo D: Relações da equação de Probit e a probabilidade.**

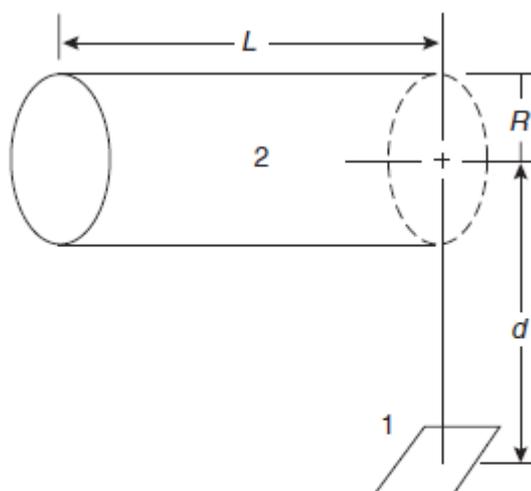
Fonte: Casal, 2008

Relationship between the probit variable and the percentage [1]

%	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0		2.67	2.95	3.12	3.25	3.36	3.45	3.52	3.59	3.66
10	3.72	3.77	3.82	3.87	3.92	3.96	4.01	4.05	4.08	4.12
20	4.16	4.19	4.23	4.26	4.29	4.33	4.36	4.39	4.42	4.45
30	4.48	4.50	4.53	4.56	4.59	4.61	4.64	4.67	4.69	4.72
40	4.75	4.77	4.80	4.82	4.85	4.87	4.90	4.92	4.95	4.97
50	5.00	5.03	5.05	5.08	5.10	5.13	5.15	5.18	5.20	5.23
60	5.25	5.28	5.31	5.33	5.36	5.39	5.41	5.44	5.47	5.50
70	5.52	5.55	5.58	5.61	5.64	5.67	5.71	5.74	5.77	5.81
80	5.84	5.88	5.92	5.95	5.99	6.04	6.08	6.13	6.18	6.23
90	6.28	6.34	6.41	6.48	6.55	6.64	6.75	6.88	7.05	7.33
-	0.0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9
99	7.33	7.37	7.41	7.46	7.51	7.58	7.65	7.75	7.88	8.09

Fonte: Casal, 2008

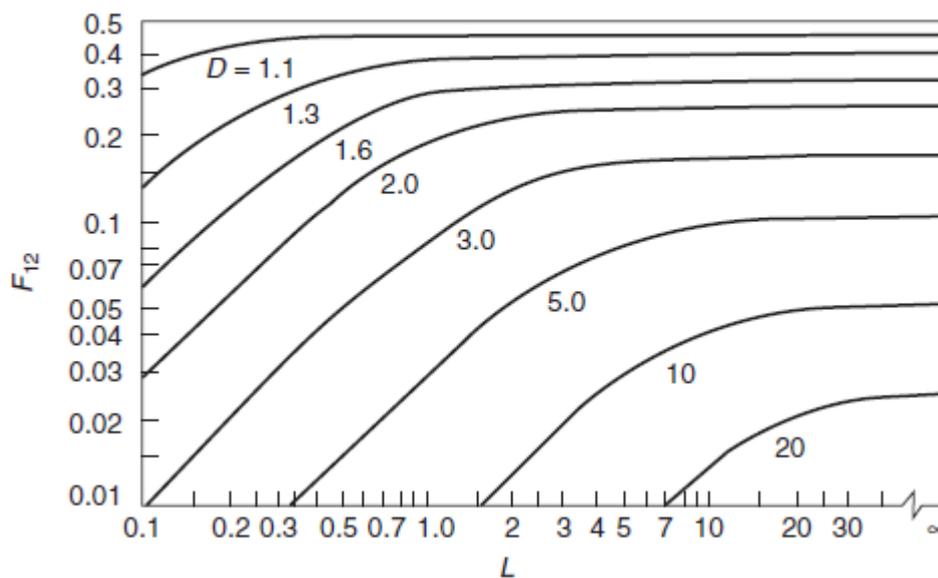
## Anexo E: Equação, gráfico e tabelas do fator de forma



$$F_{12} = \frac{1}{\pi D} \tan^{-1} \left( \frac{L}{\sqrt{D^2 - 1}} \right) + \frac{L}{\pi} \left[ \frac{A - 2D}{D\sqrt{AB}} \tan^{-1} \sqrt{\frac{A(D-1)}{B(D+1)}} - \frac{1}{D} \tan^{-1} \sqrt{\frac{D-1}{D+1}} \right]$$

