



Transporte Rodoviário de Etanol: Cenários  
Acidentais Envolvendo Formação de Bola de  
Fogo (*Fireball*)

Marcelo de Miranda Cunha

Nayara Araújo Diniz Schmitz

**Projeto de Final de Curso**

**Orientador**

Prof. Carlos André Vaz Júnior, D.Sc.

Junho de 2014

# **TRANSPORTE RODOVIÁRIO DE ETANOL: CENÁRIOS ACIDENTAIS ENVOLVENDO FORMAÇÃO DE BOLA DE FOGO (*FIREBALL*)**

*Marcelo de Miranda Cunha*

*Nayara Araújo Diniz Schmitz*

Projeto de Final de Curso submetido ao Corpo Discente da Escola de Química, como parte dos requisitos necessários à obtenção do grau de Engenharia Química.

Aprovado por:

---

Nome do Membro da Banca, Título

---

Nome do Membro da Banca, Título

---

Nome do Membro da Banca, Título

Orientado por:

---

Carlos André Vaz Júnior, D.Sc.

Rio de Janeiro, RJ - Brasil

Junho de 2014

Cunha, Marcelo de Miranda.

Schmitz, Nayara Araújo Diniz.

Análise de Cenários Acidentais Envolvendo Formação de Bola de Fogo (Fireball) / Marcelo de Miranda Cunha e Nayara Araújo Diniz Schmitz. Rio de Janeiro: UFRJ/EQ, 2014.

ix, 64 p.; il.

(Projeto Final) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Escola de Química, 2014.

Orientador: Carlos André Vaz Júnior.

1. Acidente Rodoviário. 2. Etanol. 3. Fireball. 4. Software ALOHA. 5. Projeto Final. (Graduação – UFRJ/EQ). Carlos André Vaz Júnior. I. D.Sc.

## **AGRADECIMENTOS**

À nossa família, por serem nossas referências e alicerces, sempre demonstrando muito amor, dedicação e incentivo.

Aos nossos colegas de turma, com os quais compartilhamos os momentos divertidos, e também os dias de cansaço, estudando para provas e fazendo trabalhos e relatórios.

Ao nosso orientador Carlos André Vaz Júnior, pela orientação, apoio, paciência, amizade e pela grande contribuição em nossa formação acadêmica.

Aos componentes da banca examinadora, pela valiosa presença.

Aos nossos amigos mais próximos, que souberam entender os momentos de ausência e nos deram força e incentivo para concluir o trabalho.

A todos os que contribuíram, de forma direta ou indireta, para a realização deste trabalho.

Resumo do Projeto de Final de Curso apresentado à Escola de Química como parte dos requisitos necessários para obtenção do grau de Engenheiro Químico(a).

## **TRANSPORTE RODOVIÁRIO DE ETANOL: CENÁRIOS ACIDENTAIS ENVOLVENDO FORMAÇÃO DE BOLA DE FOGO (*FIREBALL*)**

Marcelo de Miranda Cunha  
Nayara Araújo Diniz Schmitz

Junho, 2014.

Orientador: Carlos André Vaz Júnior, D.Sc.

O modal rodoviário é o mais representativo no transporte de cargas no Brasil, devido ao grande investimento recebido ao longo dos anos por esse setor. O transporte de produtos perigosos por esse meio envolve uma série de riscos, principalmente o de falha humana, sendo este o que mais contribui para que tal modal apresente o maior número de acidentes com cargas perigosas. Os acidentes envolvendo produtos perigosos podem ser muito prejudiciais para a população lideira e para o meio ambiente, que podem ser afetados pela liberação do produto na atmosfera e contaminação de água e solos, além de possibilidade de incêndios e explosões. Por esse motivo, é necessário um Plano de Emergência bem elaborado, que possibilite uma rápida e eficiente ação da brigada de combate, assim como o isolamento adequado da área. O etanol apresenta elevado volume transportado por rodovias, o que aumenta a sua probabilidade de envolvimento em acidentes, e por isso merece atenção especial. O presente trabalho tem como objetivo verificar, através da simulação de diversos cenários e utilizando-se dois métodos de cálculo, se a área de isolamento proposta pela ABIQUIM no Manual para Atendimento à Emergência com Produtos Perigosos é adequada caso haja um acidente rodoviário no transporte de etanol que gere *fireball*. A área de isolamento dentro da qual a radiação emitida pela *fireball* é suficiente para causar danos aos seres humanos foi estimada em 800 metros. Este afastamento é similar aquele proposto pelo Manual da ABIQUIM. Deste modo, caso o isolamento seja adequadamente implementado pelas equipes de resposta a emergências, mesmo havendo formação de uma *fireball*, a população não será exposta a níveis inseguros de radiação.

# ÍNDICE

1	Introdução.....	1
1.1	Objetivo.....	1
2	Transporte rodoviário de cargas perigosas.....	3
2.1	Transporte de Cargas no Brasil.....	3
2.2	Transporte de Produtos Perigosos no Brasil.....	6
2.2.1	Identificação do tipo de produto perigoso transportado.....	10
2.2.2	Acidentes Rodoviários no Transporte de Produtos Perigosos.....	12
2.3	Legislação Nacional.....	14
2.4	ABIQUIM.....	15
2.5	Programa de Atendimento à Emergência (PAE).....	17
2.6	Cenários acidentais reais.....	18
2.6.1	Cenário Real 1.....	18
2.6.2	Cenário Real 2.....	19
2.6.3	Cenário Real 3.....	19
2.6.4	Cenário Real 4.....	20
3	Metodologia.....	23
3.1	Cenário Acidental Envolvendo Formação de Bola de Fogo.....	23
3.2	Fluxo de energia radiante.....	25
3.3	Modelagem da <i>Fireball</i> .....	26
3.3.1	Fração da Carga Incorporada na <i>Fireball</i> .....	26
3.3.2	Diâmetro e Duração da <i>Fireball</i> .....	27
3.3.3	Modelo de “Ponto de Origem” e “Chama Sólida”.....	29
3.3.4	Fator de Forma.....	31
3.3.5	Transmissividade Atmosférica.....	32
3.3.6	Modelagem da Radiação para <i>Fireball</i> .....	32
3.4	Software ALOHA.....	34
4	Estudo de Caso.....	36
4.1	Simulação do Cenário Acidental.....	36
4.1.1	Dimensões do tanque de etanol.....	37
4.1.2	Massa de etanol incorporada na <i>fireball</i> .....	37
4.1.3	Diâmetro e Tempo de duração.....	38

4.1.4	Distância de Separação Aceitável (ASD).....	41
4.2	Cálculo realizado pelo Software ALOHA .....	47
4.3	<i>Fireball versus Pool fire</i> .....	54
4.4	ABIQUIM.....	55
5	Conclusão .....	56
	Referências Bibliográficas.....	57
	ANEXO I – RÓTULOS DE RISCO PARA CADA CLASSE .....	61

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2-1: Distribuição modal da matriz brasileira de transportes regionais de carga em 2011. ....	3
Figura 2-2: Classificação do estado de conservação geral de rodovias pavimentadas (quanto à pavimentação, sinalização e geometria) das rodovias pesquisadas. ....	4
Figura 2-3: Classificação do estado de conservação do pavimento das rodovias pesquisadas. ....	4
Figura 2-4: Comparativo Internacional da Matriz de Transportes em 2005. ....	5
Figura 2-5: Evolução da matriz de transportes de cargas brasileira planejada para o ano de 2025. ....	6
Figura 2-6: Matriz de transporte de etanol no Brasil. ....	8
Figura 2-7: Emergências químicas atendidas pela CETESB no estado de São Paulo de 1978 a 2013 por atividade. ....	9
Figura 2-8: Emergências químicas atendidas pela CETESB no estado de São Paulo de 1978 a 2013 por classe de risco. ....	9
Figura 2-9: Exemplo de painel de segurança e rótulo de risco. ....	10
Figura 2-10: Posições do painel de segurança e do rótulo de risco no veículo. ....	11
Figura 2-11: Rótulo de risco utilizado para transporte de produtos inflamáveis. ....	11
Figura 2-12: Formas geométricas dos tanques e contêineres de transporte. ....	12
Figura 2-13: Caminhão-tanque típico utilizado para transporte de líquido inflamável com rótulo de risco e painel de segurança. ....	12
Figura 2-14: Incêndio gerado pelo acidente com caminhão transportando 8.000 galões de álcool na Califórnia. ....	21
Figura 2-15: Base do viaduto comprometida devido ao intenso calor gerado pelo incêndio. ....	22
Figura 3-1 - Fase de crescimento de um incêndio do tipo <i>fireball</i> . ....	23
Figura 3-2 - Fase estacionária de um incêndio do tipo <i>fireball</i> . ....	24
Figura 3-3 - Fase de burnout de um incêndio do tipo <i>fireball</i> . ....	24
Figura 3-4 - Modelos de radiação térmica para <i>pool fire</i> . ....	30
Figura 3-5 - Modelos de radiação térmica para <i>fireball</i> . ....	30
Figura 3-6 – Fator de forma para cenário de <i>fireball</i> . ....	31
Figura 3-7 - Fireball tocando o solo ( $Z_c = D_c / 2$ ). ....	34
Figura 4-1 - Modelo representativo de um tanque de etanol com 45,7 m <sup>3</sup> . ....	37
Figura 4-2: Variação do diâmetro da fireball em função da massa de combustível incorporada. ....	40
Figura 4-3: Variação do tempo de duração da fireball em função da massa de combustível incorporada. ....	40

Figura 4-4 - Aplicação do Teorema de Pitágoras para obtenção da ASD.....	42
Figura 4-5: Zonas de impacto calculadas pelo ALOHA para os níveis de radiação 1,4 kW/m <sup>2</sup> (amarelo), 5 kW/m <sup>2</sup> (laranja) e 10 kW/m <sup>2</sup> (vermelho), para o Cenário 1.....	50
Figura 4-6: Zonas de impacto calculadas pelo ALOHA para os níveis de radiação 1,4 kW/m <sup>2</sup> (amarelo), 5 kW/m <sup>2</sup> (laranja) e 10 kW/m <sup>2</sup> (vermelho), para o Cenário 2.....	51
Figura 4-7: Zonas de impacto calculadas pelo ALOHA para os níveis de radiação 1,4 kW/m <sup>2</sup> (amarelo), 5 kW/m <sup>2</sup> (laranja) e 10 kW/m <sup>2</sup> (vermelho), para o Cenário 3.....	53
Figura 4-8: Sobreposição das zonas de ameaça para os cenários acidentais 1, 2 e 3.....	53

## ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 2-1: Distribuição entre as rodovias brasileiras pavimentadas e não pavimentadas em abril de 2014. ....	4
Tabela 2-2: Classificação de Produtos Perigosos. ....	7
Tabela 2-3: Significado das cores do rótulo de risco. ....	10
Tabela 2-4: Acidentes de trânsito por fator contribuinte no ano de 2004. ....	13
Tabela 3-1: Critérios de queimaduras por radiação térmica. ....	25
Tabela 3-2 - Consequências da exposição da madeira em radiação térmica. ....	26
Tabela 3-3 – Relações empíricas para diâmetros e durações de <i>fireballs</i> . ....	28
Tabela 4-1 - Calor de combustão para líquidos perigosos. ....	44
Tabela 4-2 - Comparação entre os valores obtidos para ASD utilizando-se $R=0,4$ e $R=0,3$ . ....	47
Tabela 4-3 - Comparação entre os resultados obtido pelo ALOHA e pela metodologia de cálculo proposta pelo CCPS, para o cenário 1. ....	49
Tabela 4-4 - Comparação entre os resultados obtido pelo ALOHA e pela metodologia de cálculo proposta pelo CCPS, para o cenário 2. ....	51
Tabela 4-5 - Comparação entre os resultados obtido pelo ALOHA e pela metodologia de cálculo proposta pelo CCPS, para o cenário 3. ....	52

# 1 INTRODUÇÃO

Os acidentes com produtos perigosos têm sido objeto de grande preocupação em função dos perigos intrínsecos destes materiais (inflamabilidade, toxicidade, corrosividade, entre outros) representando, portanto, riscos à segurança e a saúde da população, bem como ao meio ambiente. Severos impactos ambientais podem advir das emergências químicas.

De todos os acidentes envolvendo produtos perigosos ocorridos de 1978 a 2013 no estado de São Paulo, o tipo de carga com maior representatividade foi líquidos inflamáveis, com 36% das ocorrências e o setor mais afetado foi o de transporte rodoviário, com 44%. (CETESB. Gerador de Relatórios de Emergências Químicas). O transporte de etanol no país por meio rodoviário corresponde a cerca de 90% do escoamento deste combustível. (MILANEZ et al, 2010 apud VIDAL NETO, 2013, p.8). Dado o grande domínio do modal rodoviário em seu transporte e o fato do etanol ser um produto altamente inflamável, mostra-se importante uma Análise Quantitativa de Riscos (AQR) dos cenários acidentais. Na ocorrência de acidentes durante o seu transporte podem haver danos às pessoas, construções e ao meio ambiente. Em um cenário de acidente envolvendo produtos químicos em geral, é muito frequente a ocorrência de situações perigosas como o vazamento de substâncias tóxicas, corrosivas, oxidantes ou inflamáveis. Dentre os diversos fenômenos que podem ocorrer numa emergência química, este trabalho destaca a formação de *fireballs* (bolas de fogo).

Na ocorrência de um acidente é imprescindível uma resposta rápida e eficaz das equipes de resposta, sendo necessários protocolo e treinamento específicos. O “Manual de Atendimento a Emergência para Produtos Perigosos”, da ABIQUIM (Associação Brasileira da Indústria Química), é uma importante fonte de consulta, pois fornece informações rápidas e precisas para cada tipo de produto, auxiliando os profissionais nas decisões iniciais.

## 1.1 Objetivo

O presente trabalho tem como objetivo complementar o estudo realizado por Vidal Neto (2013), que avaliou se a área de isolamento inicial proposta pelo Manual da ABIQUIM no caso de ocorrência de incêndio em poça proveniente de acidente rodoviário envolvendo etanol é satisfatória para evitar danos às pessoas do entorno.

Neste estudo serão simulados diversos cenários onde ocorre formação de *fireball*. Em cada cenário será calculada a distância de separação aceitável ou segura (ASD – Acceptable Separation Distance), que será obtida através da metodologia proposta pelo CCPS (Center for Chemical Process Safety). Foi utilizado ainda o software ALOHA. O objetivo final é verificar se a área de isolamento presente no Manual para Atendimento à Emergência com Produtos Perigosos da ABIQUIM é adequada caso ocorra formação de *fireball*.

## 2 TRANSPORTE RODOVIÁRIO DE CARGAS PERIGOSAS

### 2.1 Transporte de Cargas no Brasil

O modal rodoviário é de longe o principal e mais importante meio de transporte de cargas no Brasil. A preferência pelas estradas se iniciou na década de 50, com a política para crescer “50 anos em 5” do presidente Juscelino Kubitschek. Embora algumas análises mostrassem que o melhor modal para um país de dimensões continentais como o Brasil seria o ferroviário, o presidente decidiu construir milhares de quilômetros de rodovias, uma vez que dada a sua construção mais rápida, o rápido crescimento do país seria possível. (CNT, 2010).

Os governos sucessores continuaram a priorizar o transporte rodoviário e o número de rodovias só aumentou. Segundo a Confederação Nacional do Transporte, CNT (2013), existem cinco modais que realizam o transporte de cargas no país: rodoviário, ferroviário, aquaviário (cabotagem + hidroviário), dutoviário e aéreo. De acordo com a Secretaria de Políticas Nacional de Transportes / Ministério dos Transportes, SPNT/MT (2012), 52% das cargas transportadas no país em 2011 utilizaram o modal rodoviário, o que corresponde a mais de 600 bilhões de TKU's (toneladas transportadas por quilômetro útil) conforme pode ser visualizado na Figura 2-1. O setor aéreo correspondeu a menos de 1%.

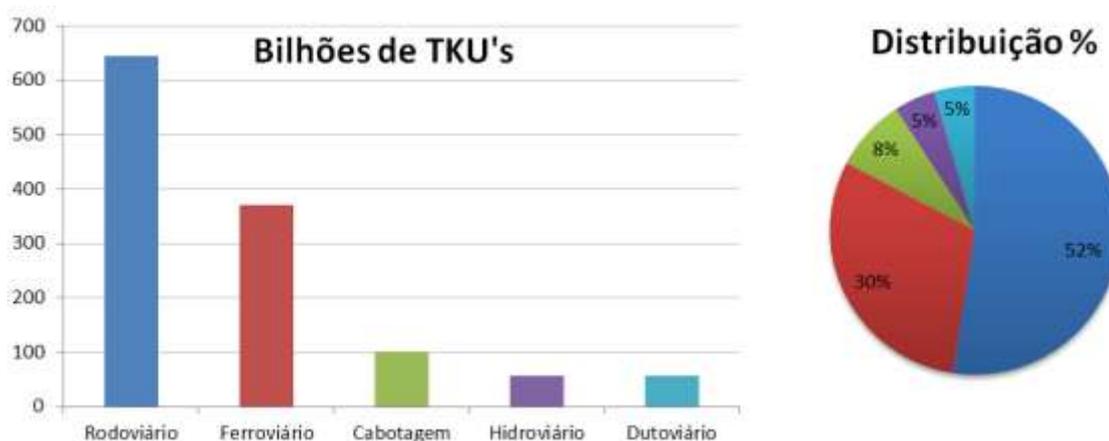


Figura 2-1: Distribuição modal da matriz brasileira de transportes regionais de carga em 2011. Fonte: SPNT/MT, 2012.

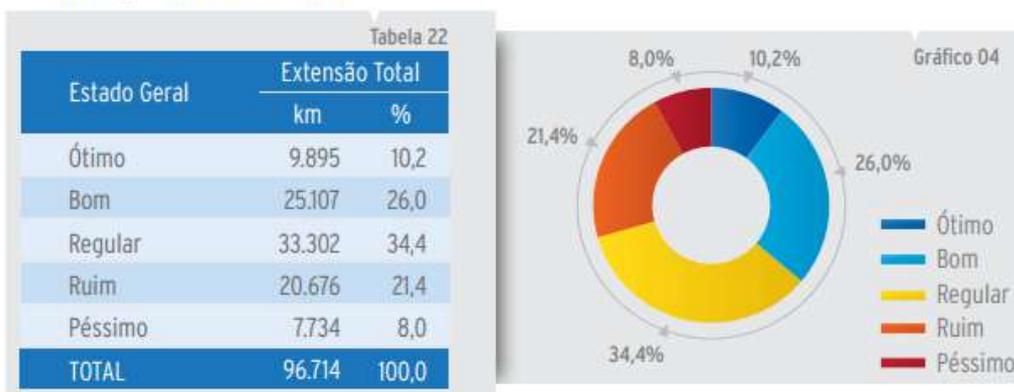
Apesar do grande predomínio no incentivo para a construção de novas estradas e ampliação do modal rodoviário, o investimento na manutenção das mesmas muitas vezes não acompanhou seu crescimento. De acordo com o boletim estatístico do CNT (abril/2014), apenas 12% da quilometragem total de rodovias é asfaltada, como pode ser

visto na Tabela 2-1. Dentre as estradas pavimentadas, dos 96.714 quilômetros pesquisados, 63,8% possui “inadequação” no estado geral da via (pavimentação, sinalização e geometria) e 46,9% dessa extensão possui pavimento com “inadequação”, tendo sido avaliados como “péssimo”, “ruim” ou “regular”. (CNT, 2013). Essas informações podem ser visualizadas, respectivamente, na Figura 2-2 e na Figura 2-3.

