

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA
CURSO DE ESPECIALIZAÇÃO EM ENGENHARIA DE SEGURANÇA DO TRABALHO

**ANÁLISE DE CONSEQUÊNCIAS DE UMA EXPLOSÃO TIPO BLEVE DE UM
CAMINHÃO AUTOTANQUE DE GLP TIPO “BOBTAIL”**

Por

Eduardo de Mello Schmitt

Orientador:
Leandro Ferreira

Co-orientador:
Roque Puiatti

Porto Alegre, julho de 2009.

**ANÁLISE DE CONSEQUÊNCIAS DE UMA EXPLOSÃO TIPO BLEVE DE UM
CAMINHÃO AUTOTANQUE DE GLP TIPO “BOBTAIL”**

Por

Eduardo de Mello Schmitt

Engenheiro Químico

Monografia submetida ao Corpo Docente do Curso de Especialização em Engenharia de Segurança do Trabalho, do Departamento de Engenharia Mecânica, da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos necessários para a obtenção do Título de

Especialista

Orientador: Prof. Msc. Leandro Ferreira

Co-orientador: Prof. Msc. Roque Puiatti

Prof. Dr. Sergio Viçosa Möller
Coordenador do Curso de Especialização em
Engenharia de Segurança do Trabalho

Porto Alegre, 31 de julho de 2009.

RESUMO

A “Análise de Consequências” é parte integrante da “Análise Riscos”, ou mais especificamente da “Análise Quantitativa de Riscos” (QRA – Quantitative Risk Assessment) ou “Análise Probabilística de Riscos” (PRA – Probabilistic Risk Assessment) e fazem parte do Gerenciamento de Riscos. Através dos seus modelos de “efeitos” e de “vulnerabilidade”, a análise de consequências dá subsídios ou dados de entrada para se determinar o risco de uma instalação ou processo.

Este trabalho buscou determinar as consequências geradas pela explosão de um caminhão autotank de GPL, mais conhecido como “BOBTAIL”, numa região residencial da cidade de Porto Alegre. A explosão considerada é conhecida internacionalmente pelo termo “BLEVE” (*Boiling Liquid Expanding Vapour Explosion*) e ocorre em vasos e tanques sob pressão que, ao receber uma carga térmica elevada ou impacto, sofrem ruptura e um desprendimento elevadíssimo de energia com consequências severas. A presença desses BOBTAIL vem se intensificando nos últimos tempos, pois o GPL a granel é mais econômico e a opção por gás central é unanimidade em regiões frias como é o nosso caso. As empresas distribuidoras de GLP viram também nos “pequenos” Bobtail uma opção mais econômica para efetuar as entregas de gás, uma vez que são mais leves e rápidos, atendendo perfeitamente a demanda de GLP a granel nas grandes cidades.

Neste cenário foram utilizados modelos de efeitos usuais e largamente utilizados na literatura de análise de riscos e implementados no programa da Microsoft Office Excel ®. Foram utilizadas também imagens de satélite da região analisada, utilizando-se como base o programa Google Earth®.

Com base nos resultados obtidos, podemos executar um planejamento adequado de combate a emergências deste tipo, de maneira a minimizar a exposição de pessoas e reduzir danos à comunidade.

Palavras-chave: Análise de Consequências. BLEVE. Emergência.

ABSTRACT

A LPG Bobtail truck BLEVE Analysis of Consequences

The "Analysis of Consequences" is part of the "Risk Analysis", or more specifically the Quantitative Risk Analysis (QRA) or Probabilistic Risk Assessment (PRA) and part of Risk Management. Through its model of "effects" and "vulnerability", the analysis of consequences of subsidies or input data to determine the risk of a plant or process.

This study aimed to determine the consequences generated by the explosion of a LPG truck autotank, known as "BOBTAIL" occurred in a residential area of Porto Alegre. The explosion is known internationally as the term "BLEVE" (Boiling Liquid Expanding Vapor Explosion) and occurs in pressure vessels and tankers that, upon receiving a heat load or high impact, suffering a fracture and detachment of huge energy with severe consequences. The presence of these BOBTAIL has been intensifying in recent times, because the LPG in bulk is more economical and choice of gas station is unanimity in cold regions as is our case. The utilities of LPG seen also in "small" BOBTAIL a more economical option to make deliveries of gas because they are lighter and faster, given the demand for LPG quite loose in the big cities.

In this scenario models were used to effect usual and widely used in the literature of risk analysis and implemented the program of Microsoft Office Excel ®. We also used satellite images of the region analyzed, using as basis the Google Earth ®.

Based on the results, we can run a proper planning to tackle such emergencies, so as to minimize the exposure of people and reduce damage to the community.

Word-keys: Analysis of Consequences; BLEVE; Emergency; Explosion.

ÍNDICE

	Pág.
1. Introdução	9
2. Análise de Consequências	11
2.1 Evento BLEVE	12
2.1.1 Descrição de um evento BLEVE	12
2.1.2 BLEVE quente	16
2.1.3 Efeitos gerados por um evento BLEVE	17
3. Estudo de caso – Incidente com um caminhão autotanque <i>BOBTAIL</i>	21
3.1 Objetivo deste estudo de caso	21
3.2 Caminhão Autotanque tipo <i>BOBTAIL</i>	21
3.3 Descrição do Incidente	22
3.4 Local escolhido para a avaliação	22
3.5 Cálculos dos Efeitos Gerados	23
3.5.1 Cálculos dos níveis de sobrepressão	23
3.5.2 Cálculos dos níveis de fluxo térmico radiativo	34
4. Resultados Obtidos	37
4.1 Resultados dos cálculos para níveis de sobrepressão e fluxo térmico radiativo	37
4.2 Vazão de água para resfriamento do autotanque e tempo para ocorrência do BLEVE.....	44
5. Conclusões	45
6. Referências Bibliográficas	47
ANEXO 1	48
ANEXO 2	58

LISTA DE SÍMBOLOS

a_0	Velocidade do som no ar	$[m.s^{-1}]$
D_c	Diâmetro final da bola de fogo	$[m]$
E	Potência emissiva na superfície da chama	$[kW/m^2]$
e_{ex}	Trabalho específico feito por um fluido em expansão	$[J.kg^{-1}]$
E_{ex}	Energia de expansão	$[kJ]$
F	Fator de vista	$[-]$
h	Entalpia específica	$[J.kg^{-1}]$
i_s	Impulso	$[kPa.s^{-1}]$
I_s	Impulso adimensional	$[-]$
L	Distância entre o ponto cujo o fluxo térmico se deseja calcular	$[m]$
m	Massa de combustível na bola de fogo	$[kg]$
p_1	Pressão interna do tanque no momento da ruptura	$[Pa]$
p_0	Pressão atmosférica	$[Pa]$
p_s	Pico de sobrepressão	$[kPa]$
P_s	Sobrepressão adimensional	$[-]$
q	Fluxo térmico radiativo recebida pelo receptor	$[W.m^{-2}]$
r	Distância do ponto onde se deseja calcular a sobrepressão	$[m]$
R	Distância Reduzida	$[-]$
t_c	Tempo de duração da bola de fogo	$[s]$
u	Energia interna específica	$[J.kg^{-1}]$
v	Volume específico	$[m^3.kg^{-1}]$
X	Distância horizontal do objeto até o centro da bola de fogo	$[m]$
z_c	Altura da bola de fogo até o centro	$[m]$
τ_a	Transmissividade atmosférica	$[-]$

ÍNDICE DE FIGURAS

	Pág.
Figura 2.1 - Modelos de efeitos e vulnerabilidade	11
Figura 2.2 - Formação da Bola de Fogo em um BLEVE	15
Figura 2.3 - PEMEX antes do incidente de 18 de novembro de 1984	15
Figura 2.4 - PEMEX após o incidente de 18 de novembro de 1984	16
Figura 2.5 - Evento BLEVE numa esfera de gás liquefeito	17
Figura 3.1 - Caminhão Autotanque BOBTAIL	21
Figura 3.2 - Local escolhido para a avaliação do BLEVE QUENTE de um BOBTAIL	23
Figura 3.3 - Cálculo da energia de “ <i>flasheamento</i> ” de líquidos em ruptura de vasos com vapor ou gases reais.....	24
Figura 3.4 - Trabalho de expansão por unidade de massa	26
Figura 3.5 - P_s versus R	31
Figura 3.6 - I versus R	32
Figura 3.7 - I versus R	33
Figura 3.8 - Representação das distâncias ao receptor de uma bola de fogo	36
Figura 4.1 - (1) Zonas de vulnerabilidade devido à sobrepressão gerada no BLEVE do BOBTAIL.....	40
Figura 4.2 - (2) Zonas de vulnerabilidade devido à sobrepressão gerada no BLEVE do BOBTAIL.....	41
Figura 4.3 - (1) Zonas de vulnerabilidade devido ao fluxo térmico radiativo gerado no BLEVE do BOBTAIL.....	42
Figura 4.4 - (2) Zonas de vulnerabilidade devido ao fluxo térmico radiativo gerado no BLEVE do BOBTAIL.....	43

ÍNDICE DE TABELAS

	Pág.
Tabela 2.1 - Consequências da radiação térmica e sobrepressão de um BLEVE de um tanque de propano (caminhão tanque ou vagão).....	14
Tabela 2.2 – Dados de danos a pessoas e estruturas.....	19
Tabela 2.3 – Relação entre fluxo térmico e seu efeito em pessoas e equipamentos	20
Tabela 3.1 – Trabalho de expansão de NH ₃ , CO ₂ , N ₂ e O ₂	26
Tabela 3.2 – Fatores de multiplicação para <i>Ps</i> e <i>I</i> para vasos cilíndricos de vários R	34
Tabela 3.3 - Fatores de multiplicação para <i>Ps</i> e <i>I</i> para vasos esféricos	34
Tabela 4.1 – Distâncias calculadas para a sobrepressão e as consequências esperadas	37
Tabela 4.2 – Distâncias calculadas para o fluxo térmico e as consequências esperadas	38

1. INTRODUÇÃO

Esta monografia foi elaborada para satisfazer os requisitos necessários para obtenção do título de Especialista em Engenharia de Segurança do Trabalho, na Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

A “Análise de Consequências” é parte integrante da “Análise Riscos”, ou mais especificamente da “Análise Quantitativa de Riscos” (QRA – Quantitative Risk Assessment) ou “Análise Probabilística de Riscos” (PRA – Probabilistic Risk Assessment) e fazem parte do Gerenciamento de Riscos. Através dos seus modelos de “efeitos” e de “vulnerabilidade”, a análise de consequências dá subsídios ou dados de entrada para se determinar o risco de uma instalação ou processo. Também podem ser obtidos dados que, a partir de parâmetros previamente determinados, fornecem distâncias seguras e tempos máximos de evacuação, muito úteis nas esferas da Defesa Civil e empresas com alto grau de risco, onde podemos ter vazamentos de produtos perigosos, incêndios e explosões com graves consequências. A minimização da frequência na ocorrência de incidentes, bem como a minimização dos feitos e consequências geradas, são os principais objetivos do gerenciamento de riscos.

Com o perceptível aumento da industrialização no mundo, verificamos também um grande aumento no número de incidentes de “grandes proporções”, tais como os de Cidade do México, Bhopal, Vila Socol (Brasil), Flixborough, Seveso, e outros mais atuais como o acontecido na região de Viareggio - no Norte da Itália, no final do mês de julho de 2009, onde um descarrilamento de vagões transportando GLP causou grande liberação de gás inflamável e explodiu na forma de “nuvem de vapor” (VCE – Vapour Cloud Explosion), matando pelo menos 18 pessoas e ferindo pelo menos 20.

Este trabalho irá determinar as consequências geradas pela explosão de um caminhão autotanque de GPL, mais conhecido como “Bobtail”, numa região residencial da cidade de Porto Alegre. A presença desses Bobtail vem se intensificando nos últimos tempos, pois o GPL a granel é mais econômico e a opção por gás central é unanimidade em regiões frias como é o nosso caso. As empresas distribuidoras de GLP viram também nos “pequenos” Bobtail uma opção mais econômica para efetuar as entregas de gás, uma vez que são mais leves e rápidos, atendendo perfeitamente a

demanda de GLP a granel nas grandes cidades. Portanto, as entregas de GLP a granel estão gradativamente tomando lugar à entrega de botijões para condomínios e estabelecimentos comerciais como padarias e restaurantes.

A explosão considerada é conhecida internacionalmente pelo termo “BLEVE” (*Boiling Liquid Expanding Vapour Explosion*) e ocorre em vasos e tanque sob pressão que, ao receber uma carga térmica elevada ou impacto, sofrem ruptura e um desprendimento elevadíssimo de energia com consequências severas. Este “BLEVE” que iremos estudar trata-se de um “BLEVE” quente, ou seja, é a explosão do autotanque de GLP causada por superaquecimento devido ao “engolfamento” de jato de fogo originado na tubulação de GLP na região inferior do autotanque e na sua válvula de segurança.

Neste cenário serão utilizados modelos de efeitos usuais e largamente utilizados na literatura de análise de riscos e implementados no programa da Microsoft Office Excel®. Foram utilizadas também imagens de satélite da região analisada, utilizando-se como base o programa Google Earth®.

No Capítulo 2 é apresentado a análise de consequências e a inserção do evento BLEVE dentro deste contexto, trazendo uma explicação sintetizada deste evento, apresentando históricos e os efeitos gerados. No Capítulo 3 são mostrados os modelos e métodos de cálculo utilizados para a determinação dos efeitos gerados. No Capítulo 4 são apresentados os resultados obtidos para o estudo de caso, a partir dos modelos e métodos matemáticos mostrados no capítulo anterior. Finalizando, no Capítulo 5 estão as conclusões e discussões com base nos resultados mostrados no Capítulo 4.

2 ANÁLISE DE CONSEQUÊNCIAS

Um aspecto importante da análise de riscos após a identificação dos perigos é a **análise de consequências**. Perigos e problemas operacionais levam à liberação de energia e substâncias perigosas. O conhecimento de “qual a magnitude?” que pode ter um evento perigoso ou “qual o impacto?” ele poderá trazer faz parte do escopo da análise de consequências, que aplica modelos matemáticos para prever uma gama de efeitos físicos que tenham potenciais impactos a receptores vulneráveis.

Dentro da análise de consequências, serão adotados modelos de **efeitos** e de **vulnerabilidade**.

O primeiro aspecto (*efeitos*) irá estimar a magnitude dos efeitos físicos gerados. Os modelos de *efeitos* quantificam em termos das seguintes medidas: concentrações de gases tóxicos, níveis de radiação de incêndios ou sobrepressões de explosões.

O segundo irá estimar os danos causados por estes efeitos aos receptores que estamos considerando. A regra dos modelos de vulnerabilidade é trazer a magnitude do fenômeno e estimar os danos a pessoas, estruturas e meio-ambiente. Um conceito geral de análises de consequências é mostrado na Figura 2.1 a seguir, a qual mostra que os incidentes são utilizados para obter uma quantificação dos danos.

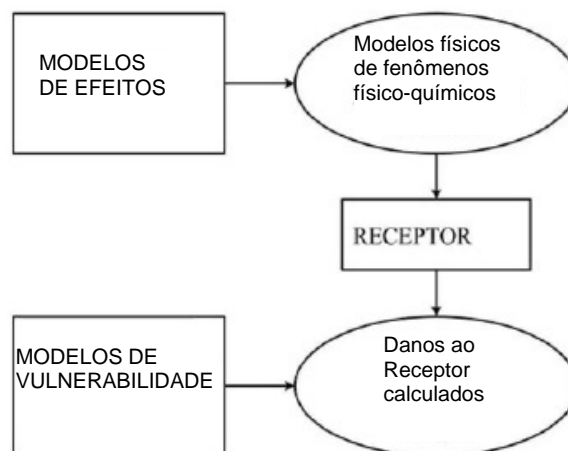


Figura 2.1 Modelos de efeitos e vulnerabilidade (Cameron e Raman, 2005)

Uma análise de consequências pode proporcionar:

- Informações para a indústria sobre os efeitos de eventos;
- Detalhes para projetistas como o porquê que as consequências ocorrem e como podem ser minimizadas no projeto;
- Detalhes para as autoridades competentes em possíveis efeitos de eventos e então tomar apropriadas decisões de planejamento.