$$D = \frac{d}{r} \quad L = \frac{L}{R}$$

$$A = (D+1)^2 + L^2 \quad B = (D-1)^2 + L^2$$



Fonte: DiNeno et al, 2002

Vertical view factor ( $F_v$ ) for a cylindrical fire

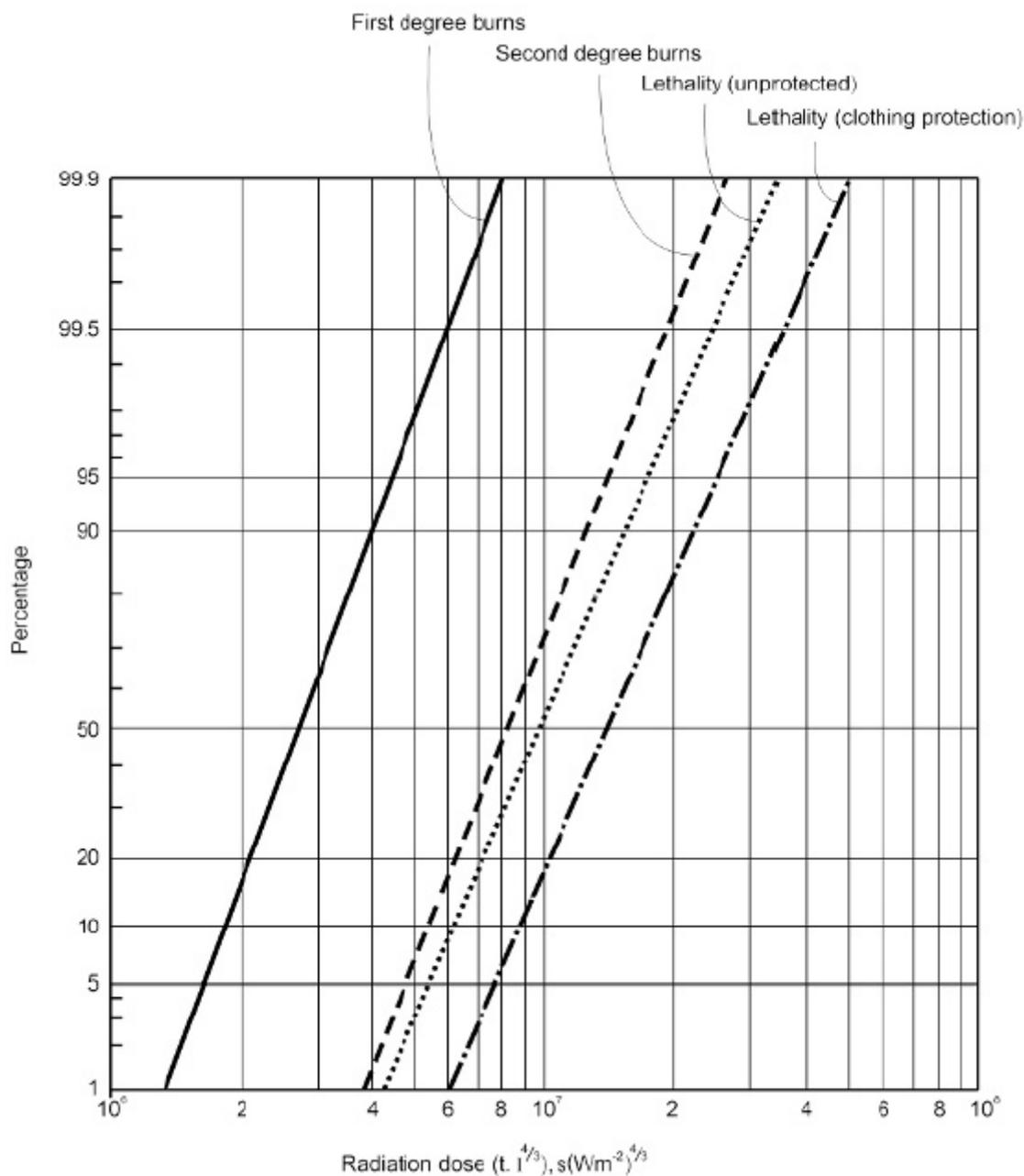
$l/(D/2)$	$H/(D/2)$									
	0.1	0.2	0.5	1.0	2.0	3.0	5.0	6.0	10.0	20.0
1.10	0.330	0.415	0.449	0.453	0.454	0.454	0.454	0.454	0.454	0.454
1.20	0.196	0.308	0.397	0.413	0.416	0.416	0.416	0.416	0.416	0.416
1.30	0.130	0.227	0.344	0.376	0.383	0.384	0.384	0.384	0.384	0.384
1.40	0.096	0.173	0.296	0.342	0.354	0.356	0.356	0.357	0.357	0.357
1.50	0.071	0.135	0.253	0.312	0.329	0.330	0.333	0.333	0.333	0.333
2.00	0.028	0.056	0.126	0.194	0.236	0.245	0.248	0.249	0.249	0.249
3.00	0.009	0.019	0.047	0.086	0.132	0.150	0.161	0.163	0.165	0.166
4.00	0.005	0.010	0.024	0.047	0.080	0.100	0.115	0.119	0.123	0.124
5.00	0.003	0.006	0.015	0.029	0.053	0.069	0.086	0.091	0.097	0.099
10.00	0.000	0.001	0.003	0.006	0.013	0.019	0.029	0.032	0.042	0.048
20.00	0.000	0.000	0.000	0.001	0.003	0.004	0.007	0.009	0.014	0.020
50.00	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001	0.001	0.002	0.004