**Tabela 2-1: Distribuição entre as rodovias brasileiras pavimentadas e não pavimentadas em abril de 2014. Fonte: CNT, 2014**

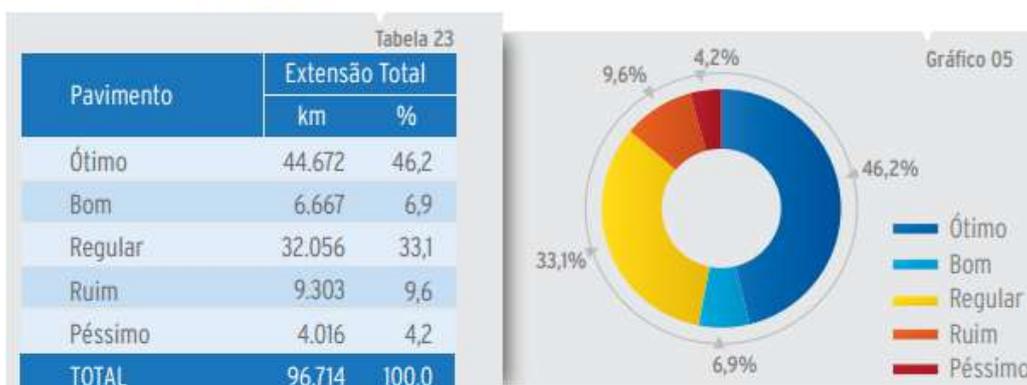
Malha Rodoviária - extensão em Km			
	Pavimentada	Não Pavimentada	Total
Federal	65.930	12.577	78.507
Estadual	110.842	111.334	222.176
Municipal	26.827	1.234.918	1.261.745
Rede Planejada			129.095
<b>Total</b>	<b>203.599</b>	<b>1.358.829</b>	<b>1.691.522</b>

### Classificação do Estado Geral



**Figura 2-2: Classificação do estado de conservação geral de rodovias pavimentadas (quanto à pavimentação, sinalização e geometria) das rodovias pesquisadas. Fonte: CNT, 2013**

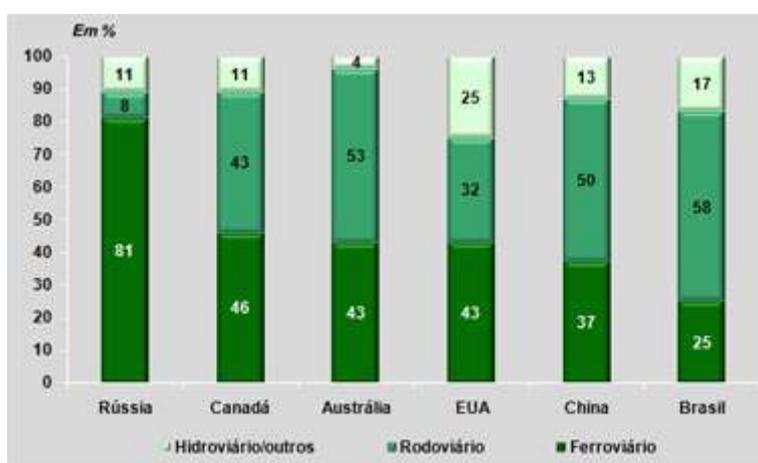
### Classificação do Pavimento



**Figura 2-3: Classificação do estado de conservação do pavimento das rodovias pesquisadas. Fonte: CNT, 2013.**

Aliado à precariedade das estradas brasileiras e das grandes dimensões do país, a quantidade de carga transportada em cada caminhão é muito menor quando comparada a quantidade por trem, fazendo com que o custo por tonelada desse transporte seja o mais elevado dentre todos os modais (com exceção do aéreo) e que haja perda de competitividade dos produtos no mercado internacional.

Ao comparar a matriz de transportes de carga brasileira com a de outros países de grandes dimensões territoriais, conforme Figura 2-4, é possível perceber a grande disparidade na utilização de ferrovias. Isso se deve ao fato de o transporte ferroviário, assim como o aquaviário, serem mais vantajosos, do ponto de vista econômico, para transportes a distâncias médias e longas do que o rodoviário. (SPNT/MT, 2012).



**Figura 2-4: Comparativo Internacional da Matriz de Transportes em 2005. Fonte: SPNT/MT, 2012.**

Devido a problemática encontrada pela grande representatividade do modal rodoviário no transporte de cargas no Brasil, o governo federal elaborou em 2005 um projeto denominado Plano Nacional de Logística e Transportes (PNLT), cuja principal meta é “*paulatinamente dar maior equilíbrio à repartição modal de transportes, com racionalização do uso do modal rodoviário no atendimento de demandas com maior capilaridade e no complemento dos demais modais. Com a devida utilização de cada um dos modais de acordo com sua principal vocação, o equilíbrio da matriz será alcançado com a redução da participação do modal rodoviário e o aumento da participação relativa dos outros modais*”. (SPNT/MT, 2012). Com isso, planeja-se uma redução gradual do modal rodoviário até 2025, com consecutivo aumento da participação dos modais ferroviários e aquaviários, com o objetivo de se reduzir os custos com transporte e tornar o país mais competitivo internacionalmente. A evolução programada do uso de ferrovias e hidrovias é ilustrada na Figura 2-5.



Figura 2-5: Evolução da matriz de transportes de cargas brasileira planejada para o ano de 2025.  
Fonte: TRANSPORTA BRASIL, 2012.

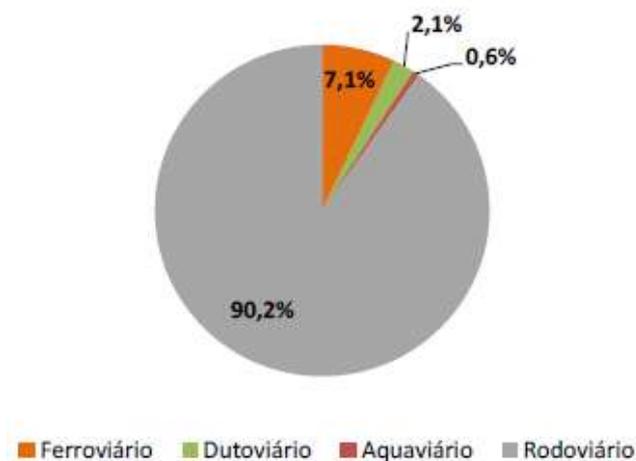
## 2.2 Transporte de Produtos Perigosos no Brasil

Os produtos perigosos são materiais com potencial para causar danos a pessoas, instalações e ao meio ambiente caso escapem do meio no qual se encontram confinados. De acordo com a Organização das Nações Unidas (ONU), as substâncias perigosas podem ser divididas em nove classes com suas respectivas subclasses, de acordo com suas propriedades, como: radioatividade, corrosividade, toxicidade, entre outras, conforme Tabela 2-2. (ANTT, 2004).

Tabela 2-2: Classificação de Produtos Perigosos. Fonte: ANTT, 2004.

Classificação	Subclasse	Definições
Classe 1 - Explosivos	1.1	Substâncias e artigos com risco de explosão em massa
	1.2	Substâncias e artigos com risco de projeção, mas sem risco de explosão em massa
	1.3	Substâncias e artigos com risco de fogo e com pequeno risco de explosão, de projeção, ou ambos, mas sem risco de explosão em massa
	1.4	Substâncias e artigos que não apresentam risco significativo
	1.5	Substâncias muito insensíveis, com um risco de explosão em massa
	1.6	Artigos extremamente insensíveis, sem risco de explosão em massa
Classe 2 - Gases	2.1	Gases inflamáveis
	2.2	Gases não-inflamáveis, não-tóxicos
	2.3	Gases tóxicos
Classe 3 - Líquidos Inflamáveis	-	Líquidos Inflamáveis
Classe 4 - Sólidos Inflamáveis, Substâncias auto-reagentes e correlatas e explosivos insensibilizados	4.1	Sólidos Inflamáveis
	4.2	Substâncias Sujeitas a Combustão Espontânea
	4.3	Substâncias que, em Contato com a Água, Emitem Gases Inflamáveis
Classe 5 - Substâncias Oxidantes - Peróxidos Orgânicos	5.1	Substâncias Oxidantes
	5.2	Peróxidos Orgânicos
Classe 6 - Substâncias Tóxicas (Venenosas) - Substâncias Infectantes	6.1	Substâncias Tóxicas (Venenosas)
	6.2	Substâncias Infectantes
Classe 7 - Material Radioativo	-	Material com Radionuclídeos
Classe 8 - Material Corrosivo	-	Material Corrosivo
Classe 9 - Substâncias e Artigos Perigosos Diversos	-	Material com Risco não Abrangido pelas outras Classes

O etanol é um líquido inflamável e o seu modal de transporte mais representativo é o rodoviário, correspondendo a 90% do volume total de etanol transportado, de acordo com a Figura 2-6. O volume transportado pelo modal ferroviário (7%) é quase que exclusivamente movimentado pela empresa ALL, ligando a região Centro Oeste ao Sul do Brasil. (MILANEZ et al, 2010 apud VIDAL NETO, 2013, p.8).



**Figura 2-6: Matriz de transporte de etanol no Brasil. Fonte: MILANEZ et al, 2010 apud VIDAL NETO, 2013).**

Em qualquer etapa do processo de transporte, manipulação ou utilização de produtos perigosos, existe a probabilidade de ocorrência de acidentes. No entanto, de acordo com a base de dados presente no Gerador de Relatórios de Emergências Químicas da Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental do Estado de São Paulo (CETESB) as operações de transporte são as mais vulneráveis, porque estão expostas a uma infinidade de fatores externos e possuem menor poder de controle. Esse fato pode ser visualizado na Figura 2-7, onde é possível notar que o setor mais afetado por emergências nas últimas décadas foi o de transporte rodoviário (44% dos atendimentos). A classe de risco com maior número de acidentes foi a de líquidos inflamáveis (36% dos atendimentos), como apresentado na Figura 2-8. Esses dois dados mostram a relevância da simulação de acidentes envolvendo o transporte rodoviário de líquidos inflamáveis no Brasil.

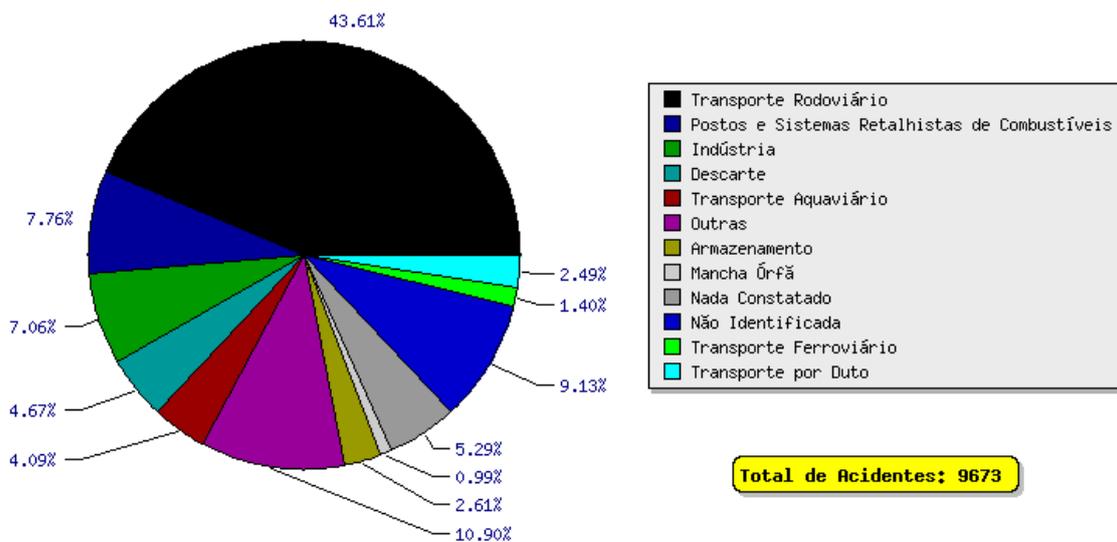


Figura 2-7: Emergências químicas atendidas pela CETESB no estado de São Paulo de 1978 a 2013 por atividade. Fonte: CETESB. Gerador de Relatórios de Emergências Químicas.

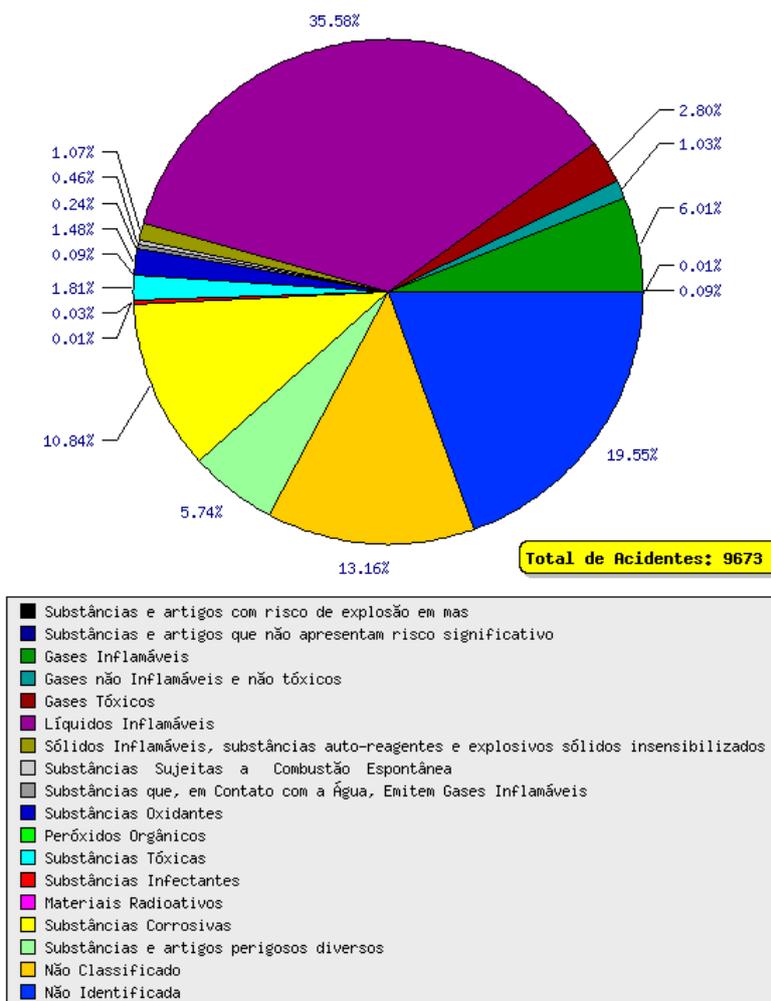


Figura 2-8: Emergências químicas atendidas pela CETESB no estado de São Paulo de 1978 a 2013 por classe de risco. Fonte: CETESB. Gerador de Relatórios de Emergências Químicas.

## 2.2.1 Identificação do tipo de produto perigoso transportado

A Agência Nacional de Transportes Terrestres (ANTT) é a responsável por regular os transportes terrestres de carga, tanto rodoviário quanto ferroviário. A Resolução 420 de 12 de fevereiro de 2004 estabelece as regras para a movimentação de cargas perigosas no país.

Uma das regras estabelecidas pela ANTT é referente à identificação visual do tipo de carga que está sendo transportada. Tal identificação é realizada através de uma simbologia e sinalização padrão, composta por um painel de segurança da cor laranja e um rótulo de risco com coloração correspondente à classe de risco (conforme ilustrado na Tabela 2-3). O painel de segurança contém o número de risco e o número da ONU, e o rótulo de risco possui o símbolo de risco e a classe/subclasse de risco, conforme Figura 2-9. Ambos devem possuir tinta reflexiva para transporte a noite e são alocados no veículo nas posições indicadas na Figura 2-10. Os rótulos para cada classe, estabelecidos na resolução 420 da ANTT, estão ilustrados no Anexo I. A Figura 2-11 ilustra os rótulos de risco utilizados para líquidos inflamáveis, que é o caso do etanol.

Tabela 2-3: Significado das cores do rótulo de risco. Fonte: OLIVEIRA, 2000 apud MARGARIDA, 2008.

CORES	SIGNIFICADO
Vermelho	Inflamável/Combustível
Verde	Gás não inflamável
Laranja	Explosivos
Amarelo	Oxidantes/oxigênio
Preto/Branco	Corrosivos
Amarelo/Branco	Radioativos
Vermelho/Branco listado	Sólido inflamável
Azul com W cortado	Perigoso quando molhado
Branco	Veneno

Painel de Segurança



Rótulo de Risco

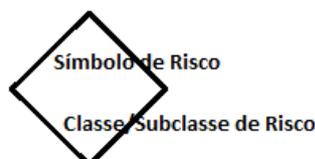


Figura 2-9: Exemplo de painel de segurança e rótulo de risco. Fonte: ANTT, 2004.

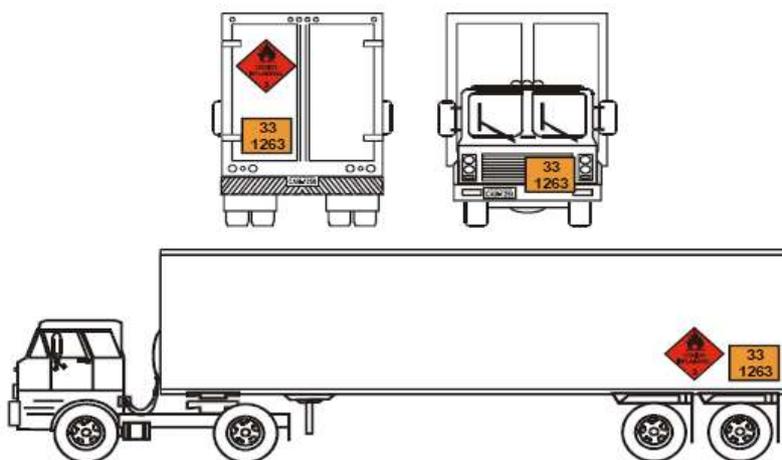


Figura 2-10: Posições do painel de segurança e do rótulo de risco no veículo. Fonte: MT/ANTT, 2006 apud MARGARIDA, 2008.

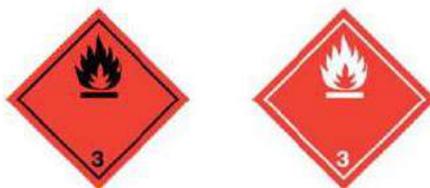


Figura 2-11: Rótulo de risco utilizado para transporte de produtos inflamáveis. Fonte: ANTT, 2004.