Os eventos mais relevantes para o estudo quantitativo da análise de consequência são os seguintes:

- Incêndio em poça ou piscina
- Incêndio em nuvem
- Jatos de fogo
- BLEVES (*Boiling Liquid Expanding Vapour Explosion*)

Iremos nos deter na análise de consequências do evento BLEVE, o qual origina o escopo deste trabalho. No item 2.1, a seguir, faremos uma breve explanação de o que um BLEVE, como se origina e quais são os efeitos esperados.

2.1 Evento BLEVE

2.1.1 Descrição de um evento BLEVE

BLEVE é a sigla originalmente na língua inglesa de “*Boiling Liquid Expanding Vapour Explosion*”, em português por “Explosão por Expansão de Vapor de Líquido Fervente” e pode ocorrer depois de uma ruptura instantânea de um tanque (ou vaso) contendo um líquido sob pressão. Esta ruptura pode ser originada devido ao impacto de uma colisão ou defeitos estruturais do tanque (BLEVE FRIO) ou devido à exposição do tanque ao fogo externo, o qual irá gerar fragilização do tanque e sobrepressão por aquecimento (BLEVE QUENTE). Não necessariamente o líquido precisa ser inflamável - apesar de ser mais frequente, tanto que primeiramente o termo BLEVE foi aplicado a explosões com vapor d’água (CCPS, 2003).

A sequência de eventos em um BLEVE é a seguinte:

- Ruptura de um tanque resultando em alívio praticamente instantâneo (na ordem de menos de 0,1 segundo) do conteúdo do tanque.
- Evaporação instantânea do líquido / gás liquefeito aliviado causando uma forte onda de choque (explosão física) e arremesso de fragmentos do tanque ao redor do mesmo (até 500 metros do local da explosão).
- Formação de uma grande “bola de fogo” (fireball) após a ignição da nuvem de vapor formada.

O BLEVE QUENTE é mais frequente em geral e, além disso, tem consequências maiores se comparado com o BLEVE FRIO, conforme pode ser visto na Tabela 2.1.1 mostrada a seguir. Em caminhões tanque de GLP, o estudo feito pela TNO (2005) mostra que BLEVEs quentes e frios ocorrem em igual proporção na Europa e América do Norte.

Tabela 2.1 – Consequências da radiação térmica e sobrepressão de um BLEVE de um tanque de propano (caminhão tanque ou vagão) (TNO, 2005)

Consequências de um BLEVE	Máxima distância para a consequência em metros			
	Caminhão tanque de 60 m ³		Vagão tanque de 110 m ³	
	BLEVE FRIO	BLEVE QUENTE	BLEVE FRIO	BLEVE QUENTE
Colapso de Prédios	35	50	40	55
Danos severos a Prédios	50	70	60	85
100% de Fatalidades	90	150	110	190
Ignição de Prédios	200	270	250	350
1% de Fatalidades	220	310	310	410
Queimaduras de 1º Grau e vidros quebrados	400	500	500	700

Devido às maiores consequências do evento BLEVE QUENTE, iremos concentrar este estudo aplicando seus conceitos e modelagens a seguir.

A Figura 2.2 abaixo mostra o momento da ocorrência da Bola de Fogo em um BLEVE. Já as Figuras 2.3 e 2.4 mostram o “Antes e o Depois” da ocorrência de vários BLEVE’s no conhecido incidente da PEMEX, Terminal de San Juan de Ixhuatepec, na Cidade do México, em 18 de Novembro de 1984. Neste incidente houve um BLEVE em 15 minutos após o incêndio iniciado e uma sequência de BLEVE’s atingindo o parque de cilindros (48 cilindros), resultando em aproximadamente 650 fatalidades e mais de 6400 feridos (CCPS, 2003).



Figura 2.2 – Formação da Bola de Fogo em um BLEVE

(Fonte: Apresentação Prof. Cezar Leal, 2006).



Figura 2.3 – PEMEX antes do incidente de 18 de novembro de 1984.(CCPS, 2003).



Figura 2.4 – PEMEX após o incidente de 18 de novembro de 1984. (Fonte: CCPS, 2003).

2.1.2 BLEVE QUENTE

Quando um tanque contendo um líquido sob pressão é exposto ao fogo, o líquido aquece e a sua pressão de vapor sobe, aumentando a pressão no tanque. Quando esta pressão alcança a pressão de ajuste da válvula de segurança do tanque, a válvula abre. O nível de líquido no tanque cai à medida que o vapor é descarregado para a atmosfera. O líquido é bom condutor de calor e ainda possui o calor latente de vaporização, que ajuda a retardar o aquecimento das paredes do tanque quando da incidência do fogo externo, já o vapor não. Decorrido o tempo, cada vez uma área menor do tanque está “protegida” pelo líquido e uma área menos está em contato com o vapor. Esta área em contato com o vapor, ao receber o fogo externo, tem a temperatura aumentada até o ponto do metal fragilizar e romper. Isto ocorre mesmo que a válvula de segurança esteja operando corretamente. A válvula de segurança é projetada e tem sua pressão ajustada para as condições de projeto do tanque, que prevê operar com temperaturas bem mais amenas do que no caso de um engolfamento por fogo externo.

Ao ser descarregado pela válvula de segurança, o gás provavelmente irá incendiar devido ao calor e as chamas do fogo externo e irá gerar o chamado “Jato de Fogo” (*Jet Fire*). Num incêndio de um tanque de GLP, por exemplo, é importante que a brigada de incêndio atuante não tente apagar o “Jato de Fogo” e se concentre em resfriar o tanque e combater a fonte do fogo externo, mesmo por que é muito improvável que conseguirá apagar o “Jato de Fogo”, pois é aliviado a uma pressão muito maior do que os sistemas de combate – a pressão do tanque no momento do incêndio. O Jato de Fogo será mais uma fonte de radiação térmica que incidirá nas paredes externas do tanque, em especial aquela área somente haverá vapor e maior facilidade de superaquecimento do metal. Por isso que o combate do fogo externo e o resfriamento das áreas superiores dos tanques é fundamental para evitar a ocorrência do BLEVE.

2.1.3 Efeitos gerados por um evento BLEVE

Um BLEVE de um tanque contendo um líquido inflamável gera os seguintes efeitos:

- Impulso e Sobrepressão (onda de pressão ou choque)
- Projeção de fragmentos (mísseis)
- Bola de Fogo (radiação)

A Figura 2.5 a seguir ilustra os eventos constituintes de um BLEVE em uma esfera de gás liquefeito.

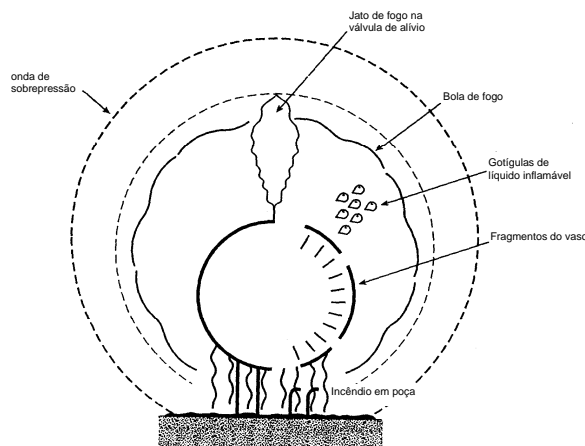


Figure 17.81 A BLEVE event

Figura 2.5 – Evento BLEVE numa esfera de gás liquefeito (Lees, 1996).

2.1.3.1 Efeitos do impulso e da sobrepressão em pessoas e edificações

São evidentes os efeitos de explosões sobre pessoas, equipamentos e edificações. Falando em pessoas, estudos com animais mostraram que a “sobrepressão” é relevante quando a onda de choque da explosão tem uma “longa duração”, enquanto que o “impulso” é relevante quando a onda de choque tem durações mais curtas.

Os *efeitos primários ou diretos* para seres humanos que ocorrem a partir de uma explosão são devido ao aumento súbito na pressão que ocorre quando passa a onda de choque. Ela pode causar danos a órgãos humanos sensíveis à pressão, como ouvidos (tímpano) e pulmões (Cameron e Raman, 2005).

Os *efeitos indiretos* de uma explosão podem ser devido à projeção de fragmentos do tanque ou vaso que explodiu (fragmentos primários), que em geral possuem uma alta velocidade sendo arremessados como mísseis. Os fragmentos secundários são originados de partes das estruturas removidas pela onda de choque tais como vidros, tijolos, telhas, etc, e desenvolvem velocidades menores quando comparados com os fragmentos primários. O colapso de prédios pode ser chamado de *efeito secundário*. O deslocamento de ar de uma explosão pode arremessar pessoas a grandes distâncias, causando ferimentos devido à queda e colisão com obstáculos. Este efeito é referido como um *efeito terciário* (Cameron e Raman, 2005).

A Tabela 2.2 abaixo mostra alguns dados de danos a pessoas e estruturas.

Tabela 2.2 – Dados de danos a pessoas e estruturas (Cameron e Raman,2005)

<i>PICO DE SOBREPRESSÃO (kPa)</i>	<i>IMPACTO</i>
0,14	Ruido incômodo (137 dB)
0,21	Quebra de grandes janelas de vidro tensionadas
0,28	Ruido alto (143 dB), "boom" sônico, quebra de vidros
1,00	Limite mínimo para quebra de vidros
2,00	Distância "segura" (menos de 5 % de probabilidade de danos sérios abaixo deste valor). 10% de vidros quebrados.
4,00	90% de vidros quebrados. Danos á revestimentos. Dano estrutural pequeno.
7,00	Pedaços de vidros projetados com velocidade com capacidade de causar ferimentos. Telhas removidas.
14,00	Casas inabitáveis, porém não totalmente irreparáveis. Construções em bloco de cimento achatadas.
21,00	Distorção em estruturas reforçadas. 20% de probabilidade de fatalidades no interior dos prédios
35,00	Sérios danos estruturais. Demolição de prédios. Tanques grandes de armazenamento podem romper. 15% de fatalidade fora de prédios. 50% de fatalidades no interior de prédios.
70,00	Provável demolição total de todas as estruturas. 99% de probabilidade de fatalidades.

2.1.3.2 Efeitos do fluxo térmico e seu efeito em pessoas, estruturas e equipamentos

O fluxo térmico devido à radiação gerada por uma explosão a pessoas e estruturas causa uma gama de danos à pessoas, estruturas e equipamentos. A Tabela 2.3 abaixo mostra uma relação entre fluxo térmico e seu efeito em pessoas.

Tabela 2.3 – Relação entre fluxo térmico e seu efeito em pessoas (Cameron e Raman, 2005)

<i>FLUXO TÉRMICO</i> <i>(kW/m²)</i>	<i>IMPACTO</i>
1,2	Exposição ao sol no verão ao meio-dia
1,6	Mínimo para sentir dor na pele
4,7	Dor entre 15 e 20 segundos, queimaduras de 2º grau após 30 segundos
12,6	30% de fatalidade por exposição contínua, nível mínimo para derreter tubos de plástico
23	100% de fatalidade por exposição contínua, 10% de fatalidade por exposição instantânea
35	25% de fatalidade por exposição instantânea, danos à equipamentos de processo
60	~100% de fatalidade por exposição instantânea

3 ESTUDO DE CASO – INCIDENTE COM UM CAMINHÃO AUTOTANQUE *BOBTAIL*

3.1 Objetivo deste Estudo de Caso

Este estudo de caso tem como objetivo analisar as consequências e a vulnerabilidade caso houvesse um incidente envolvendo um caminhão autotanque tipo *BOBTAIL* de GLP no bairro Menino Deus em Porto Alegre, com engolfamento do tanque em fogo externo.

Serão calculados os efeitos de níveis de sobrepressão e fluxo térmico radiativo, bem como será feita uma análise de vulnerabilidade sobre estes efeitos calculados.

3.2 Caminhão Autotanque tipo *BOBTAIL*

A Figura 3.1 a seguir, mostra um caminhão autotanque do tipo *BOBTAIL*, escopo deste trabalho.



Figura 3.1 – Caminhão Autotanque *BOBTAIL*. (Fonte: Apresentação Prof. Cezar Leal, 2006).

3.3 Descrição do Incidente

O incidente escolhido para ser avaliado compreende o cenário com as seguintes etapas, em ordem de tempo:

- 1) **Vazamento de GLP** pela tubulação situada na parte inferior do autotanque, direcionada para cima (para o tanque).
- 2) **Ignição da nuvem de GLP gerada** segundos após início do vazamento ocasionando um provável “Incêndio em Nuvem” (*Flash Fire*) e um “Jato Fogo” direcionado para o casco inferior do tanque. As consequências do “Incêndio em Nuvem” não serão avaliadas neste trabalho.
- 3) **Atuação da válvula de segurança** devido à sobrepressão causada pelo fogo externo incidente no tanque, iniciando o alívio de GLP, seguida de ignição instantânea na descarga desta válvula gerando um novo “Jato de Fogo”.
- 4) **Superaquecimento** nas áreas “desprotegidas” (fase vapor) nas paredes do tanque devido ao fogo externo levando à fragilização do metal.
- 5) **Ruptura catastrófica do tanque. BLEVE:** Formação da Bola de Fogo, geração intensa de calor, sobrepressão (onda de choque) e lançamento de fragmentos (mísseis).

3.4 Local Escolhido para a Avaliação

O exato local escolhido para avaliação é a Rua Miguel Couto esquina com a Rua Dona Augusta, nas proximidades do número 500, sendo que o mesmo está situado no Bairro Menino Deus, no município de Porto Alegre, capital do Rio Grande do Sul, em área predominantemente residencial. Nesta área estão localizados casas e condomínios residenciais. A Figura 3.2 a seguir mostra uma imagem de satélite do local escolhido. Nesta esquina é feito carregamento de GLP granel para o prédio marcado nesta figura.