Horizontal view factor ( $F_h$ ) for a cylindrical fire

$l/(D/2)$	$H/(D/2)$									
	0.1	0.2	0.5	1.0	2.0	3.0	5.0	6.0	10.0	20.0
1.10	0.132	0.242	0.332	0.354	0.360	0.362	0.362	0.362	0.363	0.363
1.20	0.044	0.120	0.243	0.291	0.307	0.310	0.312	0.312	0.313	0.313
1.30	0.020	0.065	0.178	0.242	0.268	0.274	0.277	0.277	0.278	0.279
1.40	0.011	0.038	0.130	0.203	0.238	0.246	0.250	0.251	0.252	0.253
1.50	0.005	0.024	0.097	0.170	0.212	0.222	0.228	0.229	0.231	0.232
2.00	0.001	0.005	0.027	0.073	0.126	0.145	0.158	0.160	0.164	0.166
3.00	0.000	0.000	0.005	0.019	0.050	0.071	0.091	0.095	0.103	0.106
4.00	0.000	0.000	0.001	0.007	0.022	0.038	0.057	0.062	0.073	0.078
5.00	0.000	0.000	0.000	0.003	0.011	0.021	0.037	0.043	0.054	0.061
10.00	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001	0.003	0.007	0.009	0.017	0.026
20.00	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001	0.001	0.003	0.003
50.00	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000