O formato do caminhão também é dependente do tipo de substância transportada. O transporte rodoviário de produtos perigosos se faz, na maioria dos casos, em caminhões ou carretas, que podem conter embalagens, ou alternativamente em caminhões-tanque, ou ainda em veículos especializados em carregamento de sólidos (ABIQUIM, 2011). A Figura 2-12 ilustra alguns exemplos. O transporte de etanol, assim como o de outros líquidos inflamáveis, ocorre em caminhões-tanque não pressurizados, como o apresentado na Figura 2-13.

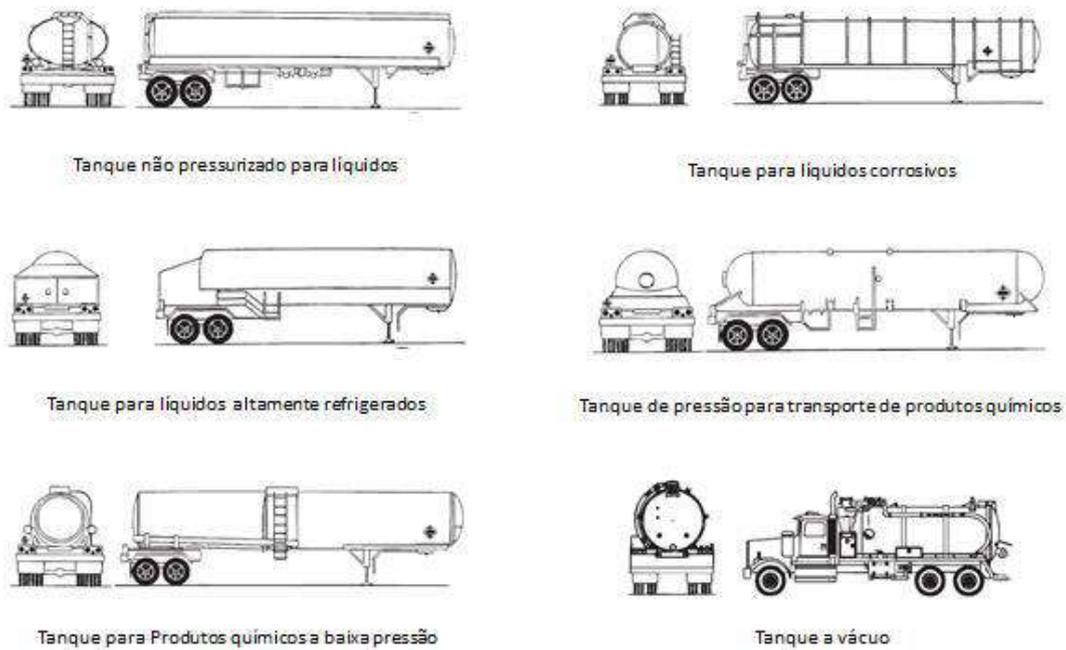


Figura 2-12: Formas geométricas dos tanques e contêineres de transporte. Fonte: ABIQUIM, 2011.



Figura 2-13: Caminhão-tanque típico utilizado para transporte de líquido inflamável com rótulo de risco e painel de segurança. Fonte: BLOG VIVO NO TRÂNSITO.

### 2.2.2 Acidentes Rodoviários no Transporte de Produtos Perigosos

Conforme mencionado, a possibilidade de acidente existe nas mais variadas etapas do processo de fabricação, transporte e utilização dos produtos perigosos, mas é a etapa de transporte rodoviário a mais afetada. A estrutura das rodovias brasileiras, o baixo índice de pavimentação e seu estado de conservação são fatores que contribuem para a ocorrência de acidentes rodoviários. No entanto, falhas mecânicas e falha humana

são também fatores causadores de acidentes, sendo o último o mais representativo. Dentre os motivos classificados como falha humana estão: falta de atenção, adormecimento ao volante, excesso de velocidade, ultrapassagens inseguras, dentre outros. (CUNHA, 2009). A Tabela 2-4 apresenta estatísticas de fatores contribuintes para acidentes atendidos pela Polícia Rodoviária Federal, sendo 58% dos registros causados por componentes humanos/comportamentais, 3% por falha mecânica e 3% por problemas na via.

**Tabela 2-4: Acidentes de trânsito por fator contribuinte no ano de 2004. Fonte: IPEA, DENATRAN e ANTT (2006 apud CUNHA, 2009).**

<b>Fatores Contribuintes</b>	<b>Nº de Acidentes</b>	<b>%</b>
<b>Componentes humanos / comportamentais</b>	<b>65.608</b>	<b>58,3</b>
Falta de atenção	31.736	28,2
Velocidade incompatível	12.439	11,1
Distância de segmento	9.774	8,7
Desobediência à sinalização	4.971	4,4
Ultrapassagem indevida	3.862	3,4
Adormecimento	1.923	1,7
Ingestão de álcool	903	0,8
<b>Veículo</b>	<b>3.756</b>	<b>3,3</b>
Defeito mecânico em veículo	3.756	3,3
<b>Via</b>	<b>3.879</b>	<b>3,4</b>
Buraco na via	2.313	2,1
Defeito na via	1.566	1,4
<b>Outras Causas</b>	<b>39.214</b>	<b>34,9</b>
<b>Total</b>	<b>112.457</b>	<b>100,0</b>

Além dos fatores geradores de acidentes citados, existem ainda fatores agravantes. Dentre estes destaca-se a urbanização no entorno das rodovias, o que eleva a densidade demográfica nas proximidades da malha viária. Esse fato pode gerar acidentes que envolvam o atropelamento de pedestres ou animais que atravessem a pista ou até colisões causadas na tentativa de evitar acidentes. Existe ainda o aumento da probabilidade de colisão com veículos que entram e saem das vias internas. Além de aumentarem a probabilidade de acidentes, a presença de populações vizinhas aumenta o número de vítimas caso um cenário acidental envolvendo produtos perigosos venha a acontecer. (VIDAL NETO, 2013).

Um acidente rodoviário com veículo transportando um líquido inflamável pode gerar derramamentos, com contaminação de solos e/ou ambientes aquáticos; incêndios e/ou explosões.

No caso da ocorrência de incêndio, existe a possibilidade do fogo se alastrar para áreas vizinhas, atingindo árvores e/ou edificações, podendo ainda atingir outros possíveis veículos. O fogo pode causar queimaduras e morte.

O cenário de explosão pode ser causado por um incêndio proveniente do acidente, gerando um *BLEVE*<sup>1</sup>. Nesse tipo de explosão ocorre uma forte onda de pressão e formação de bola de fogo, com intensa emissão de calor. Essa explosão pode resultar ainda no lançamento de fragmentos, denominado “efeito granada”. Além de causar danos patrimoniais, explosões podem ser fatais para socorristas e população vizinha. (VIDAL NETO, 2013).

### **2.3 Legislação Nacional**

Segundo Costa e Ribeiro (2011), o Brasil foi o primeiro país da América Latina a regulamentar o transporte de produtos perigosos. O motivador para a criação de uma legislação específica foi o acidente ocorrido em março de 1982 durante o transporte do produto pentaclorofenato de sódio (pó da china), que vitimou 6 pessoas no Rio de Janeiro. Nessa época, entrou em vigor o Decreto-Lei 2.063, de 6 de outubro de 1983, regulamentado pelo decreto 88.821, de 6 de outubro de 1983.

Tal decreto baseou-se em uma compilação de leis de outros países, tentando adaptá-las à realidade brasileira. Para Costa e Ribeiro (2011), acabou sendo impraticável em muitos aspectos, rigoroso em excesso em outros, e até injusto uma vez que penalizava apenas o transportador em caso de acidentes. Foi substituído pelo Decreto 96.044, de 18 de maio de 1988, estando em vigor até hoje. Segundo Torrero

---

<sup>1</sup>Uma das causas de explosão de tanques contendo líquido combustível é quando este é continuamente aquecido por uma fonte de calor externa, como um incêndio. O líquido entra em ebulição no interior do tanque, aumentando sua pressão interna. Ao mesmo tempo o aquecimento da estrutura do vaso reduz sua resistência. A combinação de perda de resistência por aquecimento e elevação da pressão interna pode ocasionar a explosão. Este cenário é conhecido como “BLEVE” (*Boiling Liquid Expanding Vapor Explosion*). Fonte: VIDAL NETO, 2013.

(2013), para complementar esse decreto e acrescentar instruções para o transporte desses produtos, em 12 de fevereiro de 2004 a ANTT aprovou a Resolução nº 420.

Em 20 de maio de 1997 o Ministério dos Transportes instituiu a Portaria nº 204, na qual torna obrigatória a realização do MOPP (Curso de Movimentação e Operação de Produtos Perigosos) por todos os motoristas que transportam cargas perigosas no país. Esse curso tem como objetivo instruir os condutores sobre os perigos intrínsecos ao transporte desse tipo de produtos, além de apresentar a legislação e normas relacionadas ao transporte, a responsabilidade do condutor e o que fazer caso algum acidente venha a ocorrer. (MT, 1997).

Além da legislação federal, alguns estados possuem suas próprias leis e resoluções que tratam do assunto, mas poucos municípios seguem esse padrão. Somente a utilização da legislação federal e estadual não garante o bom funcionamento do transporte, uma vez que cada cidade tem a sua particularidade. Uma das cidades que possui legislação própria neste setor é São Paulo. (COSTA E RIBEIRO, 2011).

## **2.4 ABIQUIM**

A Associação Brasileira da Indústria Química (ABIQUIM) é uma entidade sem fins lucrativos. Fundada em 16 de junho de 1964, atualmente congrega 117 indústrias químicas de pequeno, médio e grande porte, assim como prestadores de serviços ao setor nas áreas de logística, transporte, gerenciamento de resíduos e atendimento a emergências. Ela está estruturada para realizar o acompanhamento estatístico do setor, promover estudos específicos sobre as atividades e produtos da indústria química, acompanhar as mudanças na legislação e assessorar as empresas associadas em assuntos econômicos, técnicos e de comércio exterior. Sua missão é promover o aumento da competitividade e o desenvolvimento sustentável da indústria química instalada no país. (ABIQUIM, 2012).

A entidade é formada por comissões temáticas e setoriais constituídas por técnicos e dirigentes das empresas associadas. Uma das comissões temáticas existentes é a comissão de logística, que tem como missão não apenas acompanhar e divulgar projetos de lei e normas para a área, mas também contribuir para sua elaboração. A comissão visa ainda manter um sistema de avaliação dos transportadores e estimular a troca de experiências entre os participantes. (ABIQUIM, 2012).

Em 1989 a ABIQUIM desenvolveu o Programa Pró-Química, um sistema de informações e comunicações cujo objetivo é fornecer, via telefone, orientações de natureza técnica em caso de emergências com produtos químicos, além de estabelecer contato com o produtor, transportador, destinatário, bem como Polícia Militar, Polícia Rodoviária, Corpo de Bombeiros, Defesa Civil, Órgãos Ambientais, etc. O programa pode também fornecer informações sobre produtos químicos e orientações de precaução. Sua central de atendimento funciona 24 horas por dia, 7 dias por semana. (ABIQUIM, 2012).

Em maio de 2001 a ABIQUIM criou um sistema que abrange todos os modais de transporte, bem como Terminais de Armazenagem e Estações de Limpeza. Este sistema foi denominado Sistema de Avaliação de Segurança, Saúde, Meio Ambiente e Qualidade (SASSMAQ). Este realiza avaliação do desempenho nas áreas de segurança, saúde, meio ambiente e qualidade das empresas que prestam serviços à indústria química. Desde 2005 as empresas associadas à Abiquim possuem o compromisso de somente contratar empresas avaliadas pelo SASSMAQ. Com isso, objetiva-se reduzir, de forma contínua e progressiva, os riscos de acidentes nas operações de transporte e distribuição de produtos químicos. (ABIQUIM, 2012).

Outro programa lançado pela ABIQUIM, em parceria a Abiclor, é o “Olho Vivo na Estrada”, que tem como objetivo prevenir atitudes inseguras no transporte de produtos perigosos por meio da conscientização e treinamento dos motoristas. O conceito básico do programa é que, antes de um grande acidente, ocorreram várias pequenas falhas nos equipamentos ou nas operações, que não foram comunicadas à empresa. O “Olho Vivo na Estrada” incentiva o motorista a relatar essas ocorrências, possibilitando a adoção de ações preventivas ou corretivas, assim como treiná-los para que exerçam direção segura e dirijam defensivamente. A meta do programa é a redução a zero no número de acidentes com produtos químicos nas estradas. O treinamento dos motoristas profissionais é ministrado pelo SEST/SENAT (Serviço Social do Transporte / Serviço Nacional de Aprendizagem do Transporte). (ABIQUIM, 2012).

Em 1989 a ABIQUIM lançou o “Manual de Atendimento a Emergências com Produtos Perigosos”, que surgiu da necessidade de se ter uma fonte de consulta rápida e confiável para situações de emergência, onde as principais informações relacionadas sobre o produto estivessem disponíveis. (ABIQUIM, 2012).

O manual possui como base a Resolução nº 420/04 da ANTT e orientações para o transporte terrestre de produtos perigosos da ONU e de outros países.

Aproximadamente 3,5 mil produtos químicos estão catalogados. Desde sua criação, o manual recebe atualizações, para se adequar as mudanças e melhorias realizadas na legislação e normas que regulam o transporte de cargas perigosas no Brasil.

Inicialmente o Manual apresenta a sequência de ações que devem ser realizadas e precauções que devem ser tomadas em casos de emergência com produtos perigosos, tais como a identificação do produto envolvido, isolamento da área, ações de controle e a comunicação às autoridades responsáveis. Algumas dessas ações podem necessitar de informações complementares, como formas de identificação do tipo de produto pelo rótulo de risco e definição da área de isolamento.

Nas páginas amarelas e azuis do Manual é possível identificar os produtos perigosos em ordem crescente do número ONU e alfabética, respectivamente.

As páginas com borda laranja apresentam as guias com as indicações para grupos de substâncias com características químicas e de perigo semelhantes. Nessas guias é possível identificar a classe a qual a substância pertence e seus riscos potenciais. Ainda nesta parte do Manual é mostrado um tópico de segurança pública que contém informações sobre isolamento imediato, vestimentas de proteção que devem ser utilizadas e área de evacuação em caso de explosão ou vazamento. A direita de cada guia pode ser encontrado um tópico de ações de emergência para o caso de grandes, médios e pequenos incêndios e vazamentos.

Finalmente nas páginas verdes são apresentados os produtos tóxicos por inalação, as distâncias de isolamento inicial e de proteção ao público na direção do vento e um breve procedimento para o uso destas informações.

## **2.5 Programa de Atendimento à Emergência (PAE)**

Em uma operação de emergência, como no caso de acidentes no transporte de produtos perigosos, o fator tempo é considerado como a diferença entre o sucesso e o fracasso da operação. Além do treinamento das equipes e da planificação das ações de resposta, a utilização de um Sistema de Informações (como o da Pró-Química) e a existência de Planos ou Procedimentos de Emergência bem estruturados, são fundamentais, a fim de minimizar as consequências para a população e para o meio ambiente. (DNIT – Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes, 2005).

O Plano de Atendimento à Emergência (PAE) deve ser capaz de guiar os socorristas corretamente. Ele contém todos os procedimentos que devem ser realizados

para um dado tipo de produto e de acidente, a fim de que não haja perda de tempo para elaboração de uma estratégia e que todos os envolvidos tenham sido previamente treinados para agir naquela situação. Deve conter ainda medidas preventivas a serem implementadas nas rodovias, a fim de se evitar ou minimizar as consequências. (DNIT, 2005).

O DNIT desenvolveu um manual para implementação de um PAE que atue em acidentes rodoviários no transporte de produtos perigosos. Segundo este, deve ser especificada toda a logística necessária de atendimento, serviços e equipamentos para orientação às ações de isolamento, sistema de resgate de vítimas, operações de neutralização do produto, disposição e transbordo de produtos, operação de rescaldo e recuperação ambiental com ações para eliminar ou minimizar as consequências do vazamento do produto perigoso (DNIT, 2005).

## **2.6 Cenários acidentais reais**

Cenários acidentais reais mostram o quão severo pode ser um acidente envolvendo esse tipo de carga, podendo haver morte de pessoas e grande prejuízo financeiro e ambiental. Corroboram também para a importância do cumprimento de medidas preventivas, da necessidade de rápida intervenção isolando a área, do desenvolvimento de estudos que minimizem os danos causados por esse tipo de acidente, etc.

### **2.6.1 Cenário Real 1**

De acordo com o site Produtos Perigosos PRF, no dia 04 de dezembro de 2013, um condutor embriagado e transportando um produto perigoso com número ONU 3077 (nome não identificado), se envolveu em um acidente na BR-116, na localidade de Serra do Azeite, estado de São Paulo.

Os policiais que realizaram o atendimento da emergência submeteram o condutor ao teste do bafômetro, que acusou uma concentração de 0,63mg/L de ar expelido. De acordo com o site da Operação Lei Seca, promovida pelo Governo do Estado de Janeiro (2014), o condutor que atingir ou ultrapassar o limite 0,30 mg de álcool por litro de ar expelido dos pulmões no teste do bafômetro comete crime de trânsito previsto no artigo 306 do Código Brasileiro de Trânsito, ou seja, o condutor do veículo ingeriu mais do que duas vezes a quantidade de álcool que configura em crime.

Além disso, o veículo circulava com simbologia de outro produto, e o condutor não trajava a vestimenta mínima exigida para o transporte desse tipo de carga.

Esse caso não apresentou feridos ou contaminação, mas ilustra o despreparo de alguns motoristas que transportam cargas perigosas no país, assim como o descaso de algumas empresas com a regulação vigente, colocando em risco seus próprios funcionários, a população, o meio ambiente e patrimônios públicos e privados.

### **2.6.2 Cenário Real 2**

De acordo com a Revista VEJA (1998), na madrugada do dia 8 de setembro de 1998, um caminhão-tanque carregando 6.000 litros de gasolina e 26.000 litros de óleo diesel, ambos líquidos inflamáveis, perdeu o controle e tombou num canteiro da Via Anhanguera, na região das Araras, interior de São Paulo.

Segundos após a colisão, o caminhão-tanque pegou fogo e foi formada uma cortina de fumaça que reduziu a visibilidade dos motoristas de um outro caminhão que carregava aguardente, de dois ônibus que transportavam ao todo 101 pessoas, e de um automóvel, provocando a colisão destes veículos com o caminhão-tanque. O combustível que vazou escorreu pelo canteiro da pista por 500 metros, provocando uma poça e posteriormente um incêndio, fazendo com que outros veículos também pegassem fogo. Das 108 pessoas envolvidas no acidente, 53 morreram carbonizadas ou asfixiadas, e 35 tiveram ferimentos.