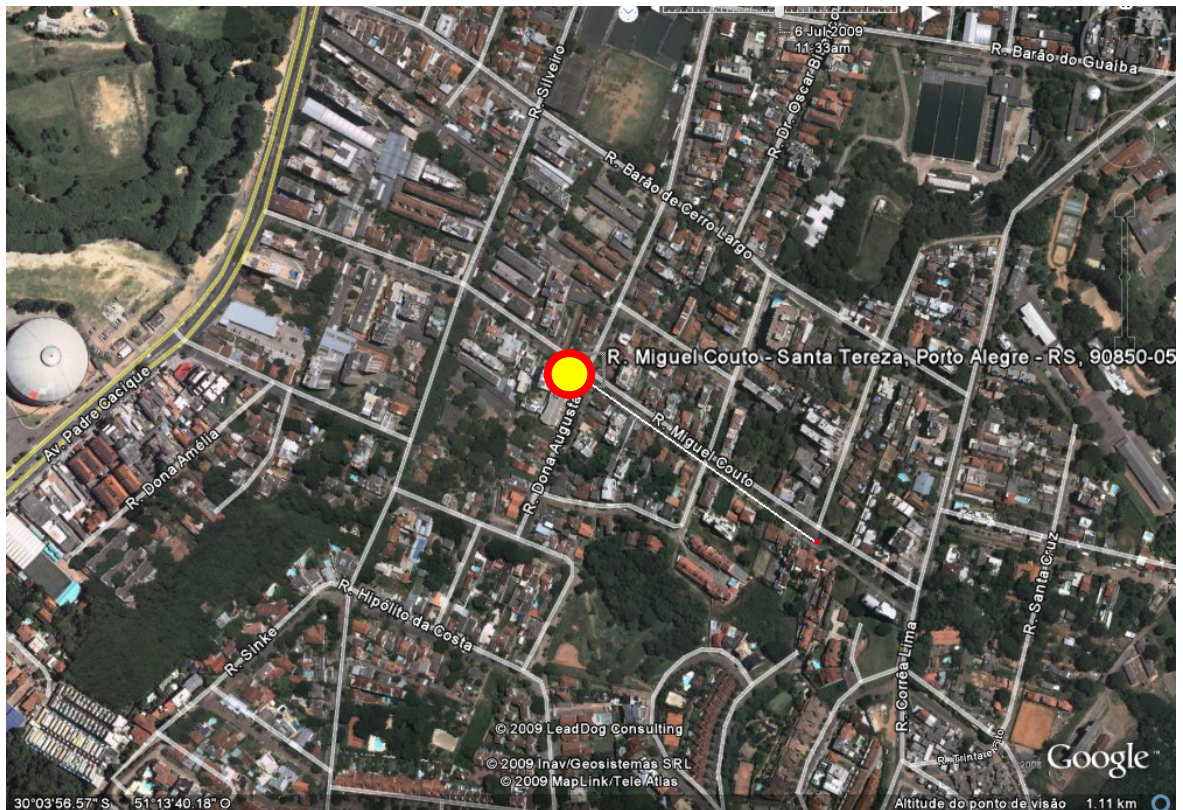


Figura 3.2 – Local escolhido para a avaliação do BLEVE QUENTE de um BOBTAIL

3.5 Cálculos dos Efeitos Gerados

Conforme o item 2.1.3 os efeitos gerados por um Evento BLEVE são: a) Sobrepressão b) Projeção de Fragmentos e; c) Radiação Térmica. Estes efeitos, aplicados ao estudo de caso deste trabalho, serão determinados a partir de métodos de cálculos bem consolidados e extensamente utilizados na literatura de Análise de Riscos (Roberts, 2000).

3.5.1 Cálculo dos níveis de sobrepressão

A metodologia utilizada para calcular os níveis de sobrepressão gerados por um Evento BLEVE aplicado ao estudo de caso está apresentada em CCPS, 1994, e consiste seguir sete passos básicos, conforme a Figura 3.3 abaixo:

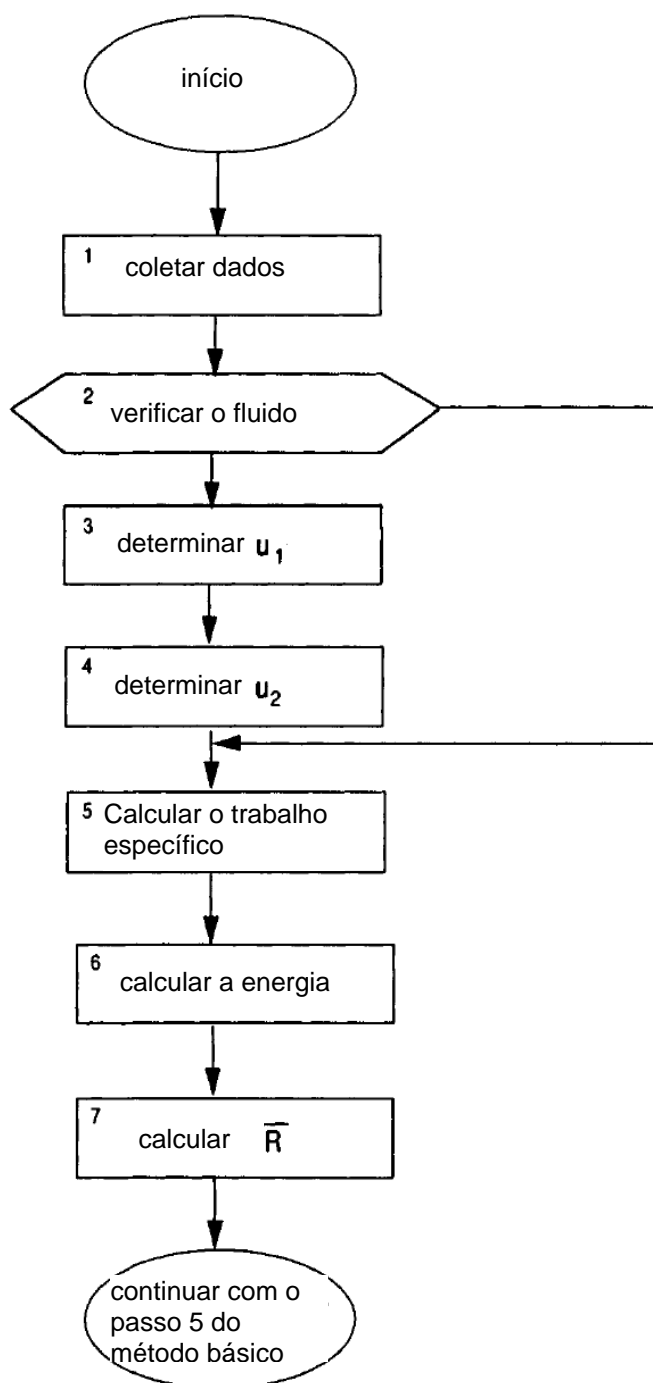


Figura 3.3 – Cálculo da energia de “*flasheamento*” de líquidos em ruptura de vasos com vapor ou gases reais (CCPS, 1994).

A metodologia utilizada também é chamada de “*Method for Explosively Flashing Liquids and Pressure Vessel Bursts with Vapor or Nonideal Gas*” (Método para flasheamento explosivo de líquidos em ruptura de vasos com vapor ou gases reais). Os sete passos para o cálculo são descritas abaixo:

- **1º Coletar as seguintes informações:**

- a) Pressão interna p_I (absoluta) no momento da ruptura. (Um BLEVE típico causado por fogo externo aquece o vaso reduzindo a resistência das paredes). A válvula de segurança é projetada para atingir uma pressão máxima de 1,21 vezes a pressão de abertura ajustada (no máximo a PMTA - Pressão Máxima de Trabalho Admissível - do vaso).
- b) Pressão atmosférica (absoluta)
- c) Quantidade de fluido (volume V_1 ou massa)
- d) Distância do centro do vaso (centro da explosão) até o ponto a ser calculada a sobrepressão (distância da isopleta)
- e) Formato do vaso: esférico ou cilíndrico
- f) Se o fluido não se encontra na Tabela 3.1 ou na Figura 3.4, deve ser determinado (não é o nosso caso no presente estudo):
 - Entalpia específica h
 - Entropia específica s
 - Volume específico v

- **2º Determinar se o fluido se encontra na Tabela 3.1 ou na Figura 3.4**

Ou seja, é um dos fluidos:

- amônia
- dióxido de carbono
- etano
- isobutano
- nitrogênio
- oxigênio
- propano

Se o fluido é um destes, “pular” para o 5º Passo

Tabela 3.1 – Trabalho de expansão de NH₃, CO₂, N₂, O₂ (CCPS, 1994)

Fluido	T_1 (K)	P_1 (10 ⁵ Pa)	Vapor			
			e_{ex} (kJ/kg)	e_{ex}/V_f (MJ/m ³)	e_{ex} (kJ/kg)	e_{ex}/V_f (MJ/m ³)
Amônia, $T_{sl} = 361.0$ K						
	324.8	21.2	82.5	46.2	297.0	4.89
	360.0	48.0	152.5	74.7	365.0	14.80
	400.0	102.8	278.5	95.7	344.0	47.00
Dióxido de carbono, $T_{sl} = 270.8$ K						
	244.3	14.8	54.4	58.2	98.0	3.77
	255.4	21.1	60.9	62.1	109.0	6.00
	266.5	29.1	68.1	65.6	117.0	9.17
Nitrogênio, $T_{sl} = 112.3$ K						
	104.0	10.0	13.2	8.78	41.9	1.75
	110.0	14.5	18.2	11.3	47.7	2.98
	120.0	24.8	28.6	15.0	53.5	6.66
Oxigênio, $T_{sl} = 137.7$ K						
	120.0	10.1	12.8	12.5	43.9	1.73
	130.0	17.3	18.7	16.8	53.4	3.65
	140.0	27.5	27.2	22.1	60.0	7.00

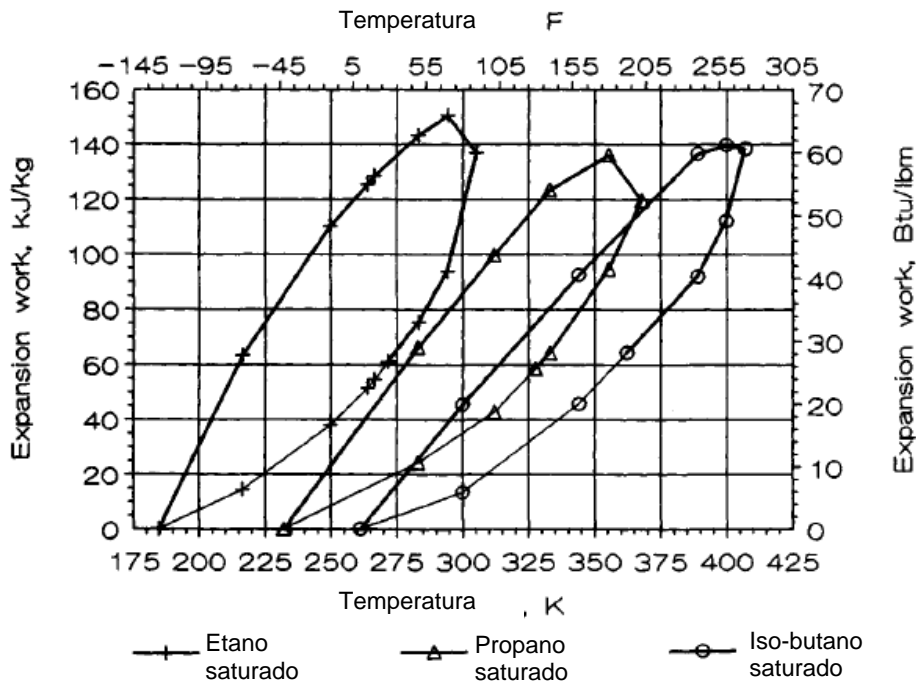


Figura 3.4 – Trabalho de expansão por unidade de massa (CCPS, 1994).

- **3º Passo – Determinar a energia interna no estado inicial, u_1**

O trabalho feito por um fluido em expansão é definido como a diferença na energia interna entre os estados inicial e final do fluido. A maioria das tabelas e gráficos termodinâmicas apresentam h , p , v , T (*temperatura absoluta*) e s , mas não u_1 . Então, u deve ser calculado com a seguinte equação:

$$h = u + pv \quad (1)$$

onde:

$h =$ entalpia específica (J/kg)

$u =$ energia interna específica (J/kg)

$p =$ pressão absoluta (Pa)

$v =$ volume específico (m^3/kg)

As propriedades termodinâmicas de mistura geralmente não estão dispostas em tabelas e gráficos. Uma estimativa interessante é somar as energias internas de cada componente. No nosso estudo de caso estaremos trabalhando com GLP, que é uma mistura entre propano e butano. Conservativamente para análise de riscos será adotado apenas o componente propano para a realização dos cálculos.

- **4º Passo – Determinar a energia interna no estado final, u_2**

A energia interna do fluido no estado final u_2 (expandido) pode ser determinado assumindo-se uma expansão isentrópica (a entropia é constante) até a pressão atmosférica p_0 . Para calcular a energia interna no estado final u_2 utilizamos a seguinte equação:

$$u_2 = (1 - X) h_f + X h_g - (1 - X) p_0 v_f - X p_0 v_g \quad (2)$$

onde:

$$X = \text{razão de vapor } (s_l - s_f)/(s_g - s_f)$$

$$s = \text{entropia específica} \quad (\text{J/kg})$$

Os índices 1 e 2 se referem aos estados inicial e final, respectivamente. Os índices *l* e *g* se referem aos estados de líquido saturado e vapor saturado, respectivamente, na pressão atmosférica.

• **5º Passo – Calcular o trabalho específico, e_{ex}**

O trabalho específico feito por um fluido em expansão é definido por:

$$e_{ex} = u_1 - u_2 \quad (3)$$

Onde e_{ex} é dado em J/kg. O trabalho específico pode ser determinado pela Figura 3.2. A temperatura do fluido no momento da ruptura do vaso deve ser conhecida e pode ser determinada pelas tabelas de propriedades termodinâmicas entrando com a pressão interna p_l . Na Figura 3.2, a parte inferior da curva representa o líquido saturado e a parte superior o vapor saturado

• **6º Passo – Calcular a energia de expansão, E_{ex}**

Para calcular a energia de expansão deve-se multiplicar o trabalho específico de expansão pela massa do fluido do vaso. A multiplicação por 2 resulta de levarmos em conta a reflexão da onda de choque no solo, ou seja:

$$E_{ex} = 2 e_x m_l \quad (4)$$

onde m_l é a massa do fluido “aliviado”. No caso de multicomponente, repetir os passos 3 a 6 para cada componente e somar as energias para encontrar a energia total E_{ex} em kJ.

• **7º Passo – Calcular, utilizando a equação (4), a Distância Reduzida R para a distância do ponto avaliado (ou isopleta)**

Utilizando a equação:

$$R = r (p_o / E_{ex})^{1/3} \quad (5)$$

onde r é a distância em metros do ponto onde se deseja calcular a sobrepressão (ou isopletas).

- **8º Passo – Determinar P_s**

Para determinar a pressão adimensional P_s , deve-se fazer a leitura da Figura 3.3 abaixo para o R calculado no passo anterior.

- **9º Passo – Determinar I**

Para determinar o Impulso adimensional I , lemos nas Figuras 3.4 ou 3.5 abaixo para o R calculado, utilizando a curva “*vessel burst*”. Para valores de R entre 0,1 e 1,0 a utilização da Figura 3.5 é mais conveniente.

- **10º Passo – Ajustar P_s e I para os efeitos de geometria do vaso**

Os procedimentos anteriores fornecem parâmetros de sobrepressão aplicáveis a uma onda de sobrepressão completamente simétrica, que resulta da explosão de um vaso hemisférico localizado diretamente no solo. Na prática (e no nosso caso estudado para o Bobtail), vasos podem ser ainda esféricos ou cilíndricos e instalados numa altura acima do solo, e isto influencia na determinação dos parâmetros de sobrepressão. Para ajustar estes parâmetros utilizamos alguns fatores de ajuste derivados de experimentos com cargas altamente explosivas e várias geometrias.

As Tabelas 3.1 e 3.2 nos fornecem fatores de multiplicação de P_s e I para vasos cilíndricos e esféricos.

- **11º Passo – Calcular p_s , i_s**

Utilizar a seguinte equação para calcular o pico de sobrepressão de $p_s - p_o$ e o impulso i_s gerado a partir da sobrepressão adimensional P_s e do impulso adimensional I :

$$p_s - p_o = P_s p_o \quad (6)$$

$$i_s = (I p_o^{2/3} E_{ex}^{1/3}) / a_o \quad (7)$$

onde a_o é a velocidade do som no ar ambiente em m/s. Para condições ao nível do mar p_o é aproximadamente 101,3 kPa e a_o é 340 m/s.