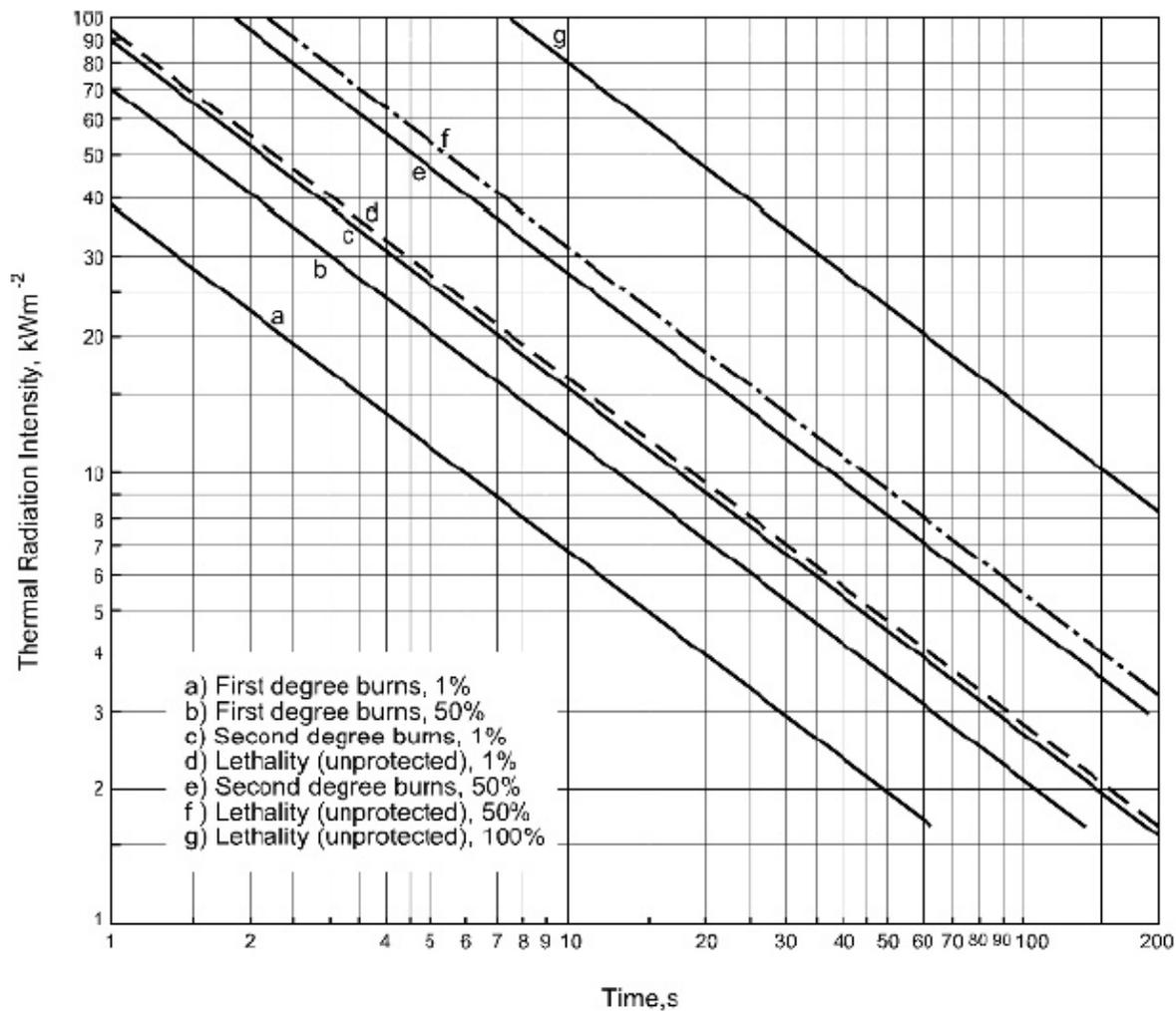
Fonte Casal, 2008

### Anexo F: Relação probabilidade X dose e os respectivos graus de queimadura.



Fonte: Buettner, 1951; Casal, 2008

**Anexo G: Relação tempo de exposição e intensidade da radiação térmica e os respectivos graus de queimadura e letalidade.**



Fonte: Buettner, 1951; Casal, 2008

## Anexo H: Equações de governo

H1. Equação de *Momentum* – para o sistema multifase

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho_m \vec{v}) + \nabla(\rho_m \vec{v}\vec{v}) = -\nabla P + \nabla[\mu_m(\nabla\vec{v} + \nabla\vec{v}^T)] + \rho_m \vec{g} + \vec{F}$$

onde:  $\vec{v}$  é a velocidade;  $\rho_m$  é a densidade média numa fração do volume para o sistema de duas fases;  $\mu_m$  é a viscosidade média para o sistema de duas fases; P é a pressão; T é a temperatura;  $\vec{F}$  é o vetor força.

H2. Energia para o sistema multifase – domínio fluido

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho E) + \nabla[\vec{v}(\rho E + P)] = -\nabla p + (k_{eff} \nabla T) + H_{vap}(m_{\dot{v}-L} - m_{\dot{L}-v})$$

onde: E média da energia específica para o sistema duas faes;  $k_{eff}$  é a condutividade térmica efetiva;  $H_{vap}$  é o calor de vaporização.

E o Modelo Lee (Lee model) proposto por ANSYS Inc (2022a) baseado no trabalho de Hertz-Knudsen.

$$m_{\dot{v}-v} = C_{Ev} \alpha_l \rho_l \left( \frac{T - T_{sat}}{T_{sat}} \right)$$

onde:  $C_{Ev}$  coeficiente de evaporação;  $\alpha_l$  fração de volume;  $\rho_l$  massa específica do líquido;  $T_{sat}$  temperatura de saturação; T é a temperatura

H3. Energia –para o sistema multifase – domínio sólido

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho_s C_{Ps} T_s) = \nabla(k_s \nabla T_s)$$

Onde:  $T_s$  é a temperatura no sólido;  $C_{P_s}$  capacidade térmica do metal;  $\rho_s$  é a massa específica do metal;  $k_s$  é a condutividade térmica do metal.

## APÊNDICE

### **Apêndice A: documento destinado aos agentes de proteção civil e à sociedade**

#### **Preâmbulo**

Neste texto encontram-se informações referentes ao armazenamento de GPL na interface urbano-florestal: consequências da exposição das garrafas e tanques de GPL ao fogo e recomendações de segurança. Tem o objetivo de informar e indicar boas práticas aos agentes de proteção civil e a comunidade civil com base na investigação desenvolvida nos últimos anos. Aos leitores deste texto que pretenderem ter informações com caráter mais técnico, podem encontrá-la nos links disponibilizados no fim deste documento.

Em verdade, deve-se inicialmente considerar que as garrafas de GPL são bem construídos e não são bombas à mercê da aleatoriedade, mas que devem ser utilizados com cuidado, dada a elevada quantidade de energia que armazenam sob a forma de um produto combustível pressurizado. Até a presente data, este autor não encontrou casos em que a explosão de garrafas de gás tenha ocorrido por falha no seu fabrico. O seu fabrico segue rigorosos critérios de qualidade e de segurança. Contudo, as garrafas atendem a determinado uso e armazenamento. O risco está principalmente ligado, mas não somente, à exposição prolongada destes reservatórios às chamas, que em um incêndio, têm grande intensidade.

As informações aqui compartilhadas são resultado de uma investigação feita no âmbito do doutoramento do engenheiro Thiago Fernandes Barbosa, da Universidade de Coimbra e do Centro de Estudos sobre Incêndios Florestais, sob orientação dos Professores Doutores Domingos Xavier Viegas e Jorge Rafael Raposo. Neste trabalho, algumas garrafas com diferentes configurações: metálicas e compósitas; com e sem válvula de segurança; contendo butano ou propano, foram expostos ao fogo, tendo sido levados em alguns casos ao estado de rotura por explosão.