### **2.6.3 Cenário Real 3**

Conforme informação presente na Revista Meio Ambiente Industrial da CETESB (2003), no dia 23 de fevereiro de 2002 um caminhão-tanque transportando 19.640 litros de Gás Liquefeito de Petróleo (GLP), extremamente inflamável, desgovernou-se na Rodovia Fernão Dias, no estado de São Paulo e colidiu contra a defesa de concreto de proteção e separação das pistas da rodovia, tombou para o lado esquerdo e ficou atravessado na pista.

O motorista, que não sofreu ferimentos graves, desceu do veículo e, tendo percebido que ocorria vazamento do gás, imediatamente sinalizou a pista e comunicou o fato à Polícia Rodoviária Federal.

A PRF acionou então o Corpo de Bombeiros e o Centro de Controle de Desastres e Emergências Ambientais da CETESB, que chegaram ao local 20 minutos

após a colisão. O trânsito de veículos foi interrompido na rodovia e o Corpo de Bombeiros isolou uma área de 400 metros em ambos os sentidos da via.

Os técnicos do CETESB mediram o índice de inflamabilidade, com o auxílio de um explosímetro, ao redor do veículo e observaram que num perímetro de 20 metros no entorno do caminhão o índice medido pelo aparelho estava em 100%. Essa medida indica que a concentração de GLP no ar dentro dessa região se encontrava com valores iguais ou maiores que o Limite Inferior de Inflamabilidade<sup>2</sup> (LII), o que indica elevado risco de incêndio. Diante dessa situação, os técnicos orientaram e supervisionaram a realização imediata do abatimento ininterrupto dos vapores de GLP com água, tendo sido observada a redução da área contaminada com vapores do gás para 5 metros ao redor da carreta, reduzindo assim o risco de incêndio.

Para impedir o vazamento de todo o GLP contido no tanque, foi realizado o transbordo desse material para outros caminhões. Segundo a CETESB, essa operação foi bastante demorada, pois houve retardamento na chegada de outros caminhões-tanque devido ao engarrafamento da via, além de excessiva demora na mobilização dos caminhões e dos recursos humanos e materiais necessários para a operação de transbordo. A demora também ocorreu devido ao fato das carretas mobilizadas terem chegada ao local pressurizadas e a bomba utilizada na operação ser de baixa vazão, o que demonstrou, ainda segundo a CETESB, falta de preparo adequado para resposta emergencial por parte da empresa.

A rodovia ficou interditada durante 27 horas e foram consumidos 600.000 litros de água na operação. Nesse caso, o trabalho das equipes de emergência foi fundamental, pois a rápida ação impediu que um acidente mais grave ocorresse.

#### **2.6.4 Cenário Real 4**

No dia 13 de junho de 2009, por volta das 18 horas, no estado da Califórnia, Estados Unidos, um caminhão-tanque transportando 8.000 galões (30 m<sup>3</sup>) de etanol

---

<sup>2</sup> Para que um gás ou vapor inflamável queime é necessário que exista, além da fonte de ignição, uma mistura entre o O<sub>2</sub> e o combustível. O LII é a menor concentração na qual pode ocorrer combustão, caso a mistura seja ignitada. De maneira prática, esse valor é medido com o auxílio de um explosímetro. Uma leitura indicando 100% significa que a concentração do vapor inflamável é igual ou maior que a mínima para ocorrência de incêndio ou explosão. Fonte: CETESB. Equipamentos de Emergência.

colidiu com a barra metálica de proteção lateral do lado esquerdo da rodovia *StateRoute91*, na transição para a rodovia *Interstate710*. (FOX NEWS, 2009).

De acordo com testemunhas, após a colisão o caminhão explodiu, gerando uma imensa *fireball*. O calor intenso derreteu as barras de proteção lateral da via, carbonizando praticamente todo o caminhão, restando apenas os eixos das rodas e pedaços da cabine. Na Figura 2-14 é possível notar a intensidade das chamas.

De acordo com a FOX NEWS (2009), um viaduto que cruza a pista foi envolvido pela *fireball*, ficando fechado por alguns dias para que se fosse feita uma avaliação da possível fragilização de sua estrutura. Esse fato é ilustrado na Figura 2-15.

Os bombeiros utilizaram espuma para combater o incêndio e tiveram muita dificuldade para concluir essa tarefa. Foram necessários 45 minutos para extinguir completamente as chamas. (ETHANOL PRODUCER MAGAZINE, 2009).

Esse acidente provocou morte do motorista e não apresentou maiores danos materiais por ter ocorrido em uma autoestrada afastada de moradias e outras instalações.



Figura 2-14: Incêndio gerado pelo acidente com caminhão transportando 8.000 galões de álcool na Califórnia. Fonte: LIVE LEAK, 2009.



Figura 2-15: Base do viaduto comprometida devido ao intenso calor gerado pelo incêndio. Fonte: LIVE LEAK, 2009.

### 3 METODOLOGIA

#### 3.1 Cenário Acidental Envolvendo Formação de Bola de Fogo

Em cenários de acidentes envolvendo transporte de grandes quantidades de produtos químicos é possível a ocorrência de diferentes cenários acidentais, tais como o vazamento, formação de poças inflamáveis (*pool fire*), nuvens tóxicas ou inflamáveis, incêndio ou explosão de nuvem, etc. Dentre os diversos fenômenos que podem ocorrer numa emergência, este trabalho destaca a formação de *fireballs*.

A *fireball* ocorre quando a chama desenvolve-se rapidamente em uma nuvem inflamável enquanto a massa de combustível eleva-se no ar por efeito da redução da densidade provocada pelo superaquecimento (CETESB, 2003). Tal incêndio propaga-se verticalmente e possui curta duração, da ordem de poucos segundos.

De acordo com o Modelo de Crawley, o fenômeno da bola de fogo pode ser dividida em 3 fases: crescimento, queima estacionária e *burnout* (LEES, 1996). Na fase de crescimento, a *fireball* requer uma boa mistura ar/combustível e crescerá até atingir o seu tamanho final antes de ascender. Na fase de queima estacionária, a *fireball* não cresce mais, sendo iniciada a ascensão de uma bola grosseiramente esférica, formando o clássico "cogumelo". No *burnout*, a queima está se completando, e a *fireball* torna-se recoberta por fuligem e mais translúcida. As figuras 3-1, 3-2 e 3-3 ilustram as três fases.



Figura 3-1 - Fase de crescimento de um incêndio do tipo *fireball*. Fonte: Youtube, 2007.



Figura 3-2 - Fase estacionária de um incêndio do tipo *fireball*. Fonte: Youtube, 2007.



Figura 3-3 - Fase de burnout de um incêndio do tipo *fireball*. Fonte: Youtube, 2007.

Desde a formação de uma *fireball* até seu término é emitida grande quantidade de radiação térmica. Deste modo, estruturas próximas poderão ser afetadas e pessoas poderão sofrer queimaduras até mesmo fatais. O objetivo deste trabalho foi determinar a

distância de separação aceitável ou segura (ASD - *Acceptable Separation Distance*) entre a população desprotegida e um possível cenário de *fireball*. A correta estimativa da ASD permite a elaboração de planos de resposta mais eficazes, elevando a segurança da população e dos socorristas, mas também evitando custos desnecessários.

### 3.2 Fluxo de energia radiante

O fluxo de energia radiante liberado por uma *fireball* pode ser suficiente para ameaçar tanto a integridade estrutural de construções vizinhas, como a segurança física de socorristas e, principalmente, das pessoas desprotegidas localizadas nas proximidades do acidente.

Os efeitos da radiação térmica sobre as pessoas dependem de inúmeros fatores, dentre eles o tempo em de exposição. Períodos de exposição mais longos, mesmo com um nível de radiação térmica mais baixa, podem produzir efeitos fisiológicos graves (EPA-US, 2007). Tais efeitos fisiológicos dependem também de fatores de proteção como o tipo de roupa que o indivíduo estava vestindo, e até mesmo do abrigo no qual o indivíduo possa estar, como por exemplo, no interior de uma edificação.

O *Department of Housing and Urban Development (HUD-U.S.)* estabeleceu níveis limites de segurança dos fluxos de radiação térmica de 31,5 kW/m<sup>2</sup> (10.000 Btu/h/ft<sup>2</sup>) para construções e 1,4 kW/m<sup>2</sup> (450 Btu/h/ft<sup>2</sup>) para pessoas. Estes valores servem como guias para determinar a distância de separação aceitável (ASD) (NIST, 2000).

A Tabela 3-1 ilustra alguns efeitos de diferentes níveis de radiação térmica e tempo de exposição sobre pessoas não protegidas.

**Tabela 3-1: Critérios de queimaduras por radiação térmica. Fonte: Federal Emergency Management Agency et al. 1988, apud EPA-US, 2007.**

Intensidade da Radiação (kW/m <sup>2</sup> )	Tempo para Dor Severa (s)	Tempo para Queimadura de 2º Grau (s)
1	115	663
2	45	187
3	27	92
4	18	57
5	13	40
6	11	30
8	7	20
10	5	14
12	4	11

As durações que correspondem a efeitos como dor ou queimaduras de segundo grau podem variar consideravelmente, dependendo das circunstâncias. Os efeitos acima descritos foram observados em pele nua exposta diretamente à radiação térmica. Alguns tipos de roupa podem servir como uma barreira protetora contra a radiação térmica e podem afetar a duração da exposição. No entanto, a duração da exposição deverá ser mantida a um mínimo, mesmo a baixos níveis de radiação térmica.

Na Tabela 3-2 são mostradas consequências da exposição de um material combustível sólido (madeira) para níveis de radiação térmica específicos.

**Tabela 3-2 - Consequências da exposição da madeira em radiação térmica. Fonte: LBC Tanquitor, 2009.**

Intensidade da Radiação (kW/m <sup>2</sup> )	Tempo de exposição (s)	Consequência
12,5	30	A madeira entra em combustão na presença de uma chama piloto
37,5	50	A madeira entra em combustão sem a presença de uma chama piloto

### 3.3 Modelagem da *Fireball*

A *fireball* resultante de uma explosão pode, frequentemente, impor cargas térmicas prejudiciais a distâncias maiores elevadas. Por esta razão, é importante prever o tamanho e a duração da *fireball*, de modo a modelar corretamente a emissão.

A radiação liberada a partir de uma *fireball* pode ser estimada uma vez que as seguintes propriedades são conhecidas:

- o diâmetro máximo;
- o poder emissivo da superfície;
- a duração total da combustão.

#### 3.3.1 Fração da Carga Incorporada na *Fireball*

Hasegawa e Sato (1977 apud CCPS, 2010, p. 337) mostraram que, quando a fração de flash do líquido no momento da falha do vaso é igual a 36% ou superior, pode-se assumir que todo o combustível contido no vaso contribui para a *fireball*. Para

frações de flash inferiores, parte do combustível é consumido na *fireball* e o restante permanece na forma líquida.

Deste modo, assume-se que a quantidade de combustível que irá contribuir para a *fireball* é igual a aproximadamente três vezes a fração de *flash* isentrópica, até um máximo de 100% de combustível líquido disponível. Em um cenário de BLEVE, o combustível sofre forte aquecimento durante o incêndio, apresentando elevação de temperatura. Neste contexto, uma abordagem conservadora assume que todo o combustível líquido disponível irá sofrer flash, e portanto contribuir para a *fireball*.

### 3.3.2 Diâmetro e Duração da *Fireball*

Ao longo dos anos muitas experiências de pequena escala foram realizadas para medir a duração e diâmetro máximo de *fireballs* reais. Estas experiências tiveram como resultado o desenvolvimento de relações empíricas entre a massa total de combustível incorporado na *fireball* e sua duração e diâmetro. Diversas estimativas de diâmetro e duração são apresentadas na Tabela 3-3.

Os valores médios para o cálculo do diâmetro da *fireball* e duração estão disponíveis a partir de Roberts (1982, apud CCPS, 2010, p. 337) e Pape et al. (1988, apud CCPS, 2010, p. 337), que produziram as seguintes equações:

$$\text{Equação 3-1: } D_c = 5,8m_f^{1/3}$$

$$\text{Equação 3-2: } t_c = 0,45m_f^{1/3}, \text{ para } m_f < 30000 \text{ kg}$$

$$\text{Equação 3-3: } t_c = 2,6m_f^{1/6}, \text{ para } m_f > 30000 \text{ kg}$$

onde:

$D_c$  = diâmetro final da *fireball* (m)

$t_c$  = duração da *fireball* (s)

$m_f$  = massa de combustível na *fireball* (kg)

O CCPS (Center for Chemical Process Safety) recomenda formalmente que o cálculo do diâmetro final e duração de uma *fireball* esférica sejam calculados pelas equações 3-1, 3-2 e 3-3 pois estas refletem a média de todas as equações da Tabela 3-3.

Tabela 3-3 – Relações empíricas para diâmetros e durações de *fireballs*. Fonte: CCPS, 2010.

<i>Source</i> <i>Empirical Correlations</i>	<i>Material</i>	<i>Diameter,</i> $D_{max} (m)$	<i>Duration,</i> $t_B (s)$
Hardee and Lee 1973	Propane	$5.55 M^{0.333}$	—
Fay and Lewis 1977	Propane	$6.28 M^{0.333}$	$2.53 M^{0.167}$
Hasegawa and Sato 1977	Pentane	$5.28 M^{0.277}$	$1.10 M^{0.097}$
Hasegawa and Sato 1978	n-Pentane	$5.25 M^{0.314}$	$1.07 M^{0.181}$
Williamson and Mann 1981	Not provided	$5.88 M^{0.333}$	$1.09 M^{0.167}$
Lihou and Maund 1982	Butane	$5.72 M^{0.333}$	$0.45 M^{0.333}$
Lihou and Maund 1982	Rocket Fuel	$6.20 M^{0.320}$	$0.49 M^{0.320}$
Lihou and Maund 1982	Propylene	$3.51 M^{0.333}$	$0.32 M^{0.333}$
Lihou and Maund 1982	Methane	$6.36 M^{0.325}$	$2.57 M^{0.167}$
Moorhouse and Pritchard 1982	Flammable Liquid	$5.33 M^{0.327}$	$1.09 M^{0.327}$
Lihou and Maund 1982	Propane	$3.46 M^{0.333}$	$0.31 M^{0.333}$
Duiser 1985	Flammable Liquid	$5.45 M^{1.3}$	$1.34 M^{0.167}$
Marshall 1987	Hydrocarbon	$5.50 M^{0.333}$	$0.38 M^{0.333}$
Gayle and Bransford 1965 and Bagster and Pitblado 1989	Flammable Liquid	$6.14 M^{0.325}$	$0.41 M^{0.340}$
Pietersen 1985, CCPS 1989, Prugh 1994 and TNO 1997	Flammable Liquid	$6.48 M^{0.325}$	$0.852 M^{0.260}$
Roberts 1982 and CCPS 1999	Flammable Liquid	$5.80 M^{0.333}$	$0.45 M^{0.333} (M < 3 \times 10^4)$ $2.60 M^{0.167} (M > 3 \times 10^4)$
Martinsen and Marx 1999	Flammable Liquid	$8.66 M^{0.25} t^{0.333}$ $0 \leq t \leq t_b/3$	$0.9 M^{0.25}$

onde:

$D_{max}$  = diâmetro máximo da *fireball* (m)

$T_b$  = duração da *fireball* (s)

$M$  = massa de combustível na *fireball* (kg)

### 3.3.3 Modelo de “Ponto de Origem” e “Chama Sólida”

Conforme mencionado, quantidades elevadas de radiação térmica liberadas durante a reação de combustão são potencialmente letais para seres humanos, além de poderem danificar estruturas ou propagar o incêndio. Torna-se assim importante estimar a quantidade de radiação liberada pelas chamas e, principalmente, a quantidade que atinge um determinado alvo a distância definida.

Devido aos diversos formatos que uma chama real pode assumir (*pool fire*, *jet fire*, *fireball*, incêndio em sólido, etc), além de sua variação ao longo do tempo, torna-se complexa a determinação exata de sua forma geométrica e, por consequência, do fluxo de radiação térmica. Para possibilitar os cálculos, simplificações podem ser adotadas considerando-se toda a emissão como proveniente do "centro da chama", em uma analogia ao "centro de massa" na mecânica (NIST, 2000).

Tal método é conhecido como o modelo de "Ponto de Origem". Nesta abordagem é necessária apenas uma estimativa da taxa de liberação de calor total e da fração dessa energia que é liberada na forma de radiação térmica (NIST, 2000). Esse modelo supõe que toda a radiação é liberada a partir de um único ponto, o centro da chama, conforme mostra a Figura 3-4.

Incêndios gerados por combustíveis líquidos, em especial *pool fires*, são facilmente modelados quanto ao seu formato de chama, existindo uma quantidade considerável de dados disponíveis na literatura para validar modelos mais detalhados. Nestes casos bem conhecidos, o modelo de fonte pontual pode ser substituído por outros, mais específicos e de maior precisão. Assim, o modelo mais utilizado para estimar a radiação em incêndios em poça é o de radiação de "chama sólida" (NIST, 2000). Este modelo propõe que a chama seja considerada um cilindro sólido com diâmetro e altura iguais a estimativa média para a chama. O calor é emitido a partir das laterais do cilindro – e não a partir de um único ponto. A Figura 3-4 mostra a diferença entre os modelos apresentados.

Quando se busca estimar a quantidade de calor que atinge um alvo distante da chama, o modelo de ponto de origem é adequado, pois para distâncias consideráveis, a chama pode ser bem representada por um ponto. Porém, para alvos mais próximos, o modelo de chama sólida retorna melhores resultados (NIST, 2000), desde que a superfície geométrica escolhida represente bem a chama real.

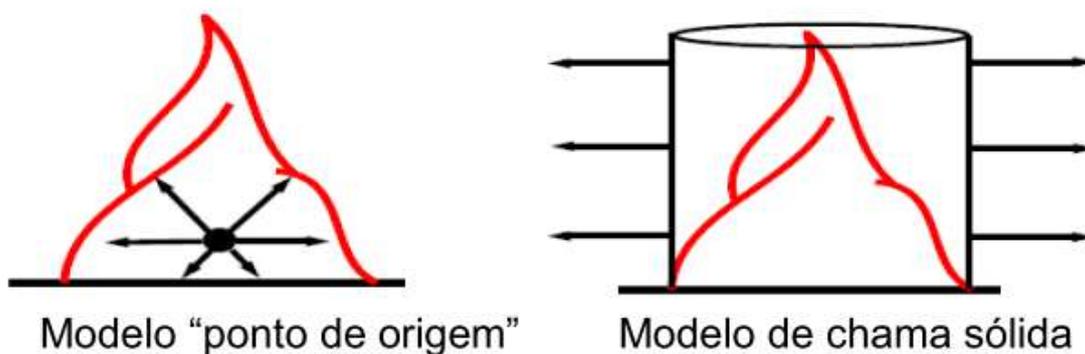


Figura 3-4 - Modelos de radiação térmica para *pool fire*. Fonte: adaptado de NIST, 2000.