- **12º Passo – Verificar p_s**

Este método tem uma acuracidade limitada. Em distâncias muito próximas do vaso, em alguns casos a pressão encontrada é maior do que p_I . Portanto ao verificar p_s utilizar p_I como a sobrepressão de pico máxima alcançável na explosão do vaso.

É bom lembrar que não serão considerados os efeitos de perda de carga devido à acidentes no terreno onde se dissipará a onda de choque. Prédios, árvores, muros e elevações são exemplos destes acidentes. Não considerar estes efeitos além de facilitar os cálculos é conservativo.

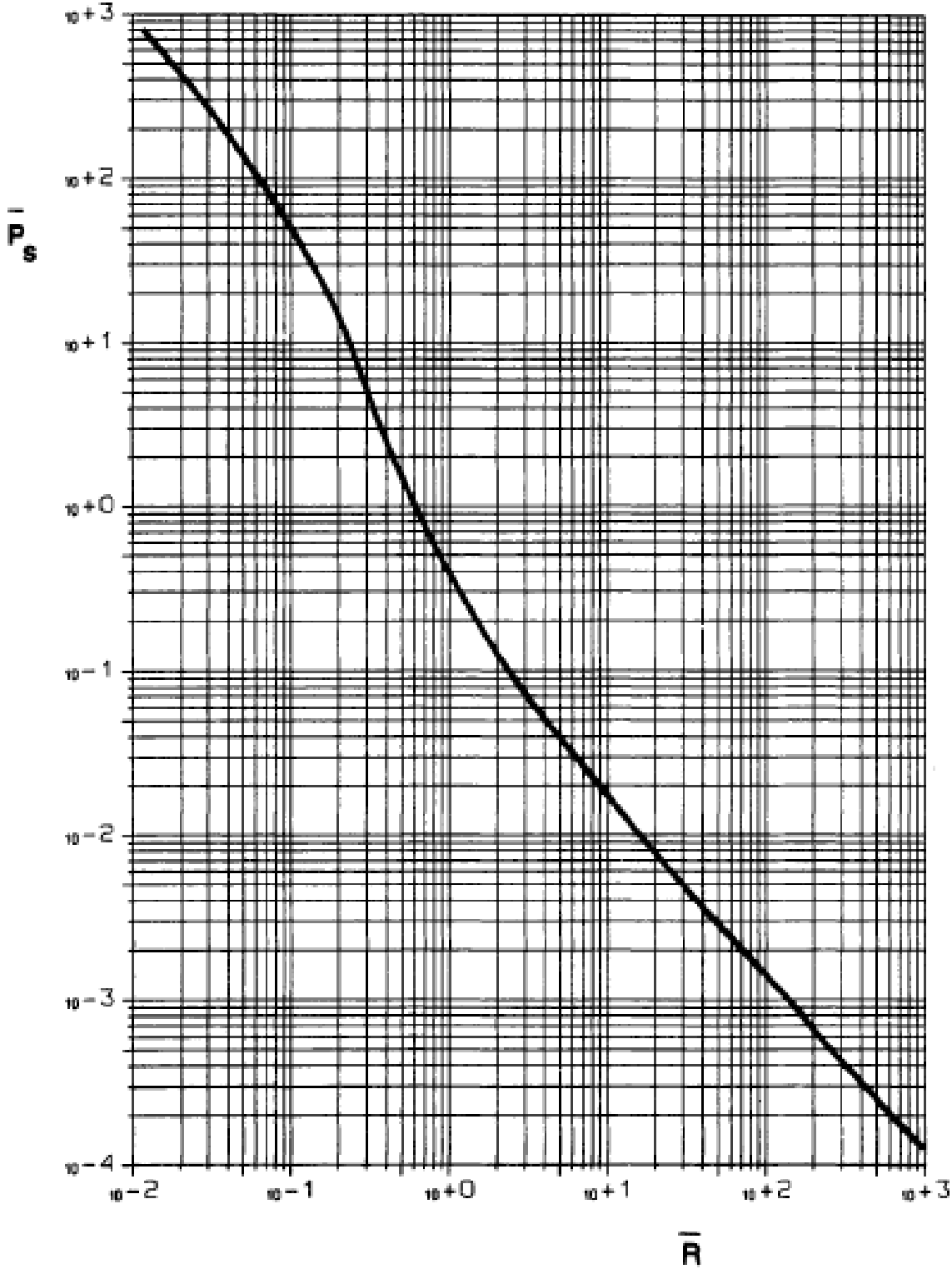


Figura 3.5 – P_s versus \bar{R} (CCPS, 1994).

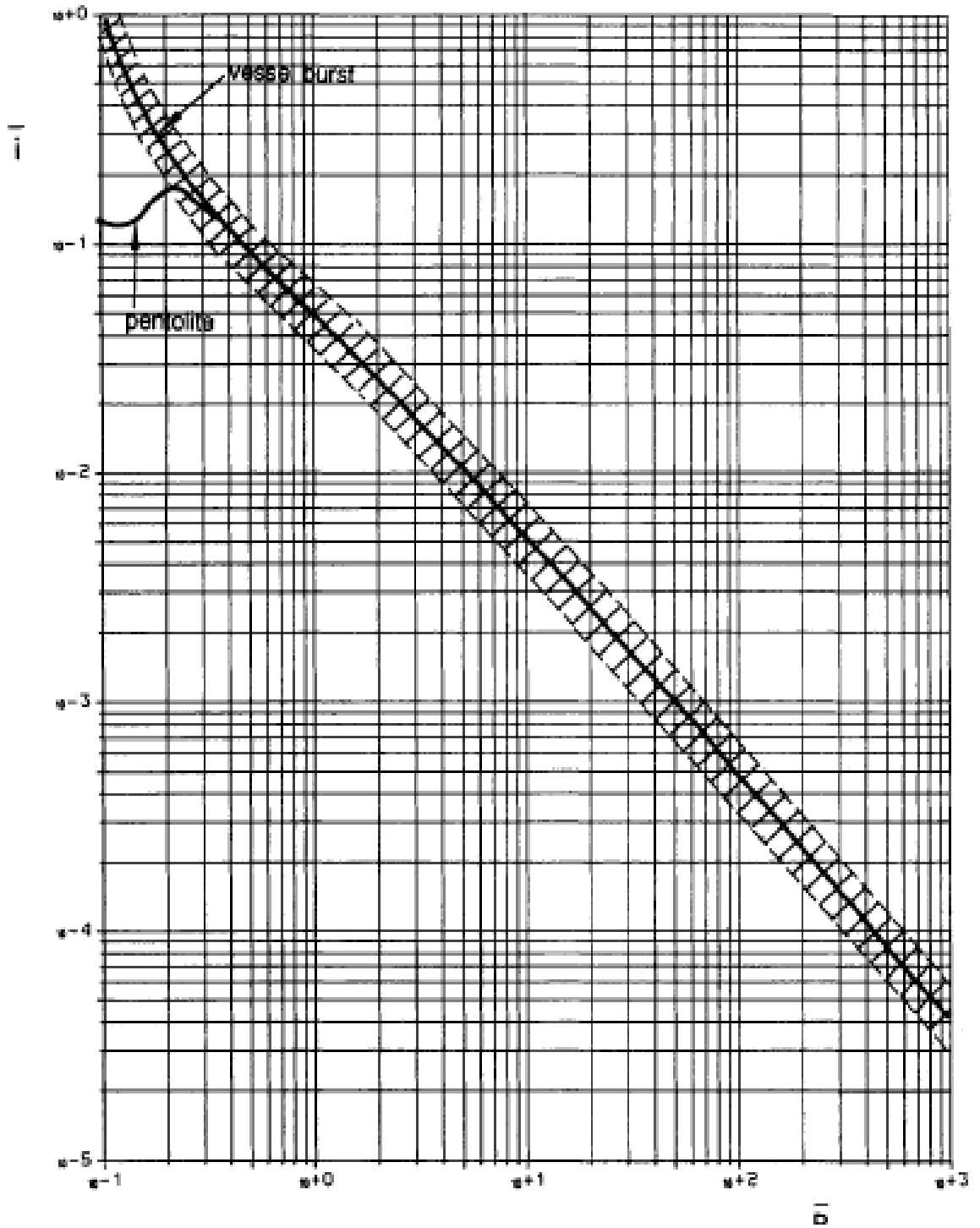


Figura 3.6 – I versus R (CCPS, 1994).

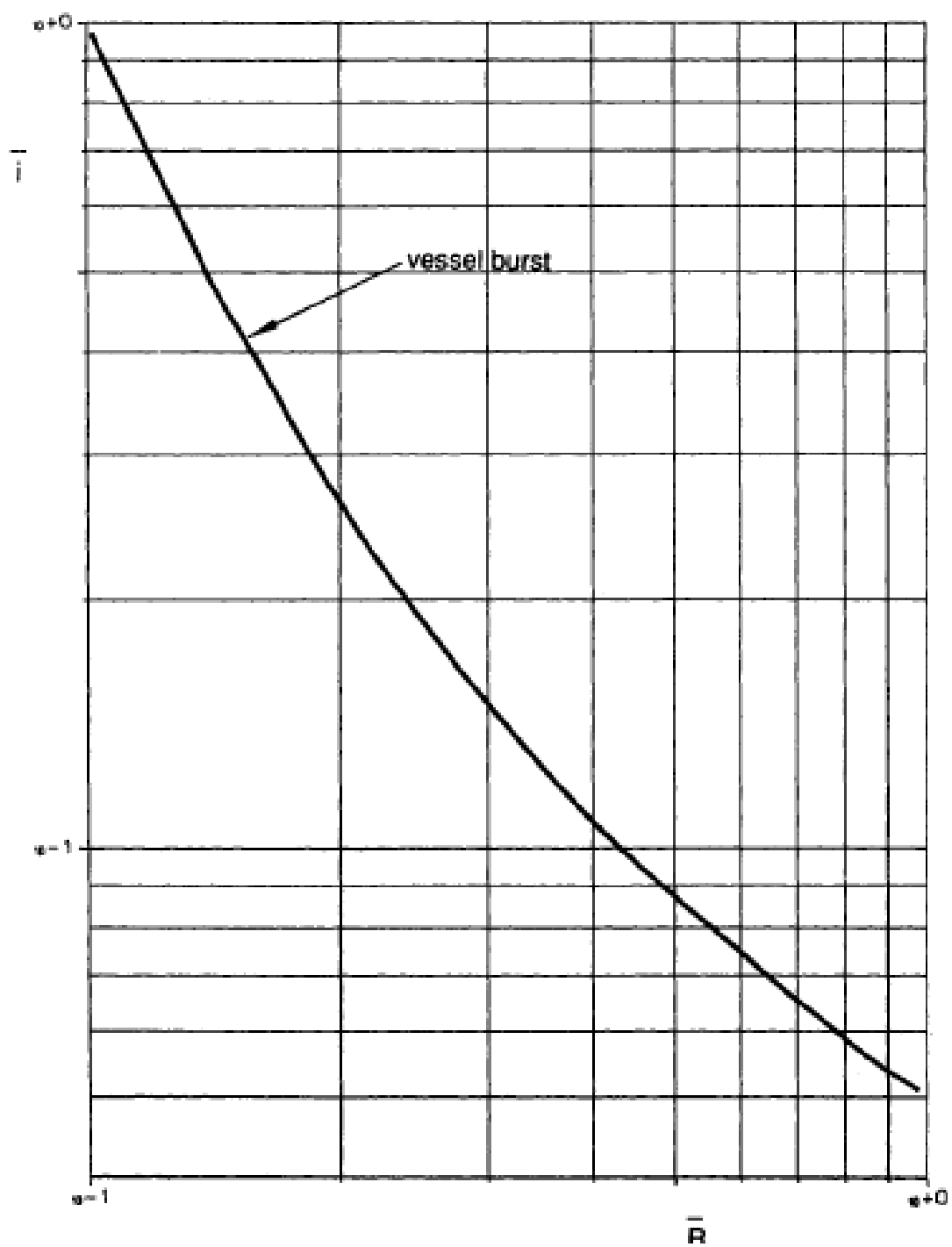


Figura 3.7 – I versus R (CCPS, 1994).

\bar{R}	Multiplicar por	
	\bar{P}_s	\bar{I}
<0.3	4	2
$\geq 0.3 \leq 1.6$	1.6	1.1
$> 1.6 \leq 3.5$	1.6	1
>3.5	1.4	1

Tabela 3.2 – Fatores de multiplicação para P_s e I para vasos cilíndricos de vários R (CCPS, 1994).

\bar{R}	Multiplicar por	
	\bar{P}_s	\bar{I}
<1	2	1.6
>1	1.1	1

Tabela 3.3 – Fatores de multiplicação para P_s e I para vasos esféricos (CCPS, 1994).

3.5.2 Cálculo dos níveis de fluxo térmico radiativo

3.5.2.1 Diâmetro e duração da bola de fogo

Utilizam-se relações empíricas para se estimar o diâmetro e a duração de uma bola de fogo, relações estas que foram geradas a partir de muitos experimentos de pequena escala. Segundo CCPS, 1994, temos as seguintes equações:

$$D_c = 5,8 \cdot m_f^{1/3} \quad (8)$$

$$t_c = 0,45 \cdot m_f^{1/3} \quad \text{para } m_f < 30000\text{kg} \quad (9)$$

$$t_c = 2,60 \cdot m_f^{1/6} \quad \text{para } > 30000\text{kg} \quad (10)$$

onde:

D_c = diâmetro final da bola de fogo (m)

t_c = tempo de duração da bola de fogo (s)

m_f = massa de combustível na bola de fogo (kg)

3.5.2.2 Radiação para receptor

Para um receptor não normal à bola de fogo, a radiação recebida pode ser calculada baseada no modelo de chama sólida:

$$q = EF\tau_a \quad (11)$$

onde:

q = fluxo de radiação recebida pelo receptor (kW/m²)

E = potência emissiva na superfície da chama (kW/m²)

F = fator de vista (adim)

τ_a = transmissividade atmosférica (adim)

Para bolas de fogo originadas de hidrocarbonetos, estudos feitos em grande-escala mostraram que um valor de **350 kW/m²** para a **potência emissiva E** é adequado para os cálculos de fluxo de radiação.

O fator de vista F é o fator que modula a intensidade do fluxo térmico radiativo chegando à uma dada superfície em função da sua posição em relação à fonte de radiação (no caso a bola de fogo).