Esta investigação é uma resposta aos incidentes e acidentes envolvendo GPL, inclusive com mortes, ocorridos durante os incêndios: Funchal (2016), Pedrógão Grande (2017) e Incêndios de 15 outubro (2017).

## Os recentes acidentes e incidentes com reservatórios de GPL

Inicialmente foram catalogados 14 casos de acidentes e incidentes (Tabela 1) envolvendo GPL em Portugal e em outros países. Apesar de outros casos terem ocorrido, estes carecem de informação precisa e fiável e não foram inseridos neste documento.

Tabela1: Resumo dos recentes acidentes e incidentes relacionados com GPL armazenado durante incêndios de interface urbano-florestal

Caso	Fatalidades	Tipo	Consequências	Ano	País
1	-	Garrafa	Explosão -Portas e janelas quebradas	2016	Portugal
2	-	Garrafa	4 Garrafas queimadas	2016	Portugal
3	1	Garrafa	Explosão -Colapso de parte da casa	2017	Portugal
4	-	Garrafa	2 Garrafas – uma explosão e outro jato de fogo	2017	Portugal
5	1	Garrafa	Explosão – Colapso do telheiro da cozinha	2017	Portugal
6	-	Garrafa	Explosão -Destruição de parte da casa	2017	Portugal
7	-	Garrafa	21 Garrafas - Explosões	2017	Portugal
8	-	Tanque	Jato de fogo	2016	Espanha
9	-	Tanque	Jato de fogo	2016	Espanha
10	-	Tanque	Jato de fogo	2018	Grécia
11	-	Garrafa	Explosão	2018	Grécia
12	-	Garrafa	5 Garrafas queimadas	2018	Espanha
13	-	Garrafa	Explosão – Colapso da estrutura	2015	Portugal
14	-	Tanque	Jato de fogo	2016	Estados Unidos

### As garrafas de gás (garrafas)

Existem reservatórios de GPL com diversos volumes de armazenamento fabricados sob as normas europeias (EN 15995-2018, EN 1442-2018, EN 12245:2009+A1): garrafas com 11, 12, 13 e 45 kg, além de alguns com menor volume, usados para campismo. As garrafas podem ter diferentes configurações: metálicos ou compósitos (aqueles mais leves e ergonômicos), com ou sem válvula de segurança, cheios com butano ou propano.

Em Portugal, os dois tipos mais comuns são as garrafas fabricadas em metal e em compósito com volumes de aproximadamente 26 e 24 litros, respetivamente. Garrafas de metal são fabricadas em metal, enquanto as garrafas de compósito são fabricadas com 3 camadas de diferentes materiais sobrepostas: a primeira e mais externa é fabricada com polietileno, ela

contém as estampas da marca e as alças; a segunda camada, intermédia, é feita com filamentos de polipropileno e fibra de vidro; e a camada mais interna é metálica, possuindo uma fina espessura. Assim, existe grande diferença de materiais, propriedades e comportamento quando essas garrafas são expostas ao fogo.

Existe diferenças importantes entre o armazenamento de propano e de butano. Uma garrafa contendo propano armazenada ao ambiente pode ter uma pressão até 5 vezes superior à de uma garrafa com butano. Esse é o principal motivo de não ser recomendado o armazenamento doméstico de propano. Outro motivo, é que o butano possui maior inércia térmica que o propano, ou seja, precisa de mais calor para que a pressão no interior da garrafa aumente.

A válvula de segurança é um fator importantíssimo para evitar uma explosão. Deve-se optar por garrafas que tenham esse dispositivo. A determinada pressão, próximo aos 26 bar para garrafas de metal e 21 bar para garrafas de compósito, essa válvula abrirá e permitirá um caudal de GPL para fora da garrafa, reduzindo a pressão no interior e reduzindo significativamente a probabilidade de uma explosão. Contudo, um jato de fogo pode ser formado. Esse evento, embora seja menos severo que uma explosão, pode ainda assim causar a continuidade do incêndio nas proximidades.

Uma característica importante das garrafas metálicas, que constitui um elemento adicional de segurança, para além da válvula de alívio de pressão, é a capacidade de expansão do seu volume. Conforme a norma de construção, a garrafa deve expandir no mínimo 20% quando aquecida e seja aumentada a pressão. Portanto, essas garrafas irão deformar-se quando expostas às chamas. Uma garrafa tem o formato de um cilindro, mas quando deformadas podem ter o aspeto alterado. Geralmente essa alteração ocorre na parte superior, apresentando maior circunferência próximo às alças, ou geometrias semelhantes a bolas na sua superfície. É preciso ter atenção a essas garrafas, pois é um sinal de que o material sofreu grande estresse e a resistência pode ter sido comprometida.