Modelos análogos ao "ponto de origem" e "chama sólida" podem ser utilizados para o caso de *fireball*. Novamente, para o modelo de fonte pontual, a chama é representada por um ponto central. Já o modelo de chama sólida propõe que a chama seja considerada uma esfera sólida com diâmetro igual a estimativa média para o diâmetro final da *fireball*. O calor é emitido por toda a superfície esférica. A Figura 3-5 representa graficamente os dois modelos apresentados para *fireball*.

Neste trabalho, a *fireball* é modelada pelo modelo de fonte pontual. Este modelo é adequado para o estudo de caso realizado pois os níveis de radiação térmica analisados alcançam distâncias consideráveis entre a fonte e o alvo.

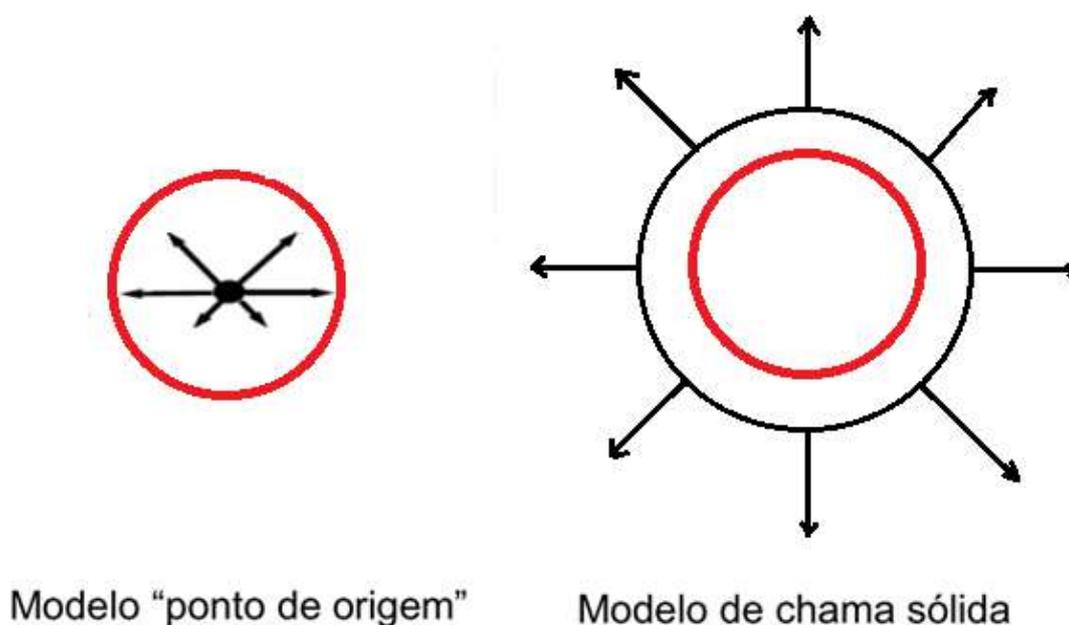


Figura 3-5 - Modelos de radiação térmica para *fireball*. Fonte: adaptado de NIST, 2000.

### 3.3.4 Fator de Forma

Outro conceito pertinente aos cálculos de radiação térmica sobre um alvo é o de fator de forma. Siegel e Howell (1992) definem-no como sendo a fração de energia radiante que deixa uma superfície e atinge outra, denominando-o *fator de configuração*. O fator de forma depende da geometria relativa dos corpos (fonte e alvo) e da posição relativa das duas superfícies.

Nos livros e manuais encontram-se, para diversos casos, tabelas e expressões para o cálculo do fator forma para diferentes cenários padrões (placas paralelas, discos paralelos, retângulos perpendiculares, quadrados, círculos, etc). O fator de forma utilizado neste trabalho refere-se a um receptor (alvo) pontual situado a uma certa distância do centro de uma esfera (fonte) ilustrado pela Figura 3-6 e sua expressão matemática está detalhada no item 3.3.6 .

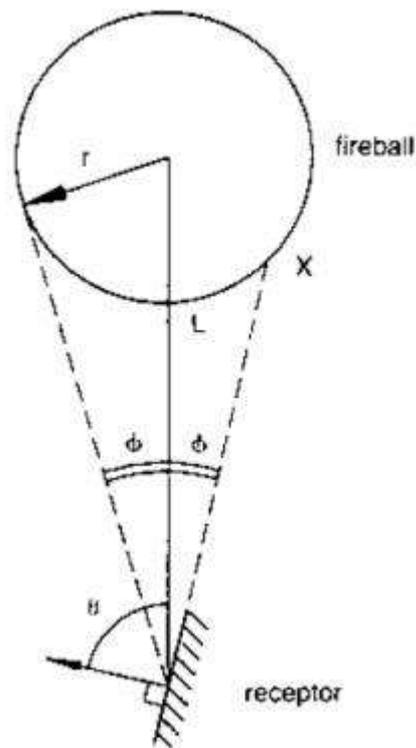


Figura 3-6 – Fator de forma para cenário de *fireball*. Fonte: Lees, 1996.

### 3.3.5 Transmissividade Atmosférica

O grau de transmissividade atmosférica representa a capacidade das ondas eletromagnéticas em serem irradiadas pela atmosfera. A transmissividade afeta a quantidade de calor emitido pela chama que efetivamente atinge o alvo.

Durante o seu percurso na atmosfera a radiação é atenuada por diversos fatores como: nebulosidade, umidade relativa do ar, gases e aerossóis, etc. Esses fatores, por sua vez, variam de forma sazonal, e dependem da localização, ou seja, variam de acordo com a da estação do ano, do clima local, concentração de poluentes, etc.

### 3.3.6 Modelagem da Radiação para Fireball

Usando o modelo de radiação de “chama sólida”, o fluxo de radiação térmica ( $q$ ) que atinge um alvo é dado pela Equação 3-4.

$$\text{Equação 3-4: } q = E F \tau_a$$

onde:

$q$  = radiação recebida pelo alvo ( $\text{W}/\text{m}^2$ )

$E$  = poder emissivo total na superfície ( $\text{W}/\text{m}^2$ )

$F$  = fator de forma (-)

$\tau_a$  = fator de transmissividade atmosférica (-)

O poder emissivo total na superfície  $E$  (radiação emitida por unidade de área de superfície da *fireball* por unidade de tempo), pode ser assumido como sendo igual aos poderes emissivos medidos em experiências em grande escala com *fireballs* provenientes de BLEVE pela British Gas (JOHNSON et al., 1990 apud CCPS, 2010, p. 339). Estes experimentos empregaram explosões com liberação de 1000 e 2000 kg de gás butano e propano. Os resultados dos testes revelaram poderes emissivos médios de 320 até 370  $\text{kW} / \text{m}^2$ . Um valor de 350  $\text{kW} / \text{m}^2$  revela-se adequado para a maioria dos hidrocarbonetos, envolvendo uma massa de vapor de 1000 kg ou mais.

Para um alvo pontual situado a uma distância  $L$  a partir do centro de uma esfera (*fireball*), o fator de forma ( $F$ ) é determinado pela Equação 3-5. A Figura 3-6 ilustra cada variável presente na Equação 3-5.

$$\text{Equação 3-5: } F = \frac{r^2 \cos \theta}{L^2}$$

onde:

$r$  = raio da *fireball* ( $r = D_c/2$ ) (m)

$L$  = distância entre o centro da *fireball* e o alvo (m)

$\Theta$  = ângulo entre a reta normal à superfície do alvo e a reta que conecta o alvo ao centro da esfera (grau)

Finalmente, a transmissividade atmosférica  $\tau_a$  pode variar entre 0,0 e 1,0. Esta pode ser estimada usando a Equação 3-6.

$$\text{Equação 3-6: } \tau_a = \log(14,1 H_{rel}^{-0,108} X^{-0,13})$$

onde:

$\tau_a$  = transmissividade atmosférica (-)

$H_{rel}$  = umidade relativa (-)

$X$  = distância entre o receptor e a *fireball* (m)

Conforme apresentado anteriormente, além do modelo de chama sólida, o modelo de “ponto de origem” também pode ser utilizado para calcular a radiação recebida por um receptor a uma certa distância da chama. Hymes (1983, apud CCPS, 2010, p. 341) apresenta uma formulação específica para *fireball*, desenvolvida a partir da formulação generalizada e da correlação de Roberts’ (1982, apud CCPS, 2010, p. 341) da duração da fase de combustão de uma *fireball*. De acordo com esta abordagem, o valor da radiação recebida pelo receptor é estimado pela Equação 3-7.

$$\text{Equação 3-7: } q = \frac{2,2 \tau_a * R * H_c * m_f^{0,67}}{4\pi L^2}$$

onde:

$m_f$  = massa de combustível na *fireball* (kg)

$\tau_a$  = transmissividade atmosférica (-)

$H_c$  = calor combustão (J/kg)

$R$  = fração radiada de calor de combustão (-)

$L$  = distância entre o centro da *fireball* e o receptor (m)

$q$  = radiação recebida pelo receptor ( $\text{kW}/\text{m}^2$ )

Conforme citado anteriormente, este trabalho utiliza o modelo de “ponto de origem” e, desta forma, a Equação 3-7 será utilizada para definir a distância de separação aceitável ou segura (ASD - Acceptable Separation Distance) entre a população desprotegida e o local de ocorrência da *fireball*. A obtenção dos valores de calor de combustão e fração radiada de calor de combustão requeridos na Equação 3-7 é detalhada no item 4.1.4.

Para grandes explosões, a suposição de que a *fireball* está no seu diâmetro máximo e "repousa" no solo irá prever a radiação térmica com bastante precisão (CCPS, 2010). Tal suposição representa o caso mais conservativo com relação à emissão de radiação térmica para um receptor na superfície. Desta forma, os cálculos realizados neste trabalho assumem que a *fireball* está tocando o solo ( $Z_c = D_c / 2$ ), conforme ilustra a Figura 3-7.

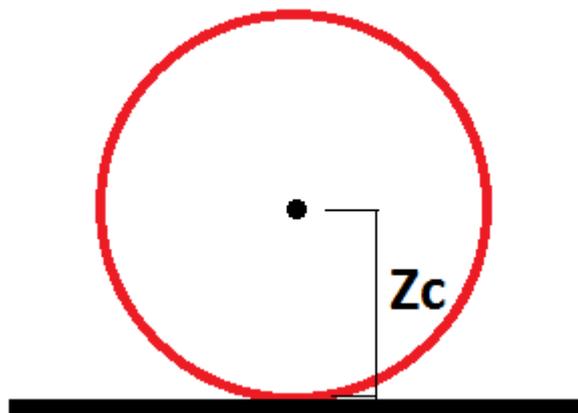


Figura 3-7 - Fireball tocando o solo ( $Z_c = D_c / 2$ ).

### 3.4 Software ALOHA

O software ALOHA (*Areal Locations of Hazardous Atmospheres*) foi desenvolvido em conjunto pelos órgãos do governo americano NOAA (*National Oceanic and Atmospheric Administration – USA*) e EPA (*Environmental Protection Agency – USA*). É empregado para a modelagem de cenários acidentais visando principalmente estabelecer distâncias seguras para a população, deste modo orientando a ação das equipes de emergência e pesquisadores. O software permite modelar

diferentes cenários acidentais como: nuvens de gás tóxico, incêndios e explosões (NOAA-US, 2014).

O ALOHA exibe sua estimativa em forma de uma “zona de ameaça”, que é uma área onde um parâmetro (toxicidade, inflamabilidade, radiação térmica ou sobrepressão) ultrapassou um nível considerado seguro. As zonas de ameaça calculadas para *fireball* são mostradas no ALOHA em forma de curvas de níveis de radiação térmica.

O software ALOHA usa três valores padrões de limites de radiação térmica, que são baseados em uma revisão de várias fontes amplamente aceitas neste assunto, como por exemplo, o American Institute of Chemical Engineers 1994, Federal Emergency Management Agency et al. 1998, e Lees 2001 (EPA-US, 2007) . Acima desses valores limites definidos pelo ALOHA um tipo de consequência pode ser observada. Os níveis adotados como padrão pelo ALOHA são:

- Vermelho: 10 kW / m<sup>2</sup> - potencialmente letal em 60 segundos;
- Laranja: 5 kW / m<sup>2</sup> - queimaduras de segundo grau em 60 segundos;
- Amarelo: 2 kW / m<sup>2</sup> - dor em 60 segundos.

Observa-se que o tempo de exposição necessário para levar a queimaduras de segundo grau em um nível de radiação igual a 5 kW/m<sup>2</sup> determinados pela EPA-US (2007) diferencia-se do tempo mostrado na Tabela 3-1. Essa estimativa de tempo depende de diversos fatores como roupa de proteção e tipo de abrigo considerado. Por isso, ocorre essa discrepância entre os dados fornecidos por diferentes fontes bibliográficas.

## 4 ESTUDO DE CASO

O presente trabalho analisou um acidente rodoviário hipotético envolvendo um caminhão de transporte de etanol, tendo como consequência um incêndio seguido de BLEVE e consequente formação de *fireball*.

Analisando especificamente o evento da *fireball*, objetiva-se estabelecer a distância de separação aceitável (ASD) para a população não protegida. A ASD é a mínima distância a partir da qual uma pessoa desprotegida não é afetada pela radiação térmica recebida a partir do incêndio ou explosão.

### 4.1 Simulação do Cenário Acidental

Este capítulo tem por finalidade apresentar o cálculo das variáveis de entrada da Equação 3-7, permitindo a obtenção da distância de separação segura. Foram estabelecidos três diferentes níveis de segurança para radiação térmica:

- 1,4 kW / m<sup>2</sup>, que é o nível de radiação térmica máxima que garante a segurança da população ao redor do acidente, de acordo com a NIST (2000).
- 5,0 kW / m<sup>2</sup>, que é o nível de radiação térmica limiar para a ocorrência de queimaduras de 2º grau em exposições com duração de 60 segundos, de acordo com a EPA-US (2007).
- 10 kW / m<sup>2</sup>, que é o nível de radiação potencialmente letal em 60 segundos em exposições com duração de 60 segundos, de acordo com a EPA-US (2007).

Considerou-se um caminhão transportando um volume de etanol igual a 80% da sua capacidade total volumétrica. Diante disso, foram analisados três cenários:

No **Cenário 1** todo o volume de etanol transportado no caminhão contribuirá para a formação da *fireball* (considerou-se que a *fireball* ocorreu de forma imediata após o acidente). Esse cenário é o mais conservativo, pois considera que todo o volume de etanol sofrerá *flash*. Em situações reais, uma parte do combustível transportado poderia ter outro destino, como por exemplo, sofrer derramamento e contribuir para um incêndio do tipo *pool fire*.

No **Cenário 2** um volume de etanol igual a 50% do total transportado pelo caminhão contribuirá para a formação da *fireball* (a *fireball* não ocorre imediatamente,

de forma que os outros 50% de etanol foram consumidos no incêndio antes de ocorrer a *fireball*, por exemplo).

E finalmente, no **Cenário 3** um volume de etanol igual a 10% do total transportado pelo caminhão contribuirá para a formação da *fireball*.

#### 4.1.1 Dimensões do tanque de etanol

Tanques não pressurizados para transporte rodoviário de grandes quantidades de líquidos possuem seção transversal aproximadamente circular. Por efeito de simplificação, aproximou-se o tanque por um cilindro com as dimensões apresentadas na Figura 4-1. Destaca-se que o diâmetro (2,3 m) e o comprimento (11,0 m) do cilindro são iguais a um veículo de transporte de etanol real disponível no mercado. Sua capacidade total é de 45,7 m<sup>3</sup>.

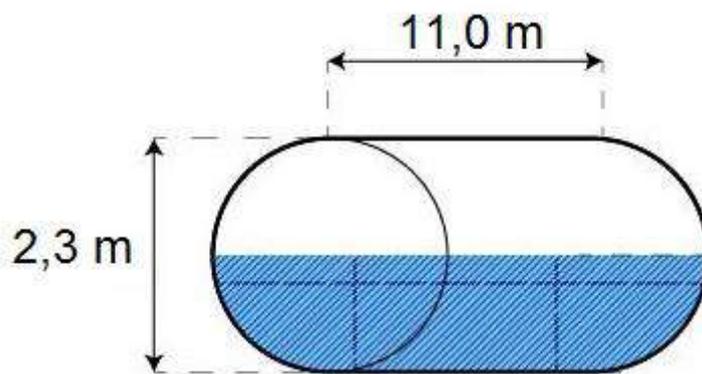


Figura 4-1 - Modelo representativo de um tanque de etanol com 45,7 m<sup>3</sup>.

#### 4.1.2 Massa de etanol incorporada na *fireball*

Assumido que o volume máximo de etanol transportado pelo caminhão é igual a 80% de sua capacidade total, temos um volume máximo de:

$$V_{etanol} = 0,8 * V_{caminhão}$$

$$V_{etanol} = 0,8 * 45,7 \text{ m}^3$$

$$V_{etanol} = 36,6 \text{ m}^3$$

Desta forma, estima-se a massa de etanol envolvida em cada cenário a partir da relação:  $\rho = m/V$ . O valor utilizado para  $\rho$  (massa específica do etanol) foi de 789 kg/m<sup>3</sup>.

#### **Cenário 1:**

O volume de etanol envolvido na *fireball* é 100% do volume total de etanol transportado, ou seja, igual a 36,6 m<sup>3</sup>. Portanto, a massa envolvida na *fireball* é igual a 28847 kg.

#### **Cenário 2:**

O volume de etanol envolvido na *fireball* é metade do volume total de etanol transportado, ou seja, 18,3 m<sup>3</sup>. Portanto, a massa incorporada na *fireball* é igual a 14423 kg.

#### **No Cenário 3:**

O volume de etanol envolvido na *fireball* é de apenas 10% do volume total de etanol transportado, ou seja, é igual a 3,66 m<sup>3</sup>. Portanto, a massa incorporada na *fireball* é igual a 2884,7 kg.

### **4.1.3 Diâmetro e Tempo de duração**

Uma vez estimada a massa de combustível incorporada na *fireball* é possível determinar o diâmetro da *fireball* para cada cenário, assim como seu respectivo tempo de duração.

$$\text{Equação 3-1: } D_c = 5,8m_f^{1/3}$$

$$\text{Equação 3-2: } t_c = 0,45m_f^{1/3}, \text{ para } m_f < 30000 \text{ kg}$$

#### **Cenário 1:**

Aplicando-se a Equação 3-1 e a Equação 3-2 para uma massa de 28847 kg, obtém-se:

$$D_c = 5,8 * 28847^{1/3} = 177,27 \text{ m}$$

$$t_c = 0,45 * 28847^{1/3} = 13,75 \text{ s}$$

Conforme mencionado no capítulo 3, assumiu-se que a fireball está tocando o solo. Portanto a altura do centro da fireball é igual à metade de seu diâmetro ( $Z_c = D_c / 2$ ), para todos os cenários. Desta forma:

$$Z_c = 177,27 / 2 = 88,63 \text{ m}$$

### **Cenário 2:**

Aplicando-se novamente as equações de diâmetro e tempo de duração, agora para uma massa de 14423 kg, obtém-se:

$$D_c = 5,8 * 14423^{1/3} = 140,73 \text{ m}$$

$$t_c = 0,45 * 14423^{1/3} = 10,91 \text{ s}$$

$$Z_c = 140,73 / 2 = 70,36 \text{ m}$$

### **Cenário 3:**

Finalmente, para uma massa de 2884,7 kg, obtém-se:

$$D_c = 5,8 * 2884,7^{1/3} = 82,35 \text{ m}$$

$$t_c = 0,45 * 2884,7^{1/3} = 6,39 \text{ s}$$

$$Z_c = 82,35 / 2 = 41,17 \text{ m}$$

O diâmetro e o tempo de duração da *fireball* são diretamente proporcionais à massa de combustível incorporada, ou seja, quanto maior a quantidade de combustível, maiores serão seu diâmetro e tempo de duração. As figuras 4-2 e 4-3 ilustram o comportamento desses dois parâmetros em função da massa de combustível.