Conforme CCPS, 1994, o fator de vista F para um objeto vertical pode ser determinado pela seguinte relação:

$$F = \frac{X(D_c/2)^2}{(X^2 + z_c^2)^{3/2}} \quad (12)$$

onde:

z_c = altura da bola de fogo até o centro (em muitos casos estimada conservativamente por $z_c = D_c/2$) (m)

X = distância horizontal do objeto ao centro da bola de fogo (m)

$L = \text{distância entre o ponto cujo fluxo térmico se deseja calcular (m)}$

Estas distâncias podem ser melhor visualizadas pela Figura 3.8 abaixo:

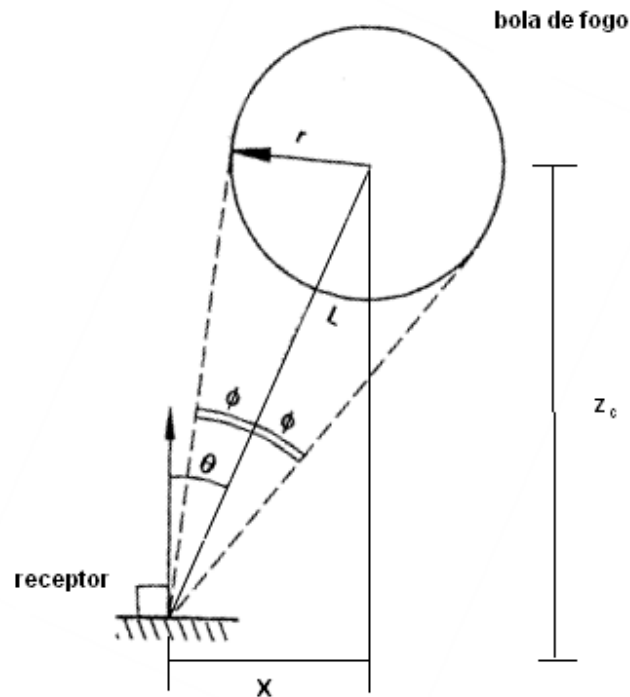


Figura 3.8 – Representação das distâncias ao receptor de uma bola de fogo

Segundo Barrera, 2006, a radiação térmica emitida da chama praticamente não interage com os componentes da atmosfera, mas a presença de vapor d'água na atmosfera absorve parte do fluxo térmico no percurso entre o ponto de emissão e o receptor. A fração de energia térmica que é transmitida entre dois pontos da atmosfera é medida pela “transmissividade” da atmosfera. A **transmissividade atmosférica (τ_a)** é avaliada com base na distância que a radiação térmica tem que percorrer na atmosfera e da pressão de vapor d'água presente. Existem expressões semi-empíricas que determinam a transmissividade de atmosférica, porém é conservativo desprezar este parâmetro e é o que iremos fazer em nossos cálculos.

4 RESULTADOS OBTIDOS

4.1 Resultados dos cálculos para níveis de sobrepressão e fluxo térmico radiativo

Foram realizados os cálculos dos efeitos de sobrepressão e fluxo térmico radiativo para se determinar “Zonas Vulneráveis” classificadas conforme a “severidade” das consequências geradas pela explosão do nosso estudo de caso.

Segundo Barrera, 2006, em caso de acidente, à medida que aumenta a distância à fonte de perigo, diminuem potenciais efeitos danosos e é comum fazer-se uma associação entre calor, sobrepressão e o perigo.

A partir dos dados gerados de sobrepressão e fluxo térmico, foram estimados os danos a pessoas e edificações no raio de ação da explosão.

A Tabela 4.1 abaixo mostra as distâncias encontradas para o estudo de caso para os valores de pico de sobrepressão e as consequências esperadas.

Tabela 4.1 – Distâncias encontradas para a sobrepressão e as consequências esperadas:

<i>PICO DE SOBREPRESSÃO (kPa)</i>	<i>CONSEQUÊNCIA</i>	<i>DISTÂNCIA CALCULADA (m)</i>
0,14	Ruido incômodo (137 dB)	3742,00
0,28	Ruido alto (143 dB), "boom" sônico	1637,00
1,00	Limiar para quebra de vidros	585,00
2,00	“Distância segura” (menos de 5 % de probabilidade de danos sérios abaixo deste valor). 10% de vidros quebrados.	327,00
4,00	90% de vidros quebrados. Danos á revestimentos. Dano estrutural pequeno.	234,00
7,00	Pedaços de vidros projetados com velocidade com capacidade de causar ferimentos. Telhas removidas.	82,00
14,00	Casas inabitáveis, porém não totalmente irreparáveis. Construções em bloco de cimento achatadas.	70,00
21,00	Distorção em estruturas reforçadas. 20% de probabilidade de fatalidades no interior dos prédios. Probabilidade de ruptura de tímpano de 10% (Lees)	47,00

<i>PICO DE SOBREPRESSÃO (kPa)</i>	<i>CONSEQUÊNCIA</i>	<i>DISTÂNCIA CALCULADA (m)</i>
35,00	Sérios danos estruturais. Demolição de prédios. Tanques grandes de armazenamento podem romper. 15% de fatalidade fora de prédios. 50% de fatalidades no interior de prédios.	35,00
70,00	Provável demolição total de todas as estruturas. ~100% de probabilidade de fatalidades.	21,00

No Anexo 1 encontram-se as telas das planilhas de cálculo do Excel® utilizadas para a determinação das distâncias esperadas para sobrepressão.

A Tabela 4.2 abaixo mostra as distâncias encontradas o fluxo térmico radiativo e as consequências esperadas.

Tabela 4.2 – Distâncias encontradas para o fluxo térmico radiativo e as consequências esperadas:

<i>FLUXO TÉRMICO (kW/m²)</i>	<i>CONSEQUÊNCIA</i>	<i>DISTÂNCIA CALCULADA (m)</i>
1,2	Exposição ao sol no verão ao meio-dia	1015,00
1,6	Mínimo para sentir dor na pele por exposição contínua – “Distância segura”	879,00
4,7	Dor entre 15 e 20 segundos de exposição, queimaduras de 2º grau após 30 segundos	509,00
12,6	30% de fatalidade por exposição contínua, nível mínimo para derreter tubos de plástico	305,00
23	100% de fatalidade por exposição contínua, 10% de fatalidade por exposição instantânea	221,00
35	25% de fatalidade por exposição instantânea , danos a equipamentos de processo	173,00
60	~100% de fatalidade por exposição instantânea	123,00

No Anexo 2 encontram-se as telas das planilhas de cálculo do Excel® utilizadas para a determinação das distâncias esperadas para fluxo térmico radiativo.

Com base nos resultados da Tabela 4.1 foram desenhadas isopletas de sobrepressão delimitando as “Zonas Vulneráveis” conforme as consequências geradas. Estas isopletas estão mostradas abaixo através das Figuras 4.1 e 4.2. Já com os resultados mostrados na Tabela 4.2 foram desenhadas isopletas de fluxo térmico radiativo, também delimitando as Zonas Vulneráveis conforme as consequências geradas. Estas isopletas estão mostradas abaixo através das Figuras 4.3 e 4.4. Para compor as isopletas foram utilizadas imagens de satélite da região analisada, utilizando-se como base o programa Google Earth®.



Figura 4.1 – Primeira Parte: Zonas de vulnerabilidade devido à sobrepressão gerada no BLEVE do Bobtail.



Figura 4.2 – Segunda Parte: Zonas de vulnerabilidade devido à sobrepessão gerada no BLEVE do Bobtail.

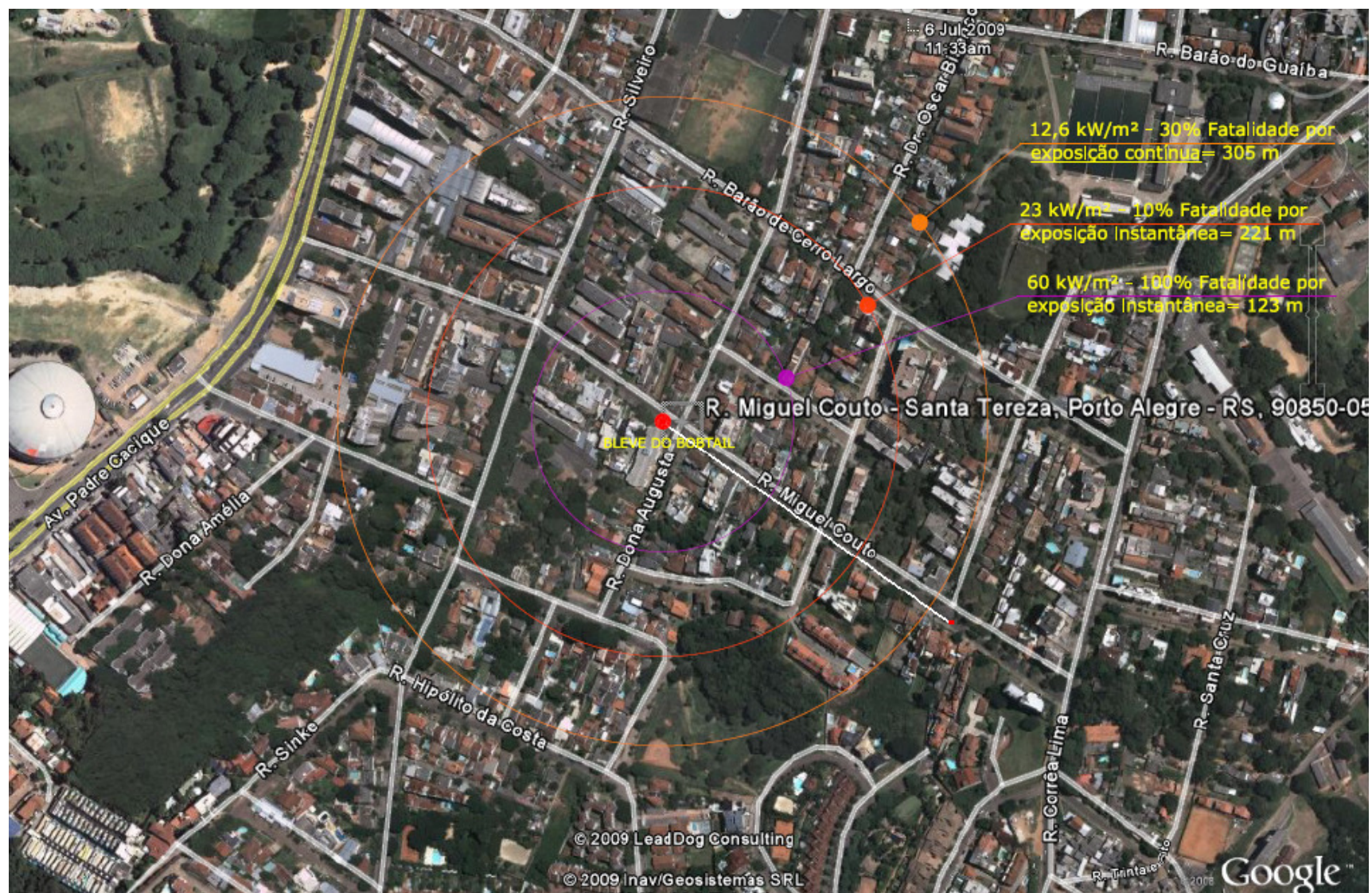


Figura 4.3 – Primeira Parte: Zonas de vulnerabilidade devido ao fluxo térmico radiativo gerado no BLEVE do Bobtail.

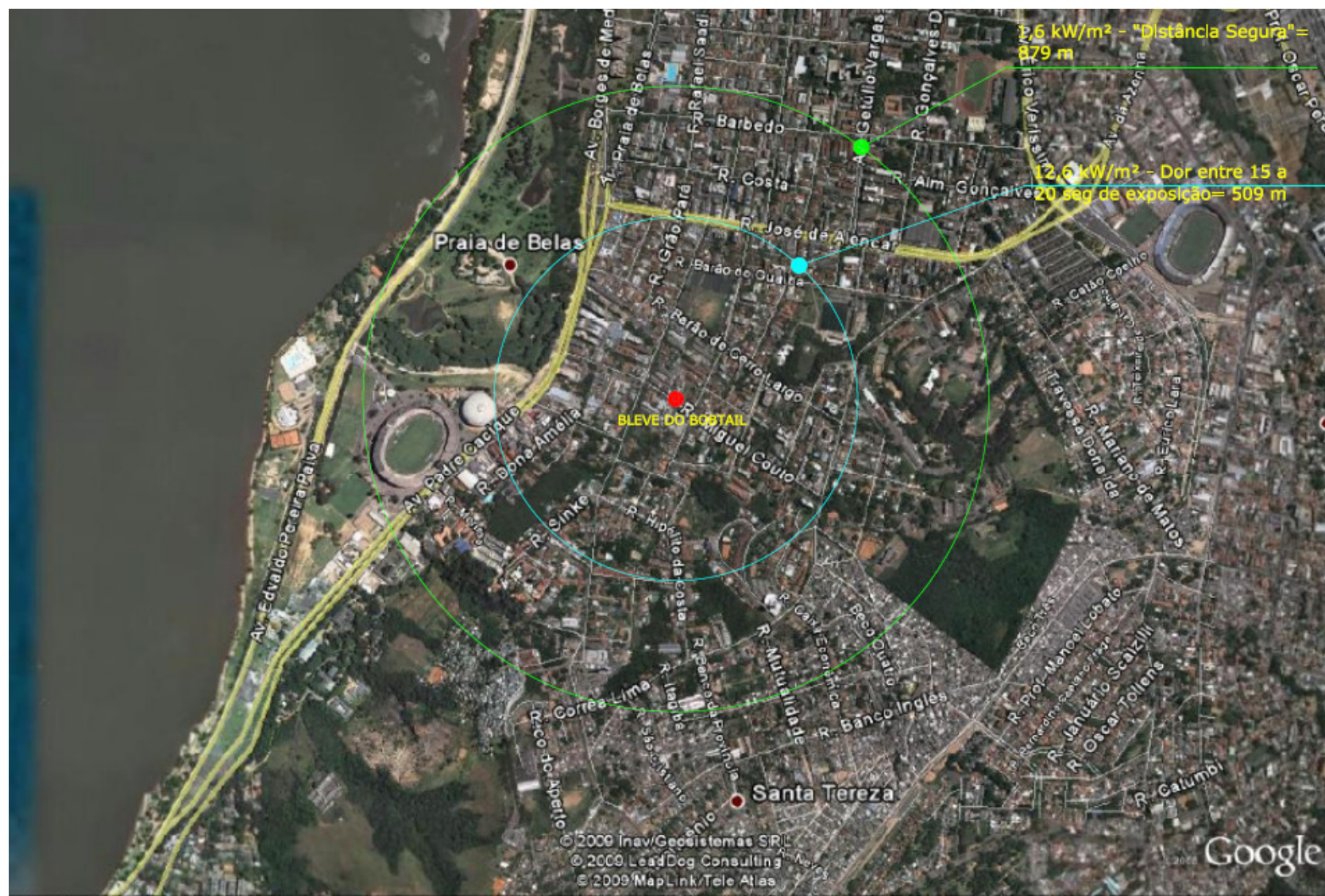


Figura 4.4 – Segunda Parte: Zonas de vulnerabilidade devido ao fluxo térmico radiativo gerado no BLEVE do Bobs Tail.

Conforme a Figura 4.1, verificamos que a distância para que ocorram praticamente 100% de fatalidades é na ordem de 21 metros, ou seja, haverá a destruição total dos prédios e morte das pessoas que estiverem a esta distância do ponto de explosão, correspondendo a um pico de sobrepressão de 70 kPa. Com um pico de sobrepressão de 35 kPa, teremos uma distância na ordem de 35 metros, ocorrendo sérios danos estruturais, 15% de fatalidades fora dos prédios e 50% dentro dos prédios. A fatalidade devida à sobrepressão será sempre maior no interior dos prédios, pois consideram os efeitos secundários, ou seja, soterramento de pessoas por exemplo. Conforme a Figura 4.2, para a distância de 327 metros teremos um pico de sobrepressão na ordem de 2 kPa, sendo esta considerada pela literatura como uma “Distância Segura” em termos de sobrepressão.

Para o fluxo térmico radiativo, conforme a Figura 4.3, verificamos que a distância para que ocorram praticamente 100% de fatalidades é na ordem de 123 metros, ou seja, haverá a morte das pessoas que estiverem à esta distância do ponto de explosão, correspondendo à um fluxo térmico de 60 kW/m². Com um fluxo térmico de 23 kW/m², teremos uma distância na ordem de 221 metros, correspondendo a 10% de fatalidades por exposição instantânea. Conforme a Figura 4.4, para a distância de 879 metros teremos um fluxo térmico na ordem de 1,6 kW/m², sendo esta considerada pela literatura como uma “Distância Segura” em termos de fluxo térmico radiativo.