As garrafas compósitas não têm a mesma capacidade de expansão das metálicas. Por isso, a válvula de segurança de uma garrafa compósita abre a uma pressão menor que uma válvula de segurança numa garrafa metálica. Além disso, as garrafas compósitas estudadas nesse trabalho também tinham um dispositivo de segurança adicional: uma estrutura semelhante

a um fusível que se abre quando a temperatura na superfície é alta. Diferente das válvulas de segurança que podem abrir e fechar quando a pressão aumenta e diminui, esse fusível permanecerá aberto e permitirá toda a saída do gás. Deve-se ter atenção especial a esse tipo de dispositivo de segurança pois na fase de rescaldo de um incêndio ainda pode haver alguma libertação residual de gás. Com isso, caso o local seja fechado ou parcialmente fechado, um flashfire pode ocorrer caso haja o contato com alguma fonte de ignição. Um acidente em condições similares ocorreu em um armazém em Freamunde e essa é uma provável causa.

### **Efeitos da exposição das garrafas ao fogo**

Nesta parte do presente documento, são reunidas informações dos testes feitos pela equipa do CEIF. Garrafas com 12 kg de butano e com 11 kg de propano, metálicas e compósitas, com e sem válvula de segurança, foram colocadas completamente imersas às chamas. Dentre os testes realizados, a única garrafa que explodiu foi a que não tinha a válvula de segurança. E um detalhe importante deste teste é que a rotura ocorreu durante a fase de arrefecimento, quando já não havia chamas. Os testes feitos com garrafas com válvula de segurança, tanto as garrafas metálicas como as compósitas, suportaram o aquecimento libertando o gás para aliviar a pressão, ocorrendo um jato de fogo e evitando a explosão.

A exposição das garrafas às chamas, de forma geral, pode causar dois eventos: a explosão e o jato de fogo. O primeiro evento, a explosão, tecnicamente chamada de *BLEVE*, tem três efeitos principais: lançamento de fragmentos (partes da garrafa e de objetos na proximidade), bola de fogo e sobrepressão. O segundo evento, o jato de fogo, é semelhante a um maçarico o qual se mantêm enquanto o gás escoar para fora da garrafa.

Do *BLEVE* de garrafas de gás, como os testados pela equipa do CEIF, o lançamento de fragmentos pode alcançar longas distâncias. Nos testes feitos pela equipa, o alcance máximo dos fragmentos foi 113 metros. A garrafa partiu-se em dois fragmentos com massa de aproximadamente 4 e 11 kg, alcançando velocidades de até 250 km.h<sup>-1</sup>. Isto representa uma grande quantidade de energia causada pelo impacto de um desses fragmentos, podendo também causar mortes. Outros autores, também através de testes experimentais, encontraram valores

para o alcance dos fragmentos de até 300 metros, estando o alcance diretamente relacionado com a pressão no momento da rotura.

A sobrepressão pode aqui ser descrita como uma energia que se propaga nas proximidades da explosão. As estimativas feitas mostram que para uma garrafa cheia, a uma distância de até 3 metros, a sobrepressão pode projetar um adulto e causar lesão aos tímpanos. À distância de até 1 metro da explosão, considerando apenas o efeito da sobrepressão, a probabilidade de letalidade é até 99%. Tímpanos e pulmões, zonas do corpo que contém ar, são severamente afetadas pela onda de energia. Em relação a estruturas, a uma distância até 2 metros, a explosão pode causar o colapso de estruturas, como visto nos casos 3 e 5 da Tabela 1.

Em nossos testes a bola de fogo teve 14,5 metros de altura, 11,5 metros de largura, durou 1,3 segundo e temperaturas acima dos 550 °C. A bola de fogo causa grande efeito visual e a radiação térmica estimada mostra valores altos, mais altos inclusive que o jato de fogo. Contudo, considerando a curta duração da bola de fogo de uma garrafa doméstica de GPL, a dose pode não ser letal (dose é a radiação recebida durante o tempo de exposição). Para a dose encontrada e para pessoas com roupas cotidianas, a probabilidade de queimaduras devido a uma bola de fogo de uma garrafa de GPL é até 50% para queimaduras de 2º grau, sendo pequena a probabilidade de letalidade.

Em relação ao jato de fogo, o comprimento foi de 6,8 a 8,3 metros, com largura de 0,5 metro. Não houve diferença significativa entre o butano e o propano. O jato de fogo durou um máximo de 2 minutos e 30 segundos, somando-se todas as aberturas da válvula de alívio. A intensidade das chamas e o tempo de duração causam uma dose que pode causar a ignição de materiais de construção e de mobília, além do contato direto com as chamas devido ao longo comprimento, o que reduz significativamente o tempo para a ignição de outros objetos.