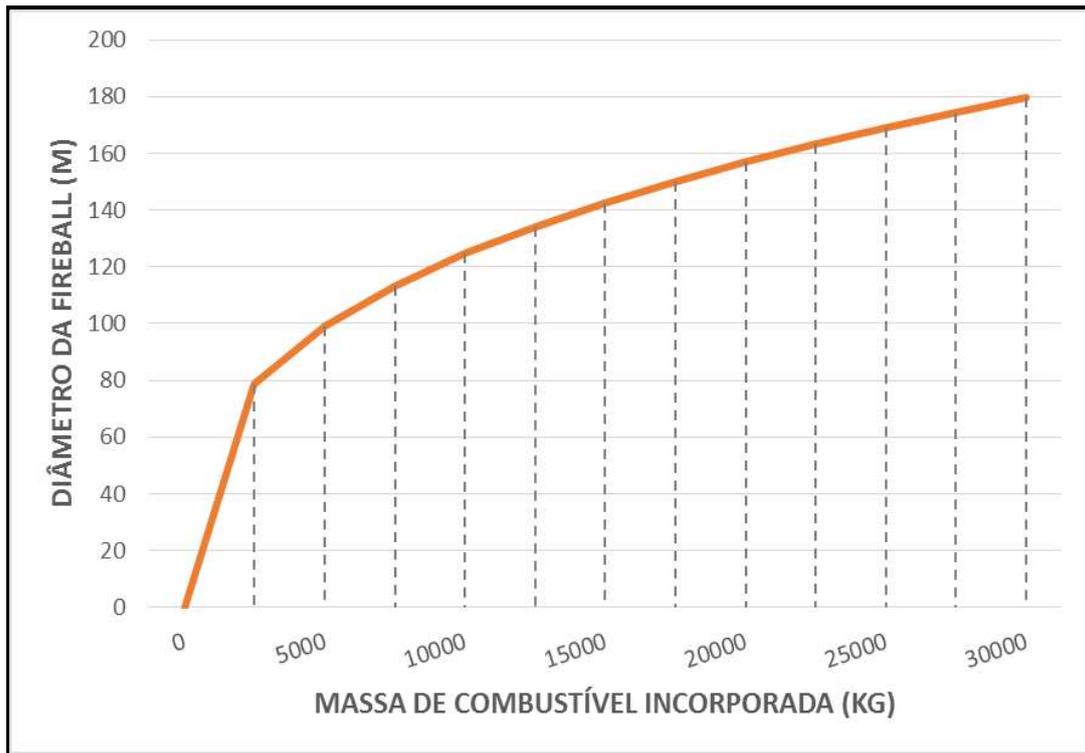


Figura 4-2: Variação do diâmetro da fireball em função da massa de combustível incorporada.

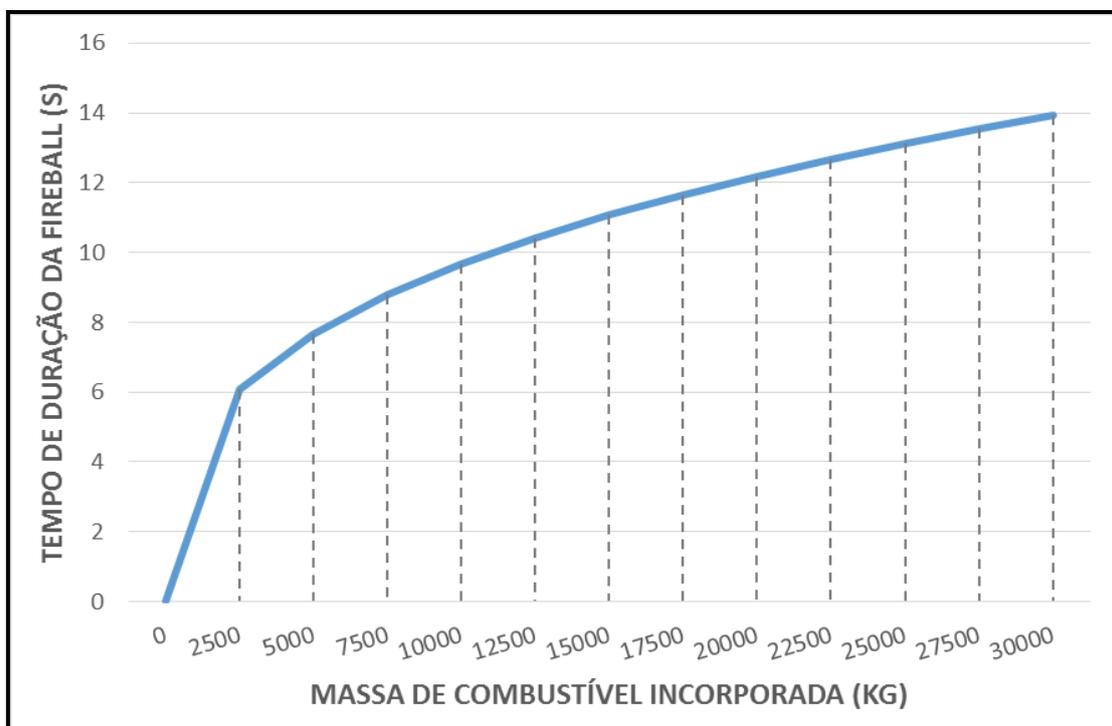


Figura 4-3: Variação do tempo de duração da fireball em função da massa de combustível incorporada.

Uma vez que os efeitos da radiação térmica sobre seres humanos é função também do tempo de exposição, percebe-se que elevadas massas de combustível incorporadas na *fireball* contribuem duplamente com o aumento da severidade. Além de elevar o diâmetro da *fireball*, também aumenta seu tempo de duração.

#### 4.1.4 Distância de Separação Aceitável (ASD)

Para estimar a distância de separação aceitável ou segura (ASD - Acceptable Separation Distance) entre a população desprotegida e o local de ocorrência da *fireball*, foi utilizada a Equação 3-7, que é uma formulação específica para *fireball* desenvolvida a partir do modelo de fonte pontual. O objetivo é determinar o valor da variável L (distância entre o centro da *fireball* e o receptor), conforme Figura 4-4. A partir deste valor, aplicar o Teorema de Pitágoras, de forma a obter-se a ASD (medida no solo) para os limites de radiação de 1,4 kW/m<sup>2</sup>, 5 kW/m<sup>2</sup> e 10 kW/m<sup>2</sup>.

Assim,

$$\text{Equação 3-7: } q = \frac{2,2\tau_a * R * H_c * m_f^{0,67}}{4\pi L^2}$$

Evidenciando a variável L na equação, temos:

$$\text{Equação 4-1: } L = \sqrt{\frac{2,2\tau_a * R * H_c * m_f^{0,67}}{4\pi q_{m\acute{a}x}}}$$

Onde:

L = distância entre o centro da *fireball* e o receptor (m)

q = radiação recebida pelo alvo (W/m<sup>2</sup>)

q<sub>máx</sub> = nível de radiação térmica máxima para pessoas (1,4 kW/m<sup>2</sup>)

m<sub>f</sub> = massa de combustível na *fireball* (kg)

τ<sub>a</sub> = transmissividade atmosférica (-)

H<sub>c</sub> = calor efetivo de combustão (J/ kg)

R = fração radiada de calor de combustão (-)

A distância de separação aceitável é obtida aplicando-se o Teorema de Pitágoras para o triângulo retângulo (Equação 4-2). A Figura 4-4 ilustra o procedimento de cálculo.

$$\text{Equação 4-2: } L^2 = Z_c^2 + ASD^2$$

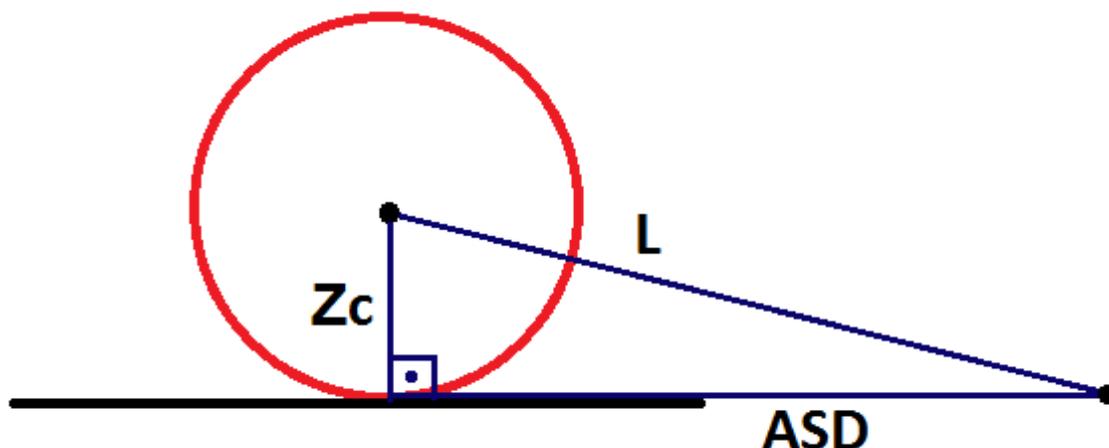


Figura 4-4 - Aplicação do Teorema de Pitágoras para obtenção da ASD.

Fazendo-se uma análise da Equação 3-7 ou da Equação 4-1, confirma-se que a radiação recebida pelo alvo é inversamente proporcional à distância entre o centro da *fireball* e o receptor. Ou seja, alvos localizados a distâncias maiores estarão submetidos a níveis menores de radiação térmica. De modo complementar, as figuras 4-2 e 4-3 confirmam que o aumento da massa de combustível incorporada na *fireball* aumenta seu diâmetro e sua duração. Deste modo, a distância segura será proporcional à massa transportada pelo caminhão-tanque.

A obtenção dos valores para a transmissividade atmosférica, fração radiada e calor efetivo de combustão, requeridos na Equação 4-1, são descritas na sequência:

- Transmissividade atmosférica

Como a transmissividade atmosférica é função de diversos fatores atmosféricos como: umidade, temperatura, pressão e da nebulosidade, tornando-se difícil na prática estimar antecipadamente o valor preciso da transmissividade no local do acidente. Assim, optou-se por utilizar o valor mais conservativo da transmissividade atmosférica medida experimentalmente no Brasil, encontrada na literatura.

O trabalho de Correa et al. (2012) descreve a análise da transmissividade atmosférica no período de 2001 a 2005 em Botucatu, São Paulo. O valor da transmissividade atmosférica variou de 47,1% em janeiro a 60,4% em abril, com média geral de 54,7%;

Já no trabalho de Lima et al. (2007), os valores de transmissividade atmosférica foram medidos em Maceió entre o período de 1997 a 1999, e ficaram compreendidos entre 77% e 78,4%.

No trabalho de Menezes et al., foram medidos os valores de transmissividade atmosférica em Campina Grande no período de 1975 à 1980. Os valores variaram fortemente numa faixa de 36 a 76%.

Dentre esses resultados apresentados, o maior valor de transmissividade atmosférica medido, e portanto o mais conservativo, foi 78,4%. Utilizou-se este valor para os cálculos realizados neste trabalho.

- Fração radiada de calor de combustão

A energia liberada pela queima do combustível se dá na forma de luminosidade e calor. Embora ambas sejam formas de energia radiada, na análise de segurança interessa somente a fração radiada na forma de calor.

Hymes (1983, apud CCPS, 2010, p. 341) sugere a utilização de valores para a fração radiada de calor de combustão (R) entre 0,3 e 0,4. O valor da distância de separação aceitável ou segura é diretamente proporcional ao valor da fração radiada. Portanto, optou-se inicialmente por utilizar uma fração radiada igual a 0,4 de forma a obter o resultado mais conservativo para a ASD. Posteriormente, foram realizados cálculos utilizando uma fração radiada igual a 0,3 com o objetivo de analisar a influência desta variável no resultado final.

- Calor de combustão

O valor do calor de combustão é definido como a variação de entalpia molar, ou seja, a quantidade de calor liberada na combustão total de 1 mol de determinada substância, nas condições normais de temperatura e pressão. (RUZZARIN, 2011).

O calor de combustão ( $H_c$ ) é obtido através de dados experimentais, sendo constante para um determinado combustível. Atualmente existem tabelas para calor de combustão de dezenas de combustíveis. De acordo com a Tabela 4-1, o calor de combustão do etanol é 26800 kJ/kg (NIST, 2000).

Tabela 4-1 - Calor de combustão para líquidos perigosos. Fonte: (NIST, 2000).

Liquid	Mass Burning Rate, $\dot{m}''$	Heat of Combustion	HRR Per Unit Area, $\dot{q}''_f$	Screen ASD		Reference	
	kg/m <sup>2</sup> /s			kJ/kg	kJ/m <sup>2</sup>		kW/m <sup>2</sup>
					m	m	
Acetic Acid	0.033	13,100	400	10	90	Ref. [10]	
Acetone	0.041	25,800	1,100	10	250	Ref. [9]	
Acrylonitrile	0.052	31,900	1,700	15	390	Ref. [10]	
Amyl Acetate	0.102	32,400	3,300	30	750	Ref. [10]	
Amyl Alcohol	0.069	34,500	2,400	20	550	Ref. [10]	
Benzene	0.048	44,700	2,100	20	480	Ref. [9]	
Butyl Acetate	0.100	37,700	3,800	35	860	Ref. [10]	
Butyl Alcohol	0.054	35,900	1,900	15	430	Ref. [10]	
m-Cresol	0.082	32,600	2,700	25	620	Ref. [10]	
Crude Oil	0.045	42,600	1,900	15	430	Ref. [9]	
Cumene	0.132	41,200	5,400	50	1220	Ref. [10]	
Cyclohexane	0.122	43,500	5,300	45	1200	Ref. [10]	
No. 2 Diesel Fuel	0.035	39,700	1,400	12	320	Ref. [9]	
Ethyl Acetate	0.064	23,400	1,500	15	340	Ref. [10]	
Ethyl Acrylate	0.089	25,700	2,300	20	530	Ref. [10]	
Ethyl Alcohol	0.015	26,800	400	10	90	Ref. [9]	
Ethyl Benzene	0.121	40,900	4,900	40	1100	Ref. [10]	
Ethyl Ether	0.094	33,800	3,200	30	730	Ref. [10]	
Gasoline	0.055	43,700	2,400	20	550	Ref. [9]	
Hexane	0.074	44,700	3,300	30	750	Ref. [9]	
Heptane	0.101	44,600	4,500	40	1000	Ref. [9]	
Isobutyl Alcohol	0.054	35,900	1,900	15	430	Ref. [10]	
Isopropyl Acetate	0.073	27,200	2,000	20	460	Ref. [10]	
Isopropyl Alcohol	0.046	30,500	1,400	15	320	Ref. [10]	
JP-4	0.051	43,500	2,200	20	500	Ref. [9]	

Depois de obtidos os valores das variáveis de entrada da Equação 4-1, finalmente será possível o cálculo das distâncias de separação aceitáveis para os três níveis referenciais de radiação considerados (1,4 kW/m<sup>2</sup>, 5 kW/m<sup>2</sup> e 10kW/m<sup>2</sup>).

### **Cenário 1:**

Aplicando-se os valores de transmissividade atmosférica ( $\tau_a$ ) igual a 0,784, fração radiada (R) igual a 0,4 e calor de combustão do etanol ( $H_c$ ) igual a 26800 kJ/kg, para uma massa de combustível incorporado na *fireball* igual a 28847 kg (equivalente a 100% da massa de combustível transportado), obtém-se:

- Para o nível de radiação igual a 1,4 kW/m<sup>2</sup>:  $L = 1011,42 \text{ m}$  e  $ASD = 995,76 \text{ m}$
- Para o nível de radiação igual a 5 kW/m<sup>2</sup>:  $L = 535,19 \text{ m}$  e  $ASD = 504,98 \text{ m}$
- Para o nível de radiação igual a 10 kW/m<sup>2</sup>:  $L = 378,44 \text{ m}$  e  $ASD = 334,35 \text{ m}$

Onde a explicação geométrica para L e ASD foi apresentada na Figura 4-4.

Portanto, neste cenário acidental, pessoas desprotegidas que estiverem dentro de um raio de 334,35m do acidente, estão sob potencial risco de morte caso esta radiação dure 60 segundos ou mais. Porém, conforme calculado anteriormente, o cenário acidental geraria uma fireball com duração de aproximadamente 14 segundos. Desta forma, as distâncias de separação indicadas são bastante conservativas, pois seus efeitos são estimados para exposições durante 60 segundos.

Utilizando-se os mesmos valores de transmissividade atmosférica ( $\tau_a$ ), calor de combustão do etanol ( $H_c$ ) e massa de combustível incorporado na *fireball*, e alterando-se somente o valor da fração radiada de calor de combustão (R) para 0,3, obtém-se:

- Para o nível de radiação igual a 1,4 kW/m<sup>2</sup>:  $L = 875,91\ m$  e  $ASD = 857,79\ m$
- Para o nível de radiação igual a 5 kW/m<sup>2</sup>:  $L = 463,49\ m$  e  $ASD = 428,25\ m$
- Para o nível de radiação igual a 10 kW/m<sup>2</sup>:  $L = 327,74\ m$  e  $ASD = 275,65\ m$

### **Cenário 2:**

Novamente, aplicando-se os valores de transmissividade atmosférica ( $\tau_a$ ) igual a 0,784, fração radiada igual a 0,4 e calor de combustão do etanol ( $H_c$ ) igual a 26800 kJ/kg, porém agora para uma massa de combustível incorporado na *fireball* igual a 14423 kg (metade da massa de combustível envolvida no cenário 1), obtém-se:

- Para o nível de radiação igual a 1,4 kW/m<sup>2</sup>:  $L = 801,84\ m$  e  $ASD = 789,39\ m$
- Para o nível de radiação igual a 5 kW/m<sup>2</sup>:  $L = 424,29\ m$  e  $ASD = 400,27\ m$
- Para o nível de radiação igual a 10 kW/m<sup>2</sup>:  $L = 300,02\ m$  e  $ASD = 264,96\ m$

Alterando-se somente o valor da fração radiada (R) para 0,3, obtém-se:

- Para o nível de radiação igual a 1,4 kW/m<sup>2</sup>:  $L = 694,41\ m$  e  $ASD = 680,00\ m$
- Para o nível de radiação igual a 5 kW/m<sup>2</sup>:  $L = 367,45\ m$  e  $ASD = 339,43\ m$
- Para o nível de radiação igual a 10 kW/m<sup>2</sup>:  $L = 259,83\ m$  e  $ASD = 218,41\ m$

As distâncias de separação seguras obtidas no cenário 2 são significativamente menores que as obtidas no cenário 1. Destaca-se, portanto, a importância de definir a fração de líquido (massa de combustível) incorporada na fireball, pois esta variável influencia significativamente na definição do raio de evacuação ao redor do acidente.