4.2 Vazão de água para resfriamento do autotanque e tempo para ocorrência do BLEVE

Segundo TNO, 2005, a quantidade de água necessária para promover um resfriamento eficaz para a prevenção de um BLEVE em tanques de GLP, é de 10 litros/(m² min). Portanto, para um caminhão *BOBTAIL* de 23 m³, cuja a área externa é de aproximadamente 43 m², a vazão de água deverá ser de 430 litros/min (25,8 m³/h). A capacidade de reposição de água para as viaturas também é muito importante, pois o resfriamento do tanque deverá permanecer até a extinção do incêndio (provavelmente até o esgotamento de GLP do tanque). O tempo de resposta é outro fator preponderante já que estudos mostram que os tempos para a ocorrência do BLEVE em tanques que foram engolfados por chamas variam de 5 a 25 minutos, relativamente pequenos (TNO, 2005).

5 CONCLUSÕES

As ações da equipe de resposta são essenciais desde o início do comunicado de emergência, pois dela virá a escolha das medidas mais adequadas, dependendo do tempo restante e da gravidade da situação. Em muitos casos, iniciar uma ação de resfriamento do autotanke será tardia e poderá comprometer a integridade da equipe e das pessoas presentes na área vulnerável. A evacuação é sempre a primeira medida a ser tomada num caso como este, portanto os integrantes da Defesa Civil devem estar devidamente preparados e treinados para levar a população vulnerável para áreas seguras.

A utilização de resultados de uma “Análise de Consequências” traz uma maior confiabilidade para o planejamento de emergências, ou seja, maximiza a eficiência do combate e minimiza a exposição de pessoas, incluindo Defesa Civil (bombeiros, polícia...) bem como dos moradores e trabalhadores das áreas vulneráveis, de forma a trazer uma menor probabilidade de perdas humanas e ferimentos graves. A realização de simulações realísticas e feitas com frequência são as melhores formas de preparação para este tipo de evento. As simulações devem envolver as principais entidades membros da Defesa Civil para este tipo de incidente.

Os resultados obtidos pela análise de consequências para o estudo de caso demonstraram picos de sobrepressão na ordem de 70 kPa para uma distância de 21 metros, indicando que haverá a destruição total dos prédios e morte das pessoas que estiverem à esta distância do local da explosão. Níveis inferiores a 2 kPa são obtidos à 327 metros do local da explosão.

Os cálculos de fluxo térmico radiativo forneceram 60 kW/m² para uma distância de 123 metros, dentro da qual a probabilidade de fatalidades é na ordem de quase 100%. Níveis inferiores a 1,6 kW/m² são obtidos a uma distância na ordem de 879 metros.

Com base nos resultados obtidos, uma distância mínima de 879 metros é necessária para a evacuação da área para proteção de pessoas no caso de um incidente envolvendo um caminhão autotanke de GLP nos moldes do apresentado neste estudo de caso. Deve ser evitado ao máximo a permanência de pessoal dentro de um raio de 123 metros, mesmo sendo membros integrantes da Defesa Civil - somente o pessoal designado especificamente para o combate.

Conforme a literatura, um tempo de 5 minutos é o mínimo requerido iniciar com segurança o resfriamento no autotanque de GLP. Esta mesma literatura recomenda uma vazão mínima de resfriamento de 430 litros/min para o autotanque de GLP tipo Bobtail.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 1 Molag, M., Kruithoff, A., 2005. **“TNO Report – Tanks: Reduction of the risk of a BLEVE**, Economic Commission for Europe, Inland Transport Committee, Netherlands.
- 2 CCPS, 2003. **“Facility Siting and Layout”**, Center for Chemical Process Safety – AIChE, New York.
- 3 Lees, F. P., 1996. **“Loss Prevention in the Process Industries”**, Butterworth-Heinemann
- 4 Roberts, M. W., 2000. **“Analysis of Boiling Liquid Expanding Vapor Explosion (BLEVE) Events at DOE Sites”**, EQE International Inc., Knoxville.
- 5 Cameron, I., Raman, R., 2005. **“Process Systems Risk Management”**, Elsevier, San Diego.
- 6 CCPS, 1994. **“Guidelines for Evaluating the Characteristics of Vapor Cloud Explosions, Flash Fires, and BLEVEs”**, AIChE, New York.
- 7 Barrera, P. R., 2006. **“Análise de Vulnerabilidade Aplicada ao Planejamento de Emergências”**, UFRGS, Porto Alegre.
- 8 CCPS, 2000. **“Guideline for Chemical Process Quantitative Risk Analysis”** – AIChE, New York.

ANEXO 1 – Resultados para sobrepressão

a) 0,14 kPa

Cálculos dos Efeitos gerados por um BLEVE de GLP (considerado Propano)		
© Planilha elaborada por Eduardo de Meilo Schmitt (não deve ser copiada ou reproduzida sem autorização)		
PROJETO: AUTO-TANQUE BOBTAIL	DATA: 2/7/2009	
A) SOBREPRESSÃO		
1. DADOS DE ENTRADA		
1.1	Pressão interna no momento da ruptura - p_i	2189,75 kPa a
1.2	Pressão atmosférica - p_a	101325,00 Pa a
1.3	Percentual de líquido no vaso % (mássico)	90%
1.4	Massa de propano na fase líquida - m_l	8678,66 kg
1.5	Massa de propano na fase vapor - m_v	117,13 kg
1.6	Distância do ponto de avaliação (target) - r	3742 m
1.7	Temperatura de líquido saturado - T_{sat}	334,8 K
2. CÁLCULOS E RESULTADOS		
2.1	Energia específica de expansão fase líquida - e_{α}	72 kJ/kg
2.2	Energia específica de expansão fase vapor - e_{α}	166 kJ/kg
2.3	Energia de Expansão - E_{α}	1296 MJ
2.4	Distância Reduzida - R	160,00 adim
2.5	Sobrepressão adimensional - P_s (Figura 6.22)	0,0009 adim
2.6	Impulso adimensional - I (Figura 6.23 e Figura 6.24 - $0,1 < R < 1$)	0,070 adim
2.7	Fator de ajuste de geometria para P_s (Tabelas 6.11a e 6.11b)	1,540 adim
2.8	Fator de ajuste de geometria para I (Tabelas 6.11a e 6.11b)	1,100 adim
2.9	Sobrepressão adimensional AJUSTADO - P_s (Figura 6.22)	0,001 adim
2.10	Impulso adimensional AJUSTADO - I (Figura 6.23 e Figura 6.24 - $0,1 < R < 1$)	0,077 adim
2.11	Pico de sobrepressão - ($p_s - p_a$)	0,14 kPa g
2.12	Impulso - i	5,37 Pa.s
2.13	Check de p_s	OK
B) BOLA DE FOGO E DURAÇÃO		
1. CÁLCULOS E RESULTADOS		
1.1	Diâmetro final da Bola de fogo - D_c	119 m
1.2	Tempo de duração da bola de fogo - t_c	9,2 s
C) RADIAÇÃO		
1. DADOS DE ENTRADA		
1.1	Altura da Bola de Fogo até o centro - z_c	59,60 m
1.2	Distância horizontal do receptor até o centro da bola de fogo - X	3741,98 m
1.3	Potência emissiva na superfície da bola de fogo	350,00 kW/m ²
1.4	Transmissividade atmosférica	1,00 adim
2. CÁLCULOS E RESULTADOS		
2.1	Fator de vista - I	0,000 adim
2.2	Fluxo térmico radiativo para o receptor - q (Modelo da Chama Sólida)	0 kW/m ²
2.3	Fluxo térmico radiativo para o receptor - q (Método Empírico - Roberts 1982)	0 kW/m ²

b) 0,28 kPa

Cálculos dos Efeitos gerados por um BLEVE de GLP (considerado Propano)	
<small>© Planilha elaborada por Eduardo de Mello Schmitt (não deve ser copiada ou reproduzida sem autorização)</small>	
PROJETO: AUTO-TANQUE BOBTAIL	DATA: 2/7/2009
A) SOBREPRESSÃO	
1. DADOS DE ENTRADA	
1.1 Pressão interna no momento da ruptura - p_i	2189,75 kPa a
1.2 Pressão atmosférica - p_o	101325,00 Pa a
1.3 Percentual de líquido no vaso % (mássico)	90%
1.4 Massa de propano na fase líquida - m_l	8678,66 kg
1.5 Massa de propano na fase vapor - m_v	117,13 kg
1.6 Distância do ponto de avaliação (target) - r	327 m
1.7 Temperatura de líquido saturado - T_{sat}	334,8 K
2. CÁLCULOS E RESULTADOS	
2.1 Energia específica de expansão fase líquida - e_{ex}	72 kJ/kg
2.2 Energia específica de expansão fase vapor - e_{ex}	166 kJ/kg
2.3 Energia de Expansão - E_{ex}	1296 MJ
2.4 Distância Reduzida - R	14,00 adim
2.5 Sobrepressão adimensional - P_s (Figura 6.22)	0,002 adim
2.6 Impulso adimensional - I (Figura 6.23 e Figura 6.24 - $0,1 < R < 1$)	0,070 adim
2.7 Fator de ajuste de geometria para P_s (Tabelas 6.11a e 6.11b)	1,540 adim
2.8 Fator de ajuste de geometria para I (Tabelas 6.11a e 6.11b)	1,100 adim
2.9 Sobrepressão adimensional AJUSTADO - P_s (Figura 6.22)	0,003 adim
2.10 Impulso adimensional AJUSTADO - I (Figura 6.23 e Figura 6.24 - $0,1 < R < 1$)	0,077 adim
2.11 Pico de sobrepressão - $(p_s - p_o)$	0,28 kPa g
2.12 Impulso - i	5,37 Pa.s
2.13 Check de p_s	OK
B) BOLA DE FOGO E DURAÇÃO	
1. CÁLCULOS E RESULTADOS	
1.1 Diâmetro final da Bola de fogo - D_c	119 m
1.2 Tempo de duração da bola de fogo - t_c	9,2 s
C) RADIAÇÃO	
1. DADOS DE ENTRADA	
1.1 Altura da Bola de Fogo até o centro - Z_c	59,60 m
1.2 Distância horizontal do receptor até o centro da bola de fogo - X	327,47 m
1.3 Potência emissiva na superfície da bola de fogo	350,00 kW/m ²
1.4 Transmissividade atmosférica	1,00 adim
2. CÁLCULOS E RESULTADOS	
2.1 Fator de vista - I	0,032 adim
2.2 Fluxo térmico radiativo para o receptor - q (Modelo da Chama Sólida)	11 kW/m ²
2.3 Fluxo térmico radiativo para o receptor - q (Método Empírico - Roberts 1982)	8 kW/m ²

c) 1,00 kPa

Cálculos dos Efeitos gerados por um BLEVE de GLP (considerado Propano)	
<small>© Planilha elaborada por Eduardo de Mello Schmitt (não deve ser copiada ou reproduzida sem autorização)</small>	
PROJETO: AUTO-TANQUE BOBTAIL	DATA: 2/7/2009
A) SOBREPRESSÃO	
1. DADOS DE ENTRADA	
1.1 Pressão interna no momento da ruptura - p_i	2189,75 kPa a
1.2 Pressão atmosférica - p_o	101325,00 Pa a
1.3 Percentual de líquido no vaso % (mássico)	90%
1.4 Massa de propano na fase líquida - m_l	8678,66 kg
1.5 Massa de propano na fase vapor - m_v	118,68 kg
1.6 Distância do ponto de avaliação (<i>target</i>) - r	585 m
1.7 Temperatura de líquido saturado - T_{sat}	334,8 K
2. CÁLCULOS E RESULTADOS	
2.1 Energia específica de expansão fase líquida - e_{ex}	72 kJ/kg
2.2 Energia específica de expansão fase vapor - e_{ex}	166 kJ/kg
2.3 Energia de Expansão - E_{ex}	1297 MJ
2.4 Distância Reduzida - R	25,00 adim
2.5 Sobrepressão adimensional - P_s (Figura 6.22)	0,006 adim
2.6 Impulso adimensional - I (Figura 6.23 e Figura 6.24 - $0,1 < R < 1$)	0,070 adim
2.7 Fator de ajuste de geometria para P_s (Tabelas 6.11a e 6.11b)	1,540 adim
2.8 Fator de ajuste de geometria para I (Tabelas 6.11a e 6.11b)	1,100 adim
2.9 Sobrepressão adimensional AJUSTADO - P_s (Figura 6.22)	0,010 adim
2.10 Impulso adimensional AJUSTADO - I (Figura 6.23 e Figura 6.24 - $0,1 < R < 1$)	0,077 adim
2.11 Pico de sobrepressão - $(p_s - p_o)$	1,00 kPa g
2.12 Impulso - i	5,37 Pa.s
2.13 Check de p_s	OK
B) BOLA DE FOGO E DURAÇÃO	
1. CÁLCULOS E RESULTADOS	
1.1 Diâmetro final da Bola de fogo - D_c	119 m
1.2 Tempo de duração da bola de fogo - t_c	9,2 s
C) RADIAÇÃO	
1. DADOS DE ENTRADA	
1.1 Altura da Bola de Fogo até o centro - Z_c	59,60 m
1.2 Distância horizontal do receptor até o centro da bola de fogo - X	584,76 m
1.3 Potência emissiva na superfície da bola de fogo	350,00 kW/m ²
1.4 Transmissividade atmosférica	1,00 adim
2. CÁLCULOS E RESULTADOS	
2.1 Fator de vista - I	0,010 adim
2.2 Fluxo térmico radiativo para o receptor - q (<i>Modelo da Chama Sólida</i>)	4 kW/m ²
2.3 Fluxo térmico radiativo para o receptor - q (<i>Método Empírico - Roberts 1982</i>)	3 kW/m ²

d) 2,00 kPa

Cálculos dos Efeitos gerados por um BLEVE de GLP (considerado Propano)		
<small>© Planilha elaborada por Eduardo de Mello Schmitt (não deve ser copiada ou reproduzida sem autorização)</small>		
PROJETO: AUTO-TANQUE BOBTAIL	DATA: 2/7/2009	
A) SOBREPRESSÃO		
1. DADOS DE ENTRADA		
1.1	Pressão interna no momento da ruptura - p_r	2189,75 kPa a
1.2	Pressão atmosférica - p_o	101325,00 Pa a
1.3	Percentual de líquido no vaso % (mássico)	90%
1.4	Massa de propano na fase líquida - m_l	8678,66 kg
1.5	Massa de propano na fase vapor - m_v	118,68 kg
1.6	Distância do ponto de avaliação (<i>target</i>) - r	327 m
1.7	Temperatura de líquido saturado - T_{sat}	334,8 K
2. CÁLCULOS E RESULTADOS		
2.1	Energia específica de expansão fase líquida - e_{ex}	72 kJ/kg
2.2	Energia específica de expansão fase vapor - e_{ex}	166 kJ/kg
2.3	Energia de Expansão - E_{ex}	1297 MJ
2.4	Distância Reduzida - R	14,00 adim
2.5	Sobrepessão adimensional - P_s (Figura 6.22)	0,013 adim
2.6	Impulso adimensional - I (Figura 6.23 e Figura 6.24 - $0,1 < R < 1$)	0,070 adim
2.7	Fator de ajuste de geometria para P_s (Tabelas 6.11a e 6.11b)	1,540 adim
2.8	Fator de ajuste de geometria para I (Tabelas 6.11a e 6.11b)	1,100 adim
2.9	Sobrepessão adimensional AJUSTADO - P_s (Figura 6.22)	0,020 adim
2.10	Impulso adimensional AJUSTADO - I (Figura 6.23 e Figura 6.24 - $0,1 < R < 1$)	0,077 adim
2.11	Pico de sobrepressão - $(p_s - p_o)$	2,00 kPa g
2.12	Impulso - i	5,37 Pa.s
2.13	Check de p_s	OK
B) BOLA DE FOGO E DURAÇÃO		
1. CÁLCULOS E RESULTADOS		
1.1	Diâmetro final da Bola de fogo - D_c	119 m
1.2	Tempo de duração da bola de fogo - t_c	9,2 s
C) RADIAÇÃO		
1. DADOS DE ENTRADA		
1.1	Altura da Bola de Fogo até o centro - Z_c	59,60 m
1.2	Distância horizontal do receptor até o centro da bola de fogo - X	327,47 m
1.3	Potência emissiva na superfície da bola de fogo	350,00 kW/m ²
1.4	Transmissividade atmosférica	1,00 adim
2. CÁLCULOS E RESULTADOS		
2.1	Fator de vista - I	0,032 adim
2.2	Fluxo térmico radiativo para o receptor - q (Modelo da Chama Sólida)	11 kW/m ²
2.3	Fluxo térmico radiativo para o receptor - q (Método Empírico - Roberts 1982)	8 kW/m ²