Outros pontos importantes encontrados nos testes é o fato de a garrafa fabricada em compósito ter o seu material tornado combustível e sendo consumido pelas chamas. A temperatura na superfície da garrafa compósita foi até 200°C acima da temperatura máxima alcançada nos testes com as garrafas metálicas e isso causou o maior incremento de pressão registado nos testes. Ressalta-se que as garrafas estavam imersas nas chamas. Contudo, sem prejuízo para a segurança, a válvula de segurança e o fusível presentes na garrafa compósita foram capazes de evitar a explosão. Portanto, a atenção deve estar no caso mais severo que foi

o teste em que ocorreu a explosão: garrafa metálica, sem válvula de segurança, contendo propano.

A rotura da garrafa sem válvula de segurança ocorreu muito abaixo da pressão de rotura dos testes hidrostáticos (testes sem chamas) e a menos de metade da pressão máxima alcançada durante o respetivo teste. A rotura ocorreu a apenas 18% da pressão de rotura dos testes sem chama (testes de rotura sob pressão hidrostática). Isso mostra que a exposição direta das garrafas ao fogo reduz consideravelmente a sua resistência mecânica. Verificou-se que no momento da rotura da garrafa, a sua superfície estava deformada devido à expansão do material.

## **Conclusão**

Sob as normas de construção e do que se espera dos dispositivos de segurança, eles foram capazes de minimizar os danos causados pela exposição direta das garrafas às chamas e evitar a explosão.

Os efeitos causados por garrafas sem dispositivo de alívio de pressão são severos, com longo alcance e podem causar mortes.

A exposição direta das garrafas ao fogo reduz consideravelmente a sua resistência.

## **Recomendações**

- 1) É comum ocorrerem focos secundários nas proximidades das casas durante os incêndios florestais, causados por partículas incandescentes transportadas pelo vento. Os focos podem ocorrer em móveis, telhados, jardins, próximos às janelas e outras superfícies que possam acumular as partículas incandescentes. Isso pode causar o aquecimento de garrafas de GPL levando a ocorrência de BLEVE, na ausência de válvula de segurança, ou o jato de fogo. Por isso, o local onde a garrafa é colocada deve ser cuidadosamente escolhido, distante de qualquer tipo de combustível como: vegetação, inclusive ornamental; madeira; e mobília;
- 2) Para habitações devem ser usadas garrafas com butano, inclusive essa é uma recomendação dos fornecedores de GPL;

- 3) Usar apenas garrafas que tenham o dispositivo de segurança (válvula de alívio de pressão). Isso pode ser facilmente visto no local o qual o redutor é acoplado. Garrafas com válvula de segurança possuem a zona de encaixe mais comprida com um selo de plástico na lateral, geralmente de cor preta ou vermelha;
- 4) As garrafas num incêndio deformam-se devido ao estresse térmico e alta pressão interna, isso é um sinal de que o material sofreu grande estresse e a resistência pode ter sido comprometida;
- 5) O fusível aberto da garrafa compósito pode ainda estar a liberar resíduos do gás durante a fase de arrefecimento, podendo inclusive gerar um flashfire;
- 6) Deve-se apenas armazenar 1 garrafa, inclusive não estocando garrafas consideradas vazias, pois ainda contém uma pequena quantidade de GPL. Mais de uma garrafa armazenada foram encontradas nos casos 2, 4, 7 e 12 da Tabela 1;
- 7) Limpar os combustíveis da vizinhança da habitação;
- 8) Na tese de doutoramento de Thiago Barbosa e nos outros textos sugeridos a seguir, foi proposta uma proteção para as garrafas. A proteção é feita com um tecido de fibra de vidro, tendo na superfície externa uma fina camada de alumínio. Esse dispositivo nos testes mostrou impedir que até 84% do calor chegue à garrafa;
- 9) Fazer a troca da mangueira que conduz o gás da garrafa ao fogão com fiel observância ao prazo de validade descrito na respetiva embalagem.

**Outros textos com caráter mais técnico feitos pela mesma equipa:**

- Artigo publicado pela equipa do CEIF na revista FIRE MDPI (DOI:10.3390/fire5030063). Disponível em <https://www.mdpi.com/2571-6255/5/3/63>;
- Artigo publicado pela equipa do CEIF no *International Journal of Wildland Fire*. (DOI: 10.1071/wf22084). Disponível em <https://www.publish.csiro.au/wf/WF22084>
- Duas secções de capítulo de livro (p.610-614 e 695-701), no livro *Advances in Forest Fire Research 2022* (10.14195/978-989-26-2298-9). Estes trabalhos também foram

apresentados na 9<sup>th</sup> *International Conference on Forest Fire Research*. Disponível em <http://books.uc.pt/book?book=1232>.