### **Cenário 3:**

Aplicando-se as mesmas variáveis de entrada, para uma massa de combustível incorporada na *fireball* igual a 2884,7 kg (equivalente a 10% da massa total de combustível transportado), obtém-se:

- Para o nível de radiação igual a 1,4 kW/m<sup>2</sup>:  $L = 467,66\ m$  e  $ASD = 460,35\ m$
- Para o nível de radiação igual a 5 kW/m<sup>2</sup>:  $L = 247,46\ m$  e  $ASD = 233,36\ m$
- Para o nível de radiação igual a 10 kW/m<sup>2</sup>:  $L = 174,98\ m$  e  $ASD = 154,39\ m$

Alterando-se agora o valor da fração radiada para 0,3, obtém-se:

- Para o nível de radiação igual a 1,4 kW/m<sup>2</sup>:  $L = 405,01\ m$  e  $ASD = 396,54\ m$
- Para o nível de radiação igual a 5 kW/m<sup>2</sup>:  $L = 214,31\ m$  e  $ASD = 197,85\ m$
- Para o nível de radiação igual a 10 kW/m<sup>2</sup>:  $L = 151,54\ m$  e  $ASD = 127,21\ m$

O cenário 3 representa o cenário acidental menos conservativo pois, neste caso, apenas 10% do combustível transportado sofre *flash*. Como consequência, este cenário acidental requer um raio de evacuação ao redor do acidente consideravelmente menor que os cenários 2 e 3. Enquanto o cenário 1 exigia até 1 km de isolamento, no cenário 3 essa distância se reduz para menos da metade. Portanto, estimar a massa de combustível transportado que irá efetivamente participar da formação da *fireball* é uma etapa crítica para estabelecer um protocolo de resposta de emergência.

Comparando-se os valores de distância de separação aceitável obtidos em cada um dos cenários, considerando-se a fração radiada de calor de combustão (R) igual a 0,3 e 0,4, é possível observar que a ASD obtida para fração radiada de calor de combustão (R) igual a 0,4 é maior do que a ASD para fração radiada de calor de combustão (R) igual a 0,3, nos três diferentes níveis de radiação para os três cenários acidentais. A Tabela 4-2 mostra os resultados da comparação entre os valores de ASD estimados para R=0,4 e R=0,3. Essa comparação foi realizada calculando-se a proporção entre os valores, e revela a proporção entre os valores de ASD obtidos para R = 0,4 e R = 0,3.

Tabela 4-2 - Comparação entre os valores obtidos para ASD utilizando-se R=0,4 e R=0,3.

	Comparação ASD(R=0,4) / ASD (R=0,3)		
	Cenário 1	Cenário 2	Cenário 3
1,4 kW/m <sup>2</sup>	1,161	1,161	1,161
5 kW/m <sup>2</sup>	1,179	1,179	1,179
10 kW/m <sup>2</sup>	1,213	1,213	1,214

## 4.2 Cálculo realizado pelo Software ALOHA

O software ALOHA é capaz de simular o cenário acidental de explosão com formação de *fireball* apresentando como *outputs* o diâmetro e tempo de duração da *fireball*, além da “zona de ameaça”, que é o gráfico de curvas de níveis de radiação térmica especificadas previamente pelo usuário.

Definindo-se as três curvas de nível de radiação térmica no ALOHA iguais aos níveis de radiação térmica analisados no item anterior (1,4 kW/m<sup>2</sup>, 5 kW/m<sup>2</sup> e 10 kW/m<sup>2</sup>), os raios das zonas de ameaça correspondem às distâncias de separação aceitáveis ou seguras (ASD). Embora 1,4 kW/m<sup>2</sup> não seja padrão de software, ele foi aqui empregado para permitir comparação com os resultados anteriores.

O software ALOHA requer como *inputs* as seguintes variáveis:

- Localização

Os locais disponíveis no banco de dados são limitados aos Estados Unidos na América. Porém, essa informação não afeta o resultado final da simulação.

- Substância Química

Pode-se optar por escolher substâncias puras ou soluções. Selecionou-se a opção “Ethanol” para simular os cenários acidentais aqui avaliados.

- Condições Atmosféricas

Foi configurada a seguinte condição atmosférica:

- Velocidade do vento = 1,4 nós;
- Direção do vento = 120°;
- Local urbano;
- Nebulosidade: quase nenhuma nebulosidade;
- Temperatura atmosférica = 30°C;

- Grau de umidade = ar seco.

A velocidade do vento utilizada foi o menor valor permitido pelo software, de forma que a velocidade do vento não interfira na dinâmica da *fireball*. Uma vez que o vento está em baixa velocidade, a direção do vento não influencia nos resultados obtidos. Portanto, escolheu-se 120° de forma aleatória.

O grau de umidade e a nebulosidade foram escolhidos de forma a proporcionar o maior valor de transmissividade atmosférica, para que o resultado obtido seja o mais conservativo, de forma a seguir a mesma linha de raciocínio utilizada nos cálculos anteriores.

- Fonte do acidente.

Foram selecionadas as seguintes opções:

- Fonte: Tanque;
- Diâmetro = 2,3 m / Comprimento = 11,0 m;
- Estado físico da substância química: Líquido;
- Substância química estocada à temperatura ambiente;
- Massa de líquido estocado no tanque: 28847 kg;
- Tipo de acidente: BLEVE, tanque explode e a substância química queima em forma de *fireball*;
- Percentual da massa de líquido que contribui para a *fireball*: Foram considerados os mesmos cenários acidentais descritos anteriormente, ou seja, para o **Cenário 1** foi considerado 100% da massa de líquido contribuindo para a *fireball*, para o **Cenário 2** foi considerado 50%, e para o **Cenário 3** foi considerado apenas 10% da massa de líquido contribuindo para a *fireball*.

A modelagem pelo software ALOHA obteve os seguintes resultados para cada cenário:

### **Cenário 1:**

Segundo estimativa do ALOHA, o diâmetro da *fireball* gerada neste cenário é igual a 178 m e seu tempo de duração de 12 segundos.

A distância de separação aceitável (ASD) calculada pelo ALOHA para o nível de radiação de 1,4 kW/m<sup>2</sup> é igual a 790 m. Para o nível de radiação de 5 kW/m<sup>2</sup>, a distância é de 424 m. E, finalmente, para o nível de radiação igual a 10 kW/m<sup>2</sup>, 296 m.

A Tabela 4-3 apresenta os resultados obtidos para o cenário 1 calculados pelo ALOHA e pela metodologia de cálculo proposta pelo CCPS apresentada no capítulo 3. Observa-se que os resultados obtidos pelo software se aproximam mais dos resultados obtidos seguindo-se a metodologia proposta pelo CCPS quando utiliza-se R = 0,3 , valor de fração radiada menos conservativo.

**Tabela 4-3 - Comparação entre os resultados obtido pelo ALOHA e pela metodologia de cálculo proposta pelo CCPS, para o cenário 1.**

	Metodologia proposta pelo CCPS		Software ALOHA
	R = 0,3	R = 0,4	
<b>Diâmetro da Fireball (m)</b>	177,27	177,27	178
<b>Tempo de Duração da Fireball (s)</b>	13,75	13,75	12
<b>ASD (m) - 1,4 kW/m<sup>2</sup></b>	857,79	995,77	790
<b>ASD (m) - 5 kW/m<sup>2</sup></b>	428,25	504,98	424
<b>ASD (m) - 10 kW/m<sup>2</sup></b>	275,65	334,35	296

A Figura 4-5 permite visualizar graficamente a zona de impacto gerada no cenário acidental 1 em uma região densamente povoada localizada na cidade do Rio de Janeiro. Assumindo um acidente rodoviário na Avenida Brasil, em região próxima a Bonsucesso. Este trecho da Avenida Brasil possui elevada densidade populacional e é rota para transporte de diferentes cargas perigosas.



Figura 4-5: Zonas de impacto calculadas pelo ALOHA para os níveis de radiação 1,4 kW/m<sup>2</sup> (amarelo), 5 kW/m<sup>2</sup> (laranja) e 10 kW/m<sup>2</sup> (vermelho), para o Cenário 1. Fonte: adaptado de Google Earth, 2014.

A população situada dentro da área amarela está sujeita a algum nível de incômodo, com sintomas de dor e até mesmo queimaduras leves. Por outro lado, a população situada dentro da área vermelha está sob potencial risco de morte para um tempo de exposição de aproximadamente 60 segundos. Deve ser fortemente considerada a evacuação desta área em caso de ocorrência de acidente envolvendo transporte de líquidos inflamáveis com incêndio.

### Cenário 2:

Segundo estimativa do ALOHA, o diâmetro da *fireball* gerada neste cenário é igual a 141 m, e seu tempo de duração igual a 10 segundos.

A distância de separação segura (ASD) calculada para o nível de radiação de 1,4 kW/m<sup>2</sup> é igual a 634 m. Para o nível de radiação de 5 kW/m<sup>2</sup>, a distância é igual a 340 m. Para o nível de radiação de 10 kW/m<sup>2</sup> a distância é 238 m.

Os dados da Tabela 4-4 permitem observar que os resultados obtidos pelo software ALOHA se aproximam mais daqueles obtidos seguindo-se a metodologia proposta pelo CCPS quando utiliza-se  $R = 0,3$ . Esse resultado também foi observado para o cenário 1.

Tabela 4-4 - Comparação entre os resultados obtido pelo ALOHA e pela metodologia de cálculo proposta pelo CCPS, para o cenário 2.

	Metodologia proposta pelo CCPS		Software ALOHA
	R = 0,3	R = 0,4	
Diâmetro da Fireball (m)	140,73	140,73	141
Tempo de Duração da Fireball (s)	10,91	10,91	10
ASD (m) - 1,4 kW/m <sup>2</sup>	680	789,39	634
ASD (m) - 5 kW/m <sup>2</sup>	339,43	400,27	340
ASD (m) - 10 kW/m <sup>2</sup>	218,41	264,96	238

A Figura 4-6 permite visualizar gráficamente a zona afetada no cenário acidental 2.



Figura 4-6: Zonas de impacto calculadas pelo ALOHA para os níveis de radiação 1,4 kW/m<sup>2</sup> (amarelo), 5 kW/m<sup>2</sup> (laranja) e 10 kW/m<sup>2</sup> (vermelho), para o Cenário 2. Fonte: adaptado de Google Earth, 2014.

### **Cenário 3:**

O diâmetro da *fireball* gerada por 10% do líquido presente no tanque foi estimado em 83 m pelo ALOHA. O tempo de duração de 7 segundos.

A distância de separação calculada pelo ALOHA para o nível de radiação de 1,4 kW/m<sup>2</sup> foi de 381 m. Para o nível de radiação de 5 kW/m<sup>2</sup>, a distância de separação correspondeu a 204 m. E, finalmente, 143 m para 10 kW/m<sup>2</sup>

A Tabela 4-5 mostra que, novamente, os resultados obtidos pelo software ALOHA se aproximam mais dos resultados obtidos seguindo-se a metodologia proposta pelo CCPS quando utiliza-se R = 0,3. Assim como no cenário acidental 2, a ASD calculada pelo ALOHA ultrapassou o valor calculado pela metodologia CCPS para os níveis de radiação iguais a 5 kW/m<sup>2</sup> e 10 kW/m<sup>2</sup>.

**Tabela 4-5 - Comparação entre os resultados obtido pelo ALOHA e pela metodologia de cálculo proposta pelo CCPS, para o cenário 3.**

	Metodologia proposta pelo CCPS		Software ALOHA
	R = 0,3	R = 0,4	
Diâmetro da Fireball (m)	82,34	82,34	83
Tempo de Duração da Fireball (s)	6,39	6,39	7
ASD (m) - 1,4 kW/m <sup>2</sup>	396,54	460,35	381
ASD (m) - 5 kW/m <sup>2</sup>	197,85	233,36	204
ASD (m) - 10 kW/m <sup>2</sup>	127,21	154,4	143

A Figura 4-7 permite visualizar graficamente a zona de impacto gerada no cenário acidental 3. Embora o número de pessoas afetadas pelo cenário acidental 3 seja significativamente menor do que aquele observado no cenário 1, ainda podem haver consequências para a população vizinha. Assim, mesmo formações de *fireball* com reduzida massa de combustível podem causar vítimas entre a população desprotegida, necessitando assim de um protocolo de ação adequado. Ressalta-se contudo que as consequências estimadas são para a exposição a esses níveis de radiação por 60 segundos, enquanto a *fireball* pode apresentar um tempo de duração mais reduzido.

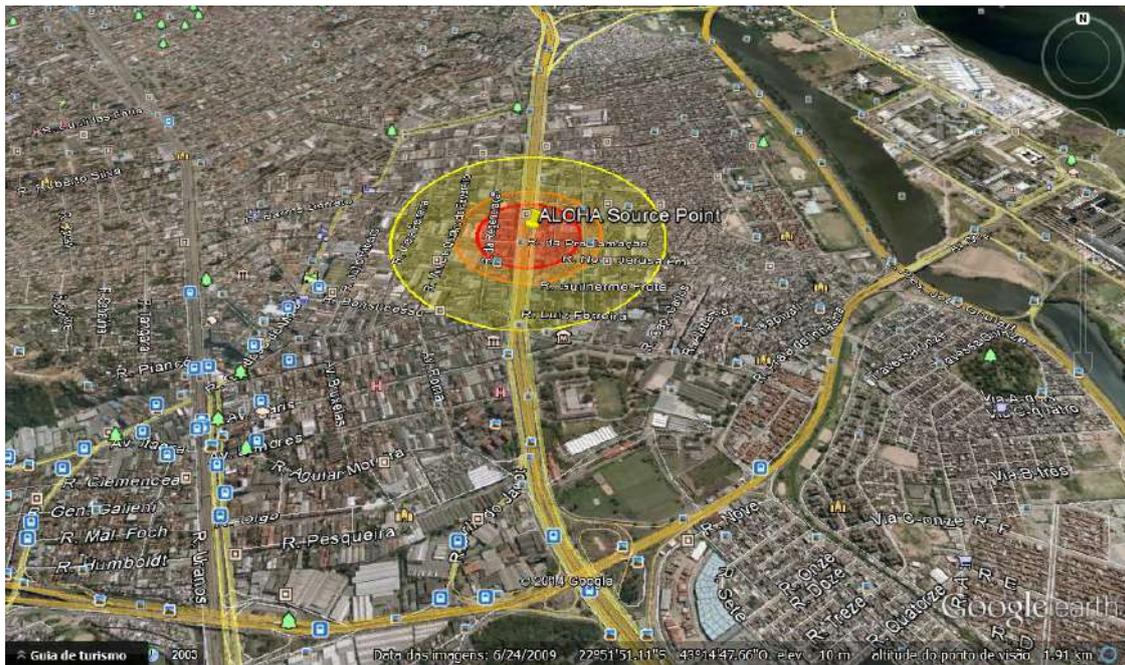


Figura 4-7: Zonas de impacto calculadas pelo ALOHA para os níveis de radiação  $1,4 \text{ kW/m}^2$  (amarelo),  $5 \text{ kW/m}^2$  (laranja) e  $10 \text{ kW/m}^2$  (vermelho), para o Cenário 3. Fonte: adaptado de Google Earth, 2014.

Visando a ilustrar graficamente o quanto a distância de separação aceitável é influenciada pela massa de combustível envolvida na *fireball*, a Figura 4-8 mostra a sobreposição das zonas de ameaça resultantes dos cenários acidentais 1, 2 e 3 calculadas pelo ALOHA.

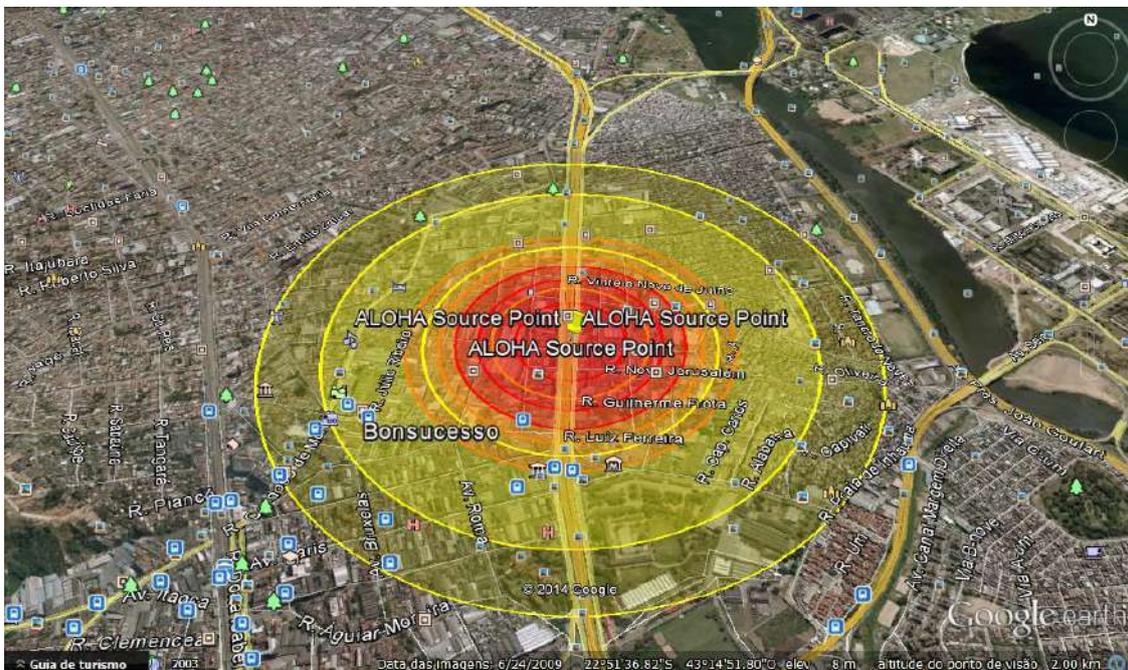


Figura 4-8: Sobreposição das zonas de ameaça para os cenários acidentais 1, 2 e 3.

Comparando-se os valores de diâmetros e tempo de duração da *fireball* obtidos pela modelagem proposta no capítulo 3 com os valores obtidos pelo software ALOHA, é possível constatar que foram similares.