e) 4,00 kPa

Cálculos dos Efeitos gerados por um BLEVE de GLP (considerado Propano)	
© Planilha elaborada por Eduardo de Mello Schmitt (não deve ser copiada ou reproduzida sem autorização)	
PROJETO: AUTO-TANQUE BOBTAIL	DATA: 27/2009
A) SOBREPRESSÃO	
1. DADOS DE ENTRADA	
1.1 Pressão interna no momento da ruptura - p_r	2189,75 kPa a
1.2 Pressão atmosférica - p_o	101325,00 Pa a
1.3 Percentual de líquido no vaso % (mássico)	90%
1.4 Massa de propano na fase líquida - m_l	8678,66 kg
1.5 Massa de propano na fase vapor - m_v	118,68 kg
1.6 Distância do ponto de avaliação (target) - r	234 m
1.7 Temperatura de líquido saturado - T_{sat}	334,8 K
2. CÁLCULOS E RESULTADOS	
2.1 Energia específica de expansão fase líquida - e_{ex}	72 kJ/kg
2.2 Energia específica de expansão fase vapor - e_{ex}	166 kJ/kg
2.3 Energia de Expansão - E_{ex}	1297 MJ
2.4 Distância Reduzida - R	10,00 adim
2.5 Sobrepressão adimensional - P_s (Figura 6.22)	0,026 adim
2.6 Impulso adimensional - I (Figura 6.23 e Figura 6.24 - $0,1 < R < 1$)	0,070 adim
2.7 Fator de ajuste de geometria para P_s (Tabelas 6.11a e 6.11b)	1,540 adim
2.8 Fator de ajuste de geometria para I (Tabelas 6.11a e 6.11b)	1,100 adim
2.9 Sobrepressão adimensional AJUSTADO - P_s (Figura 6.22)	0,039 adim
2.10 Impulso adimensional AJUSTADO - I (Figura 6.23 e Figura 6.24 - $0,1 < R < 1$)	0,077 adim
2.11 Pico de sobrepressão - $(p_s - p_o)$	4,00 kPa g
2.12 Impulso - i	5,37 Pa.s
2.13 Check de p_s	OK
B) BOLA DE FOGO E DURAÇÃO	
1. CÁLCULOS E RESULTADOS	
1.1 Diâmetro final da Bola de fogo - D_o	119 m
1.2 Tempo de duração da bola de fogo - t_o	9,2 s
C) RADIAÇÃO	
1. DADOS DE ENTRADA	
1.1 Altura da Bola de Fogo até o centro - z_o	59,60 m
1.2 Distância horizontal do receptor até o centro da bola de fogo - X	233,90 m
1.3 Potência emissiva na superfície da bola de fogo	350,00 kW/m ²
1.4 Transmissividade atmosférica	1,00 adim
2. CÁLCULOS E RESULTADOS	
2.1 Fator de vista - I	0,059 adim
2.2 Fluxo térmico radiativo para o receptor - q (Modelo da Chama Sólida)	21 kW/m ²
2.3 Fluxo térmico radiativo para o receptor - q (Método Empírico - Roberts 1982)	16 kW/m ²

f) 7,00 kPa

Cálculos dos Efeitos gerados por um BLEVE de GLP (considerado Propano)	
© Planilha elaborada por Eduardo de Mello Schmitt (não deve ser copiada ou reproduzida sem autorização)	
PROJETO: AUTO-TANQUE BOBTAIL	DATA: 2/7/2009
A) SOBREPRESSÃO	
1. DADOS DE ENTRADA	
1.1 Pressão interna no momento da ruptura - p_r	2189,75 kPa a
1.2 Pressão atmosférica - p_o	101325,00 Pa a
1.3 Percentual de líquido no vaso % (mássico)	90%
1.4 Massa de propano na fase líquida - m_l	8678,66 kg
1.5 Massa de propano na fase vapor - m_v	117,13 kg
1.6 Distância do ponto de avaliação (target) - r	82 m
1.7 Temperatura de líquido saturado - T_{sat}	334,8 K
2. CÁLCULOS E RESULTADOS	
2.1 Energia específica de expansão fase líquida - e_{ex}	72 kJ/kg
2.2 Energia específica de expansão fase vapor - e_{ex}	166 kJ/kg
2.3 Energia de Expansão - E_{ex}	1296 MJ
2.4 Distância Reduzida - R	3,50 adim
2.5 Sobrepressão adimensional - P_s (Figura 6.22)	0,0449 adim
2.6 Impulso adimensional - I (Figura 6.23 e Figura 6.24 - $0,1 < R < 1$)	0,070 adim
2.7 Fator de ajuste de geometria para P_s (Tabelas 6.11a e 6.11b)	1,540 adim
2.8 Fator de ajuste de geometria para I (Tabelas 6.11a e 6.11b)	1,100 adim
2.9 Sobrepressão adimensional AJUSTADO - P_s (Figura 6.22)	0,069 adim
2.10 Impulso adimensional AJUSTADO - I (Figura 6.23 e Figura 6.24 - $0,1 < R < 1$)	0,077 adim
2.11 Pico de sobrepressão - $(p_s - p_o)$	7,00 kPa g
2.12 Impulso - i	5,37 Pa.s
2.13 Check de p_s	OK
B) BOLA DE FOGO E DURAÇÃO	
1. CÁLCULOS E RESULTADOS	
1.1 Diâmetro final da Bola de fogo - D_c	119 m
1.2 Tempo de duração da bola de fogo - t_c	9,2 s
C) RADIAÇÃO	
1. DADOS DE ENTRADA	
1.1 Altura da Bola de Fogo até o centro - Z_c	59,60 m
1.2 Distância horizontal do receptor até o centro da bola de fogo - X	81,86 m
1.3 Potência emissiva na superfície da bola de fogo	350,00 kW/m ²
1.4 Transmissividade atmosférica	1,00 adim
2. CÁLCULOS E RESULTADOS	
2.1 Fator de vista - I	0,280 adim
2.2 Fluxo térmico radiativo para o receptor - q (Modelo da Chama Sólida)	98 kW/m ²
2.3 Fluxo térmico radiativo para o receptor - q (Método Empírico - Roberts 1982)	89 kW/m ²

g) 14,00 kPa

Cálculos dos Efeitos gerados por um BLEVE de GLP (considerado Propano)	
© Planilha elaborada por Eduardo de Mello Schmitt (não deve ser copiada ou reproduzida sem autorização)	
PROJETO: AUTO-TANQUE BOBTAIL	DATA: 2/7/2009
A) SOBREPRESSÃO	
1. DADOS DE ENTRADA	
1.1 Pressão interna no momento da ruptura - p_r	2189,75 kPa a
1.2 Pressão atmosférica - p_o	101325,00 Pa a
1.3 Percentual de líquido no vaso % (mássico)	90%
1.4 Massa de propano na fase líquida - m_l	8678,66 kg
1.5 Massa de propano na fase vapor - m_v	117,13 kg
1.6 Distância do ponto de avaliação (target) - r	70 m
1.7 Temperatura de líquido saturado - T_{sat}	334,8 K
2. CÁLCULOS E RESULTADOS	
2.1 Energia específica de expansão fase líquida - e_{ex}	72 kJ/kg
2.2 Energia específica de expansão fase vapor - e_{ex}	166 kJ/kg
2.3 Energia de Expansão - E_{ex}	1296 MJ
2.4 Distância Reduzida - R	3,00 adim
2.5 Sobrepressão adimensional - P_s (Figura 6.22)	0,0785 adim
2.6 Impulso adimensional - I (Figura 6.23 e Figura 6.24 - $0,1 < R < 1$)	0,070 adim
2.7 Fator de ajuste de geometria para P_s (Tabelas 6.11a e 6.11b)	1,760 adim
2.8 Fator de ajuste de geometria para I (Tabelas 6.11a e 6.11b)	1,100 adim
2.9 Sobrepressão adimensional AJUSTADO - P_s (Figura 6.22)	0,138 adim
2.10 Impulso adimensional AJUSTADO - I (Figura 6.23 e Figura 6.24 - $0,1 < R < 1$)	0,077 adim
2.11 Pico de sobrepressão - $(p_s - p_o)$	14,00 kPa g
2.12 Impulso - i	5,37 Pa.s
2.13 Check de p_s	OK
B) BOLA DE FOGO E DURAÇÃO	
1. CÁLCULOS E RESULTADOS	
1.1 Diâmetro final da Bola de fogo - D_c	119 m
1.2 Tempo de duração da bola de fogo - t_c	9,2 s
C) RADIAÇÃO	
1. DADOS DE ENTRADA	
1.1 Altura da Bola de Fogo até o centro - z_c	59,60 m
1.2 Distância horizontal do receptor até o centro da bola de fogo - X	70,16 m
1.3 Potência emissiva na superfície da bola de fogo	350,00 kW/m ²
1.4 Transmissividade atmosférica	1,00 adim
2. CÁLCULOS E RESULTADOS	
2.1 Fator de vista - I	0,319 adim
2.2 Fluxo térmico radiativo para o receptor - q (Modelo da Chama Sólida)	112 kW/m ²
2.3 Fluxo térmico radiativo para o receptor - q (Método Empírico - Roberts 1982)	107 kW/m ²

h) 21,00 kPa

Cálculos dos Efeitos gerados por um BLEVE de GLP (considerado Propano)		
© Planilha elaborada por Eduardo de Mello Schmitt (não deve ser copiada ou reproduzida sem autorização)		
PROJETO: AUTO-TANQUE BOBTAIL	DATA:	27/2009
A) SOBREPRESSÃO		
1. DADOS DE ENTRADA		
1.1	Pressão interna no momento da ruptura - p_1	2189,75 kPa a
1.2	Pressão atmosférica - p_o	101325,00 Pa a
1.3	Percentual de líquido no vaso % (mássico)	90%
1.4	Massa de propano na fase líquida - m_l	8678,66 kg
1.5	Massa de propano na fase vapor - m_v	117,13 kg
1.6	Distância do ponto de avaliação (target) - r	47 m
1.7	Temperatura de líquido saturado - T_{sat}	334,8 K
2. CÁLCULOS E RESULTADOS		
2.1	Energia específica de expansão fase líquida - e_{ex}	72 kJ/kg
2.2	Energia específica de expansão fase vapor - e_{ex}	166 kJ/kg
2.3	Energia de Expansão - E_{ex}	1296 MJ
2.4	Distância Reduzida - R	2,00 adim
2.5	Sobrepessão adimensional - P_s (Figura 6.22)	0,1178 adim
2.6	Impulso adimensional - I (Figura 6.23 e Figura 6.24 - $0,1 < R < 1$)	0,070 adim
2.7	Fator de ajuste de geometria para P_s (Tabelas 6.11a e 6.11b)	1,760 adim
2.8	Fator de ajuste de geometria para I (Tabelas 6.11a e 6.11b)	1,100 adim
2.9	Sobrepessão adimensional AJUSTADO - P_s (Figura 6.22)	0,207 adim
2.10	Impulso adimensional AJUSTADO - I (Figura 6.23 e Figura 6.24 - $0,1 < R < 1$)	0,077 adim
2.11	Pico de sobrepressão - $(p_s - p_o)$	21,00 kPa g
2.12	Impulso - i	5,37 Pa.s
2.13	Check de p_s	OK
B) BOLA DE FOGO E DURAÇÃO		
1. CÁLCULOS E RESULTADOS		
1.1	Diâmetro final da Bola de fogo - D_c	119 m
1.2	Tempo de duração da bola de fogo - t_c	9,2 s
C) RADIAÇÃO		
1. DADOS DE ENTRADA		
1.1	Altura da Bola de Fogo até o centro - z_c	59,60 m
1.2	Distância horizontal do receptor até o centro da bola de fogo - X	46,77 m
1.3	Potência emissiva na superfície da bola de fogo	350,00 kW/m ²
1.4	Transmissividade atmosférica	1,00 adim
2. CÁLCULOS E RESULTADOS		
2.1	Fator de vista - I	0,382 adim
2.2	Fluxo térmico radiativo para o receptor - q (Modelo da Chama Sólida)	134 kW/m ²
2.3	Fluxo térmico radiativo para o receptor - q (Método Empírico - Roberts 1982)	159 kW/m ²

i) 35,00 kPa

Cálculos dos Efeitos gerados por um BLEVE de GLP (considerado Propano)	
<small>© Planilha elaborada por Eduardo de Mello Schmitt (não deve ser copiada ou reproduzida sem autorização)</small>	
PROJETO: AUTO-TANQUE BOBTAIL	DATA: 2/7/2009
A) SOBREPRESSÃO	
1. DADOS DE ENTRADA	
1.1 Pressão interna no momento da ruptura - p_r	2189,75 kPa a
1.2 Pressão atmosférica - p_o	101325,00 Pa a
1.3 Percentual de líquido no vaso % (mássico)	90%
1.4 Massa de propano na fase líquida - m_l	8678,66 kg
1.5 Massa de propano na fase vapor - m_v	117,13 kg
1.6 Distância do ponto de avaliação (target) - r	35 m
1.7 Temperatura de líquido saturado - T_{sat}	334,8 K
2. CÁLCULOS E RESULTADOS	
2.1 Energia específica de expansão fase líquida - e_{ex}	72 kJ/kg
2.2 Energia específica de expansão fase vapor - e_{ex}	166 kJ/kg
2.3 Energia de Expansão - E_{ex}	1296 MJ
2.4 Distância Reduzida - R	1,50 adim
2.5 Sobrepressão adimensional - P_s (Figura 6.22)	0,1963 adim
2.6 Impulso adimensional - I (Figura 6.23 e Figura 6.24 - $0,1 < R < 1$)	0,070 adim
2.7 Fator de ajuste de geometria para P_s (Tabelas 6.11a e 6.11b)	1,760 adim
2.8 Fator de ajuste de geometria para I (Tabelas 6.11a e 6.11b)	1,100 adim
2.9 Sobrepressão adimensional AJUSTADO - P_s (Figura 6.22)	0,345 adim
2.10 Impulso adimensional AJUSTADO - I (Figura 6.23 e Figura 6.24 - $0,1 < R < 1$)	0,077 adim
2.11 Pico de sobrepressão - $(p_s - p_o)$	35,00 kPa g
2.12 Impulso - i	5,37 Pa.s
2.13 Check de p_s	OK
B) BOLA DE FOGO E DURAÇÃO	
1. CÁLCULOS E RESULTADOS	
1.1 Diâmetro final da Bola de fogo - D_c	119 m
1.2 Tempo de duração da bola de fogo - t_c	9,2 s
C) RADIAÇÃO	
1. DADOS DE ENTRADA	
1.1 Altura da Bola de Fogo até o centro - Z_c	59,60 m
1.2 Distância horizontal do receptor até o centro da bola de fogo - X	35,08 m
1.3 Potência emissiva na superfície da bola de fogo	350,00 kW/m ²
1.4 Transmissividade atmosférica	1,00 adim
2. CÁLCULOS E RESULTADOS	
2.1 Fator de vista - I	0,377 adim
2.2 Fluxo térmico radiativo para o receptor - q (Modelo da Chama Sólida)	132 kW/m ²
2.3 Fluxo térmico radiativo para o receptor - q (Método Empírico - Roberts 1982)	190 kW/m ²