## Apêndice B: trabalhos publicados em artigos, conferências e mídia

B1: Artigo publicado na revista FIRE MDPI (doi:10.3390/fire5030063). Disponível em <https://www.mdpi.com/2571-6255/5/3/63>



Article

### A Protection for LPG Domestic Cylinders at Wildland-Urban Interface Fire

Thiago Fernandes Barbosa <sup>1,\*</sup>, Luís Reis <sup>2</sup>, Jorge Raposo <sup>2</sup> and Domingos Xavier Viegas <sup>2</sup>

<sup>1</sup> Department of Civil Engineering, University of Coimbra, ADAL, Rua Luís Reis Santos, Pólo II, 3030-788 Coimbra, Portugal

<sup>2</sup> Department of Mechanical Engineering, University of Coimbra, ADAL, Rua Luís Reis Santos, Pólo II, 3030-788 Coimbra, Portugal; luis.reis@dem.uc.pt (L.R.); jorge.raposo@dem.uc.pt (J.R.); xavier.viegas@dem.uc.pt (D.X.V.)

\* Correspondence: thiago.barbosa@adai.pt

B2: Artigo publicado no International Journal of Wildland Fire



SPECIAL ISSUE | RESEARCH PAPER  
<https://doi.org/10.1071/WF22084>

International Journal of  
**WILDLAND FIRE**

International Association  
of Wildland Fire

### LPG stored at the wildland–urban interface: recent events and the effects of jet fires and BLEVE

Thiago Fernandes Barbosa <sup>A,\*</sup>, Luís Reis <sup>B</sup>, Jorge Raposo <sup>B</sup>, Tiago Rodrigues <sup>B</sup> and Domingos Xavier Viegas <sup>B</sup>

B3: Duas secções de capítulo de livro (p.610-614 e 695-701), no livro *Advances in Forest Fire Research 2022* (10.14195/978-989-26-2298-9). Estes trabalhos também foram

apresentados na 9<sup>th</sup> *International Conference on Forest Fire Research*. Disponível em <http://books.uc.pt/book?book=1232>

*Advances in Forest Fire Research 2022 - D. X. Viegas & L.M. Ribeiro (Ed.)*  
Chapter 2 - Fire at the Wildland Urban Interface

### Mobile LPG cylinders at WUI fires: an alternative to avoid accidents

Thiago Barbosa<sup>\*1,2</sup>; Luís Reis<sup>2</sup>; Jorge Raposo<sup>2</sup>; Domingos Viegas<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Univ Coimbra, ADAI, Department of Civil Engineering, Rua Luis Reis Santos, Pólo II, 3030-788 Coimbra, Portugal. {thiago.barbosa@adai.pt}

<sup>2</sup>Univ Coimbra, ADAI, Department of Mechanical Engineering, Rua Luis Reis Santos, Pólo II, 3030-788 Coimbra, Portugal, {luis.reis, jorge.raposo, xavier.viegas}@dem.uc.pt

\*Corresponding author

*Advances in Forest Fire Research 2022 - D. X. Viegas & L.M. Ribeiro (Ed.)*  
Chapter 2 - Fire at the Wildland Urban Interface

### Gas cylinder accidents and incidents during Wildland Urban-Interface fires: an overview of the events

Thiago F. Barbosa<sup>\*1,2</sup>; Luís Reis<sup>2</sup>; Jorge Raposo<sup>2</sup>; Luís M. Ribeiro<sup>2</sup>; Domingos Viegas<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Univ Coimbra, ADAI, Department of Civil Engineering, Rua Luis Reis Santos, Pólo II, 3030-788 Coimbra, Portugal. {thiago.barbosa@adai.pt}

<sup>2</sup>Univ Coimbra, ADAI, Department of Mechanical Engineering, Rua Luis Reis Santos, Pólo II, 3030-788 Coimbra, Portugal, {luis.reis, jorge.raposo, xavier.viegas}@dem.uc.pt, {luis.mario@adai.pt}

\*Corresponding author

B4: Artigo para o site Intervir.pt – Matérias perigosas



Artigos ▾ Projetos ▾ Consciencialização ▾ Publicações Sobre ▾

07/10/2021 THIAGOFERB

A importância do armazenamento seguro de garrafas de GPL e o perigo em potencial na ocorrência de um Incêndio Florestal.

## B5: Mídia

Este trabalho também foi divulgado em outras mídias, conforme abaixo.

- Matérias na televisão  
TVI 24, Jornal 24 (14 de julho de 2021),entrevista
- Matérias na imprensa  
Universidade de Coimbra  
Beira News  
Agroportal  
Beiras  
Correio de Lagos  
Notícias ao minuto  
Observador  
Rádio Boa Nova  
Security Magazine  
Terras de Sicó  
Voz do Campo  
Açoriano Oriental  
Correio dos Açores  
Diáspora Lusa  
In News