j) 70 kPa

Cálculos dos Efeitos gerados por um BLEVE de GLP (considerado Propano)		
<small>© Planilha elaborada por Eduardo de Mello Schmitt (não deve ser copiada ou reproduzida sem autorização)</small>		
PROJETO: AUTO-TANQUE BOBTAIL	DATA: 2/7/2009	
A) SOBREPRESSÃO		
1. DADOS DE ENTRADA		
1.1	Pressão interna no momento da ruptura - p_1	2189,75 kPa a unid
1.2	Pressão atmosférica - p_o	101325,00 Pa a
1.3	Percentual de líquido no vaso % (mássico)	90%
1.4	Massa de propano na fase líquida - m_l	8678,66 kg
1.5	Massa de propano na fase vapor - m_v	117,13 kg
1.6	Distância do ponto de avaliação (<i>target</i>) - r	23 m
1.7	Temperatura de líquido saturado - T_{sat}	334,8 K
2. CÁLCULOS E RESULTADOS		
2.1	Energia específica de expansão fase líquida - e_{ex}	72 kJ/kg
2.2	Energia específica de expansão fase vapor - e_{ex}	166 kJ/kg
2.3	Energia de Expansão - E_{ex}	1296 MJ
2.4	Distância Reduzida - R	1,00 adim
2.5	Sobrepessão adimensional - P_s (Figura 6.22)	0,3925 adim
2.6	Impulso adimensional - I (Figura 6.23 e Figura 6.24 - $0,1 < R < 1$)	0,070 adim
2.7	Fator de ajuste de geometria para P_s (Tabelas 6.11a e 6.11b)	1,760 adim
2.8	Fator de ajuste de geometria para I (Tabelas 6.11a e 6.11b)	1,100 adim
2.9	Sobrepessão adimensional AJUSTADO - P_s (Figura 6.22)	0,691 adim
2.10	Impulso adimensional AJUSTADO - I (Figura 6.23 e Figura 6.24 - $0,1 < R < 1$)	0,077 adim
2.11	Pico de sobrepressão - $(p_s - p_o)$	70,00 kPa g
2.12	Impulso - i	5,37 Pa.s
2.13	Check de p_s	OK
B) BOLA DE FOGO E DURAÇÃO		
1. CÁLCULOS E RESULTADOS		
1.1	Diâmetro final da Bola de fogo - D_c	119 m
1.2	Tempo de duração da bola de fogo - t_c	9,2 s
C) RADIAÇÃO		
1. DADOS DE ENTRADA		
1.1	Altura da Bola de Fogo até o centro - z_c	59,60 m
1.2	Distância horizontal do receptor até o centro da bola de fogo - X	23,39 m
1.3	Potência emissiva na superfície da bola de fogo	350,00 kW/m ²
1.4	Transmissividade atmosférica	1,00 adim
2. CÁLCULOS E RESULTADOS		
2.1	Fator de vista - I	0,317 adim
2.2	Fluxo térmico radiativo para o receptor - q (Modelo da Chama Sólida)	111 kW/m ²
2.3	Fluxo térmico radiativo para o receptor - q (Método Empírico - Roberts 1982)	222 kW/m ²

ANEXO 2 – Resultados para fluxo térmico radiativo

a) 1,2 kW/m²

Cálculos dos Efeitos gerados por um BLEVE de GLP (considerado Propano)	
© Planilha elaborada por Eduardo de Mello Schmitt (não deve ser copiada ou reproduzida sem autorização)	
PROJETO: AUTO-TANQUE BOBTAIL	DATA: 2/7/2009
1. DADOS DE ENTRADA	
1.1 Pressão interna no momento da ruptura - p_i	2189,75 kPa a
1.2 Pressão atmosférica - p_o	101325,00 Pa a
1.3 Percentual de líquido no vaso % (mássico)	90%
1.4 Massa de propano na fase líquida - m_l	8678,66 kg
1.5 Massa de propano na fase vapor - m_v	117,13 kg
1.6 Distância do ponto de avaliação (target) - r	1015 m
1.7 Temperatura de líquido saturado - T_{sat}	334,8 K
B) BOLA DE FOGO E DURAÇÃO	
1. CÁLCULOS E RESULTADOS	
1.1 Diâmetro final da Bola de fogo - D_c	119 m
1.2 Tempo de duração da bola de fogo - t_c	9,2 s
C) RADIAÇÃO	
1. DADOS DE ENTRADA	
1.1 Altura da Bola de Fogo até o centro - z_c	59,60 m
1.2 Distância horizontal do receptor até o centro da bola de fogo - X	1015,00 m
1.3 Potência emissiva na superfície da bola de fogo	350,00 kW/m ²
1.4 Transmissividade atmosférica	1,00 adim
2. CÁLCULOS E RESULTADOS	
2.1 Fator de vista - I	0,003 adim
2.2 Fluxo térmico radiativo para o receptor - q (Modelo da Chama Sólida)	1,2 kW/m ²

b) 1,6 kW/m²

Cálculos dos Efeitos gerados por um BLEVE de GLP (considerado Propano)		
© Planilha elaborada por Eduardo de Mello Schmitt (não deve ser copiada ou reproduzida sem autorização)		
PROJETO: AUTO-TANQUE BOBTAIL	DATA:	2/7/2009
1. DADOS DE ENTRADA		
1.1	Pressão interna no momento da ruptura - p_i	2189,75 kPa a
1.2	Pressão atmosférica - p_o	101325,00 Pa a
1.3	Percentual de líquido no vaso % (mássico)	90%
1.4	Massa de propano na fase líquida - m_l	8678,66 kg
1.5	Massa de propano na fase vapor - m_v	117,13 kg
1.6	Distância do ponto de avaliação (<i>target</i>) - r	379 m
1.7	Temperatura de líquido saturado - T_{sat}	334,8 K
B) BOLA DE FOGO E DURAÇÃO		
1. CÁLCULOS E RESULTADOS		
1.1	Diâmetro final da Bola de fogo - D_c	119 m
1.2	Tempo de duração da bola de fogo - t_c	9,2 s
C) RADIAÇÃO		
1. DADOS DE ENTRADA		
1.1	Altura da Bola de Fogo até o centro - z_c	59,60 m
1.2	Distância horizontal do receptor até o centro da bola de fogo - X	879,00 m
1.3	Potência emissiva na superfície da bola de fogo	350,00 kW/m ²
1.4	Transmissividade atmosférica	1,00 adim
2. CÁLCULOS E RESULTADOS		
2.1	Fator de vista - I	0,005 adim
2.2	Fluxo térmico radiativo para o receptor - q (<i>Modelo da Chama Sólida</i>)	1,6 kW/m ²

c) 4,7 kW/m²

Cálculos dos Efeitos gerados por um BLEVE de GLP (considerado Propano)	
© Planilha elaborada por Eduardo de Mello Schmitt (não deve ser copiada ou reproduzida sem autorização)	
PROJETO: AUTO-TANQUE BOBTAIL	DATA: 2/7/2009
1. DADOS DE ENTRADA	
1.1 Pressão interna no momento da ruptura - p_1	2189,75 kPa a
1.2 Pressão atmosférica - p_0	101325,00 Pa a
1.3 Percentual de líquido no vaso % (mássico)	90%
1.4 Massa de propano na fase líquida - m_l	8678,66 kg
1.5 Massa de propano na fase vapor - m_v	117,13 kg
1.6 Distância do ponto de avaliação (<i>target</i>) - r	509 m
1.7 Temperatura de líquido saturado - T_{sat}	334,8 K
B) BOLA DE FOGO E DURAÇÃO	
1. CÁLCULOS E RESULTADOS	
1.1 Diâmetro final da Bola de fogo - D_c	119 m
1.2 Tempo de duração da bola de fogo - t_c	9,2 s
C) RADIAÇÃO	
1. DADOS DE ENTRADA	
1.1 Altura da Bola de Fogo até o centro - z_c	59,60 m
1.2 Distância horizontal do receptor até o centro da bola de fogo - X	509,00 m
1.3 Potência emissiva na superfície da bola de fogo	350,00 kW/m ²
1.4 Transmissividade atmosférica	1,00 adim
2. CÁLCULOS E RESULTADOS	
2.1 Fator de vista - I	0,013 adim
2.2 Fluxo térmico radiativo para o receptor - q (<i>Modelo da Chama Sólida</i>)	4,7 kW/m ²

d) 12,6 kW/m²

Cálculos dos Efeitos gerados por um BLEVE de GLP (considerado Propano)	
© Planilha elaborada por Eduardo de Mello Schmitt (não deve ser copiada ou reproduzida sem autorização)	
PROJETO: AUTO-TANQUE BOBTAIL	DATA: 2/7/2009
1. DADOS DE ENTRADA	
1.1 Pressão interna no momento da ruptura - p_i	2189,75 kPa a
1.2 Pressão atmosférica - p_o	101325,00 Pa a
1.3 Percentual de líquido no vaso % (mássico)	90%
1.4 Massa de propano na fase líquida - m_l	8678,66 kg
1.5 Massa de propano na fase vapor - m_v	117,13 kg
1.6 Distância do ponto de avaliação (<i>target</i>) - r	305 m
1.7 Temperatura de líquido saturado - T_{sat}	334,8 K
B) BOLA DE FOGO E DURAÇÃO	
1. CÁLCULOS E RESULTADOS	
1.1 Diâmetro final da Bola de fogo - D_c	119 m
1.2 Tempo de duração da bola de fogo - t_c	9,2 s
C) RADIAÇÃO	
1. DADOS DE ENTRADA	
1.1 Altura da Bola de Fogo até o centro - z_c	59,60 m
1.2 Distância horizontal do receptor até o centro da bola de fogo - X	305,00 m
1.3 Potência emissiva na superfície da bola de fogo	350,00 kW/m ²
1.4 Transmissividade atmosférica	1,00 adim
2. CÁLCULOS E RESULTADOS	
2.1 Fator de vista - I	0,036 adim
2.2 Fluxo térmico radiativo para o receptor - q (<i>Modelo da Chama Sólida</i>)	12,6 kW/m ²

e) 23 kW/m²

Cálculos dos Efeitos gerados por um BLEVE de GLP (considerado Propano)		
© Planilha elaborada por Eduardo de Mello Schmitt (não deve ser copiada ou reproduzida sem autorização)		
PROJETO: AUTO-TANQUE BOBTAIL	DATA:	2/7/2009
1. DADOS DE ENTRADA		
1.1	Pressão interna no momento da ruptura - p_1	2189,75 kPa a
1.2	Pressão atmosférica - p_0	101325,00 Pa a
1.3	Percentual de líquido no vaso % (mássico)	90%
1.4	Massa de propano na fase líquida - m_l	8678,66 kg
1.5	Massa de propano na fase vapor - m_v	117,13 kg
1.6	Distância do ponto de avaliação (<i>target</i>) - r	221 m
1.7	Temperatura de líquido saturado - T_{sat}	334,8 K
B) BOLA DE FOGO E DURAÇÃO		
1. CÁLCULOS E RESULTADOS		
1.1	Diâmetro final da Bola de fogo - D_c	119 m
1.2	Tempo de duração da bola de fogo - t_c	9,2 s
C) RADIAÇÃO		
1. DADOS DE ENTRADA		
1.1	Altura da Bola de Fogo até o centro - z_c	59,60 m
1.2	Distância horizontal do receptor até o centro da bola de fogo - X	221,00 m
1.3	Potência emissiva na superfície da bola de fogo	350,00 kW/m ²
1.4	Transmissividade atmosférica	1,00 adim
2. CÁLCULOS E RESULTADOS		
2.1	Fator de vista - I	0,065 adim
2.2	Fluxo térmico radiativo para o receptor - q (<i>Modelo da Chama Sólida</i>)	22,9 kW/m ²

f) 35 kW/m²

Cálculos dos Efeitos gerados por um BLEVE de GLP (considerado Propano)	
© Planilha elaborada por Eduardo de Mello Schmitt (não deve ser copiada ou reproduzida sem autorização)	
PROJETO: AUTO-TANQUE BOBTAIL	DATA: 2/7/2009
1. DADOS DE ENTRADA	
1.1 Pressão interna no momento da ruptura - p_i	2189,75 kPa a
1.2 Pressão atmosférica - p_o	101325,00 Pa a
1.3 Percentual de líquido no vaso % (mássico)	90%
1.4 Massa de propano na fase líquida - m_l	8678,66 kg
1.5 Massa de propano na fase vapor - m_v	117,13 kg
1.6 Distância do ponto de avaliação (<i>target</i>) - r	173 m
1.7 Temperatura de líquido saturado - T_{sat}	334,8 K
B) BOLA DE FOGO E DURAÇÃO	
1. CÁLCULOS E RESULTADOS	
1.1 Diâmetro final da Bola de fogo - D_c	119 m
1.2 Tempo de duração da bola de fogo - t_c	9,2 s
C) RADIAÇÃO	
1. DADOS DE ENTRADA	
1.1 Altura da Bola de Fogo até o centro - z_c	59,60 m
1.2 Distância horizontal do receptor até o centro da bola de fogo - X	173,00 m
1.3 Potência emissiva na superfície da bola de fogo	350,00 kW/m ²
1.4 Transmissividade atmosférica	1,00 adim
2. CÁLCULOS E RESULTADOS	
2.1 Fator de vista - I	0,100 adim
2.2 Fluxo térmico radiativo para o receptor - q (<i>Modelo da Chama Sólida</i>)	35,1 kW/m ²

g) 60 kW/m²

Cálculos dos Efeitos gerados por um BLEVE de GLP (considerado Propano)		
© Planilha elaborada por Eduardo de Mello Schmitt (não deve ser copiada ou reproduzida sem autorização)		
PROJETO: AUTO-TANQUE BOBTAIL	DATA:	2/7/2009
1. DADOS DE ENTRADA		
1.1	Pressão interna no momento da ruptura - p_i	2189,75 kPa a
1.2	Pressão atmosférica - p_o	101325,00 Pa a
1.3	Percentual de líquido no vaso % (mássico)	90%
1.4	Massa de propano na fase líquida - m_l	8678,66 kg
1.5	Massa de propano na fase vapor - m_v	117,13 kg
1.6	Distância do ponto de avaliação (<i>target</i>) - r	123 m
1.7	Temperatura de líquido saturado - T_{sat}	334,8 K
B) BOLA DE FOGO E DURAÇÃO		
1. CÁLCULOS E RESULTADOS		
1.1	Diâmetro final da Bola de fogo - D_c	119 m
1.2	Tempo de duração da bola de fogo - t_c	9,2 s
C) RADIAÇÃO		
1. DADOS DE ENTRADA		
1.1	Altura da Bola de Fogo até o centro - z_c	59,60 m
1.2	Distância horizontal do receptor até o centro da bola de fogo - X	123,00 m
1.3	Potência emissiva na superfície da bola de fogo	350,00 kW/m ²
1.4	Transmissividade atmosférica	1,00 adim
2. CÁLCULOS E RESULTADOS		
2.1	Fator de vista - I	0,171 adim
2.2	Fluxo térmico radiativo para o receptor - q (<i>Modelo da Chama Sólida</i>)	59,9 kW/m ²