Por sua vez, analisando-se as distâncias de separação aceitáveis (ASD) para cada nível de radiação, constata-se maior semelhança quando utiliza-se o valor da fração radiada (R) igual a 0,3.

Para os resultados obtidos utilizando-se o valor da fração radiada igual a 0,3 , a diferença entre as distâncias calculadas pelo ALOHA e pela metodologia CCPS variou de 1% a 9% no **cenário 1**. Para o **cenário 2** essa diferença variou de 1% a 8%. E, finalmente, para o **cenário 3** as distâncias se diferenciaram entre 1% e 4%.

Para os resultados obtidos utilizando-se o valor da fração radiada igual a 0,4 , a diferença entre as distâncias de separação aceitáveis (ASD) calculadas pelo ALOHA e pela metodologia proposta pelo CCPS variou de 12% a 26% no **cenário 1**, 11% a 24% no **cenário 2**, e 7% a 21% no **cenário 3**.

Ou seja, o ALOHA retorna resultados mais próximos do modelo que empregou  $R = 0,3$  , não tão conservativo. Esses resultados, porém, não permitem afirmar em definitivo que o ALOHA emprega R igual a 0,3, já que existem outros parâmetros presentes na modelagem que não são explicitados pelo software.

### **4.3 *Fireball versus Pool fire***

Este tópico tem por objetivo comparar a distância de separação aceitável em caso de *fireball* com a distância de separação requerida em caso de cenários acidentais com formação de *pool fire*, estudada por Vidal Neto (2013).

O estudo de Vidal Neto (2013) teve por objetivo avaliar a área de isolamento segura em caso de acidentes envolvendo transporte de rodoviário de etanol com consequente formação de incêndios em poça (*pool fire*). O trabalho utilizou-se da metodologia de cálculo proposta pela NIST (2000).

Vidal Neto (2013) utilizou o critério de radiação térmica aceitável para construções (31,5 kW/m<sup>2</sup>) e para pessoas (1,4 kW/m<sup>2</sup>), estabelecido pelo *Department of Housing and Urban Development* (HUD) americano.

O cenário acidental mais crítico estudado por Vidal Neto (2013) considerou que todo o etanol contido no tanque (45 m<sup>3</sup>) contribuiu para a formação de uma *pool fire*.

Este cenário acidental obtém como resultado final uma distância de separação aceitável (ASD) de 50 m.

Observa-se que embora a formação de *fireball* seja mais rara em acidentes rodoviários envolvendo carga líquida, que os níveis de radiação térmica liberados em um cenário como esse são consideravelmente maiores que a radiação emitida em uma *pool fire*. A área de isolamento requerida no caso de um acidente envolvendo *fireball* é da ordem de 10 vezes a área de isolamento de um acidente com formação de *pool fire*. Deste modo, a capacidade de prever a ocorrência de BLEVE e consequente formação de *fireball* torna-se crítica para a segurança tanto dos socorristas quanto da população vizinha. Diante da possibilidade de BLEVE, as equipes de emergência precisam efetivamente estar preparadas para um cenário severo e letal.

#### 4.4 ABIQUIM

Conforme mencionado no capítulo 2.4, a ABIQUIM conta com um Manual de Atendimento a Emergências, que funciona como uma fonte de consulta rápida e confiável para situações de emergência.

A Guia 127 do Manual de Atendimento a Emergências fornece as informações para líquidos inflamáveis (polares/miscíveis em água), ou seja, classe de substâncias químicas a qual o etanol pertence. Esta guia informa que, se a carga ou o tanque contendo líquidos inflamáveis estiver envolvido em chamas, deve-se isolar a área em um raio de 800 metros em todas as direções, e deve ser considerada a necessidade de evacuação da área isolada. Embora o Manual não cite explicitamente, o cenário de envolvimento do tanque por chamas é fator contribuinte para o desencadeamento de um BLEVE, com consequente formação de *fireball*.

Comparando-se o raio de isolamento de 800 metros indicado pela Guia 127 com os valores de distância de separação aceitável ou segura (ASD) calculados neste trabalho pela metodologia do CCPS e pelo software ALOHA, é possível observar que o raio de isolamento proposto pela ABIQUIM se aproxima das distâncias de separação calculadas para o cenário acidental 1, o mais conservativo por considerar que toda a massa transportada será incorporada na *fireball*. As três abordagens (CCPS, ALOHA e ABIQUIM) mostram-se coerentes em seus resultados.

## 5 CONCLUSÃO

A partir das simulações realizadas para diferentes cenários de acidentes no transporte de etanol, pode-se concluir que as equipes de emergência devem atuar o mais rápido possível. No caso de geração de *fireball*, a área potencialmente afetada é muito extensa, não sendo viável a evacuação de toda a população vizinha do local, principalmente em locais muito povoados. A ação de combate ideal para esse tipo de situação seria a realização de medidas preventivas, que evitassem a ocorrência do acidente, como o treinamento e conscientização dos motoristas, melhoria na sinalização e condições de tráfego das estradas, dentre outras.

Ao comparar os resultados obtidos nas simulações utilizando a metodologia proposta pelo CCPS e utilizando o software ALOHA, as diferenças encontradas para as distâncias de separação aceitável (ASD) utilizando-se o valor da fração radiativa de calor de combustão (R) igual a 0,4 foram consideravelmente maiores do que utilizando-se 0,3. Esses resultados, por sua vez, não permitem afirmar que o ALOHA emprega R = 0,3, uma vez que existem outros parâmetros para esta modelagem. Por sua vez, as simulações realizadas neste trabalho adotaram princípios conservativos, e isso contribuiu para a obtenção de distâncias de separação aceitáveis (ASD) maiores que o ALOHA.

Os valores de ASD obtidos pela metodologia proposta pelo CCPS no cenário acidental mais conservativo, o qual considera que toda a massa será inteiramente incorporada na *fireball*, foram 995,97m (para R=0,4) e 857,79m (R=0,3). Para o mesmo cenário acidental, o software ALOHA obteve uma ASD igual a 790m. Esses valores simulados correspondem aproximadamente ao indicado no Manual de Atendimento à Emergência da ABIQUIM como área de isolamento (800m) e, portanto, as simulações realizadas neste trabalho estão coerentes com o Manual.

Ao se realizar um paralelo entre os resultados desse trabalho e os obtidos no estudo de Vidal Neto (2013), pode-se concluir que a ocorrência de *fireball* gera uma situação muito mais severa para a população vizinha do que o incêndio em poça, necessitando de uma área de isolamento maior.

Finalmente, como recomendação para trabalhos futuros, poderia ser feito um estudo que realizasse as simulações adotando o modelo de chama sólida, para que os modelos de chama sólida e “ponto de origem” (adotado nesse trabalho) pudessem ser comparados.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABIQUIM - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INDÚSTRIA QUÍMICA. Manual para Atendimento de Emergências com Produtos Perigosos. Guia para as Primeiras Ações em Acidentes. Departamento Técnico, Comissão de Transportes. São Paulo, 2011, 6ª edição, 340 p.

ABIQUIM - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INDÚSTRIA QUÍMICA. Site organizacional. São Paulo, 2012. Disponível em: <<http://www.abiquim.org.br/abiquim/institucional/quem-somos>> . Acesso em 31/05/2014 às 21:00h.

ANTT - AGÊNCIA NACIONAL DE TRANSPORTE TERRESTRE. Resolução nº 420. Brasil, 2004.

BAUKAL Jr., Charles E. Heat Transfer in Industrial Combustion. Boca Raton, Florida: CRC Press, 2000.

BLOG VIVO NO TRÂNSITO. Disponível em: <<http://vivonotransito.zip.net/>> . Acesso em 29/05/2014 às 18:40h.

CCPS - CENTER FOR CHEMICAL PROCESS SAFETY. Guidelines for Vapor Cloud Explosion, Pressure Vessel Burst, BLEVE and Flash Fire Hazards, 2010, 2ª Edição, 456 p.

CETESB - COMPANHIA DE TECNOLOGIA DE SANEAMENTO AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO. Atendimento Emergencial no Transporte Rodoviário Envolvendo GLP. Revista Meio Ambiente Industrial, Edição 41 nº 40. São Paulo, 2003. Disponível em: <<http://www.cetesb.sp.gov.br/gerenciamento-de-riscos/emergencias-quimicas/265-revista-meio-ambiente-industrial>> . Acesso em 30/05/2014 às 16:00h.

CETESB - COMPANHIA DE TECNOLOGIA DE SANEAMENTO AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO. Equipamentos de Emergência. Disponível em: <<http://www.cetesb.sp.gov.br/emergencia/aspectos/equipamentos/alarme.htm>> . Acesso em 01/06/2014 às 17:15h.

CETESB - COMPANHIA DE TECNOLOGIA DE SANEAMENTO AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO. Gerador de Relatórios de Emergências Químicas. Disponível em: <<http://sistemasinter.cetesb.sp.gov.br/emergencia/relatorio.php>> . Acesso em 29/05/2014 às 16:20h.

CETESB - COMPANHIA DE TECNOLOGIA DE SANEAMENTO AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO. Manual de Orientação para a Elaboração de Estudos de Análise de Riscos. São Paulo, 2003, 122p.

CNT – CONFERÊNCIA NACIONAL DO TRANSPORTE. Agência CNT de Notícias. Brasília, 2010. Disponível em:  
<[http://www.cnt.org.br/Paginas/Agencia\\_Noticia.aspx?n=6546](http://www.cnt.org.br/Paginas/Agencia_Noticia.aspx?n=6546)> . Acesso em 29/05/2014 às 12:30h.

CNT – CONFERÊNCIA NACIONAL DO TRANSPORTE. Boletim Estatístico, Abril 2014. Brasília, 2014.

CNT – CONFERÊNCIA NACIONAL DO TRANSPORTE. Pesquisa CNT de Rodovias 2013: Relatório Gerencial. Brasília, 2013.

CORREA , F. C. P.; ESCOBEDO, J. F.; PAI, A. Dal; TERAMOTO, É. T.; “Modelo de Angström-Prescott para Estimativa das Radiações UV, Par e IV em Botucatu/Sp/Brasil. 2012.

COSTA, Ely Emerson Santos; RIBEIRO, Paulo Cezar Martins. “Análise da Legislação sobre o Transporte de Produtos Perigosos”. Journal of Transport Literature, Vol. 5, n. 4, p. 260-270, 2011.

CRUZ , Rafael Eduardo da. “Uma Avaliação das Distribuições de Temperatura e dos Mecanismos de Troca Térmica em uma Câmara de Combustão”. Tese de Mestrado em Engenharia Mecânica – Universidade Federal de Santa Catarina, Santa Catarina, 2006.

CUNHA, Wallace de Castro. Análise do Transporte de Produtos Perigosos no Brasil. Tese de Doutorado em Engenharia de Transportes – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2009.

DNIT – DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. Manual para Implementação de Planos de Ação de Emergência para Atendimento a Sinistros Envolvendo o Transporte Rodoviário de Produtos Perigosos. Publicação IPR-716. Rio de Janeiro, 2005.

DUARTE, Henrique Ferro; DIAS, Nelson Luís. “Ajuste da Radiação Líquida em um Modelo de Transferência Solo-Vegetação-Atmosfera”. 2011.

EPA-US (UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY), “ALOHA User’s Manual”. Fevereiro, 2007.

EPA-US (UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY). Disponível em: <<http://nepis.epa.gov>> . Acesso em 09/05/2014 às 19:20h.

ETHANOL PRODUCER MAGAZINE. Disponível em <<http://www.ethanolproducer.com/articles/5775/liquid-fuel-transport-accidents-serve-as-safety-reminders/>> . Acesso em 02/02/2014 às 16:15h.

FOX NEWS. Disponível em <<http://www.foxnews.com/story/2009/06/14/tanker-truck-explodes-into-inferno-on-california-freeway/>> . Acesso em 02/02/2014 às 15:35h.

LBC Tanquipor. Distâncias de Segurança, Preocupações e Expectativas. 2009.

LEES, Frank P. “Loss Prevention in the Process Industries. Hazard Identification, Assessment and Control”, 2ª Edição, 1996.

LIMA, Edivania de A.; MOLION, Luis C. B.; GOMES FILHO, Manoel F.; FIRMINO, Janne L. Da N.; SILVA, Alcides O. da. “Variabilidade Interanual da Profundidade Óptica da Atmosfera sobre Maceió, AL”. 2005.

LIVE LEAK. Disponível em: <[http://www.liveleak.com/view?i=aed\\_1244973349](http://www.liveleak.com/view?i=aed_1244973349)> . Acesso em 02/02/2014 às 17:30h.

MENEZES, Hudson Ellen Alencar; ALVES, Renan De Oliveira; SILVA, Lindenberg Lucena da; FREIRE, Morgana Lígia De Farias. “Transmissividade e Atenuação Atmosférica: um Estudo Comparativo”.

MT – Ministério dos Transportes. Portaria nº 204. Brasil, 1997.

NIST - NATIONAL INSTITUTE OF STANDARDS AND TECHNOLOGY. Thermal Radiation from Large *Pool fires* - Fire Safety Engineering Division/ Building and Fire Research Laboratory - November 2000.

NOAA – NATIONAL OCEANIC AND ATMOSPHERIC ADMINISTRATION / U.S. DEPARTMENT OF COMMERCE. Disponível em: <<http://response.restoration.noaa.gov/aloha>> . Acesso em 10/05/2014 às 20:50h.

GOVERNO DO ESTADO DO RIO DE JANEIRO. Operação Lei Seca. Rio de Janeiro, 2014. Disponível em: <<http://www.operacaoleisecarj.rj.gov.br/a-lei-seca/>> . Acesso em: 29/05/2014 às 19:30h.

PORTAL TRANSPORTA BRASIL. Disponível em: <<http://www.transportabrasil.com.br/2012/11/ferrovia-ja-e-responsavel-por-30-da-matriz-de-transportes-no-pais/>> . Acesso em 28/05/2014 às 15:30h.

PRODUTOS PERIGOSOS PRF. Disponível em: <<http://www.produtosperigososprf.com/#!acidentes-2014/cuj9>> . Acesso em 03/02/2014 às 15:15h.

REVISTA VEJA. Disponível em: <[http://veja.abril.com.br/160998/p\\_124.html](http://veja.abril.com.br/160998/p_124.html)> . Acesso em 03/02/2014 às 13:45h.

RUZZARIN, Narciso. “Determinação dos Efeitos Térmicos Causados em um Incêndio em um Tanque de Armazenamento de Líquido Inflamável de Grandes Proporções e suas Relações com o Plano de Atendimento de Emergência. 2011.

SIEGEL, Robert; HOWELL, John R. Thermal Radiation Heat Transfer. 3ª ed.

SPNT/MT – Secretaria de Políticas Nacional de Transportes / Ministério dos Transportes. Projeto de Reavaliação de Estimativas e Metas do PNTL: Relatório Final. Brasília, 2012.

TORRERO, Alessandra Mundy. Simulação de Acidentes Envolvendo Transporte Rodoviário de Produtos Perigosos. Monografia de Graduação em Engenharia Química – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2013.

VIDAL NETO, Helio Lopes. Avaliação de Cenários de Incêndio em Poça em Acidentes Envolvendo Transporte Rodoviário de Etanol. Monografia de Graduação em Engenharia Química – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2013.

VAZ JUNIOR, Carlos André. Apostila do Curso de Incêndios – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2012. Disponível em <<http://www.eq.ufrj.br/docentes/cavazjunior>> . Acesso em 18 jan. 2014.

WASHINGTON, D.C.: Hemisphere Publishing Corporation, 1992.

YOUTUBE. Disponível em: <<http://www.youtube.com/watch?v=Nj3mWMdv978>>. Acesso em 21/01/2014 às 15:30h.

# ANEXO I – RÓTULOS DE RISCO PARA CADA CLASSE



(Nº 1)

Subclasses 1.1, 1.2 e 1.3

Símbolo (bomba explodindo): preto. Fundo: laranja. Número "1" no canto inferior.



(Nº 1.4)



(Nº 1.5)



(Nº 1.6)

Fundo: laranja. Números: pretos. Os numerais devem medir cerca de 30mm de altura e cerca de 5mm de espessura (para um rótulo medindo 100mm x 100mm). Número "1" no canto inferior.



(Nº 2.1)

Subclasse 2.1

Gases inflamáveis

Símbolo (chama): preto ou branco.

Fundo: vermelho. Número "2" no canto inferior.



(Nº 2.2)

Subclasse 2.2

Gases não-inflamáveis, não-tóxicos

Símbolo (cilindro para gás): preto ou branco.

Fundo: verde. Número "2" no canto inferior.



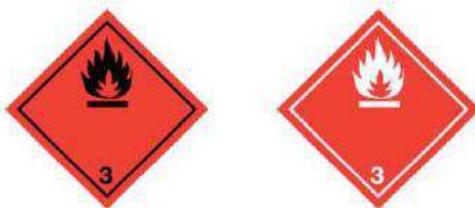
(Nº 2.3)

Subclasse 2.3

Gases tóxicos

Símbolo (caveira e ossos cruzados): preto.

Fundo: branco. Número "2" no canto inferior.



(Nº 3)

Símbolo (chama): preto ou branco.  
Fundo: vermelho. Número "3" no canto inferior.



(Nº 4.1)

Subclasse 4.1  
Sólidos inflamáveis  
Símbolo (chama): preto.  
Fundo: branco com sete listras verticais vermelhas.  
Número "4" no canto inferior.



(Nº 4.2)

Subclasse 4.2  
Substâncias sujeitas à combustão espontânea  
Símbolo (chama): preto.  
Fundo: metade superior branca, metade inferior vermelha.  
Número "4" no canto inferior.



(Nº 4.3)

Subclasse 4.3  
Substâncias que, em contato com a água, emitem gases inflamáveis  
Símbolo (chama): preto ou branco. Fundo: azul.  
Número "4" no canto inferior.



(Nº 5.1)

Subclasse 5.1  
Substâncias oxidantes  
Símbolo (chama sobre um círculo): preto.  
Fundo: amarelo.  
Número "5.1" no canto inferior.



(Nº 5.2)

Subclasse 5.2  
Peróxidos orgânicos  
Símbolo (chama): preto ou branco  
Fundo: metade superior vermelha, metade inferior amarela.  
Número "5.2" no canto inferior.





(Nº 6.1)  
Subclasse 6.1  
Substâncias tóxicas  
Símbolo (caveira e ossos cruzados): preto. Fundo: branco.  
Número "6" no canto inferior.



(Nº 6.2)  
Subclasse 6.2  
Substâncias infectantes  
A metade inferior do rótulo pode conter as inscrições: "SUBSTÂNCIA INFECTANTE" e "Em caso de dano ou vazamento, notificar imediatamente as autoridades de Saúde Pública". Símbolo (três meias-luas crescentes superpostas em um círculo) e inscrições: pretos.  
Fundo: branco. Número "6" no canto inferior.



(Nº 7A)  
Categoria I - Branco  
Símbolo (trifólio): preto.  
Fundo: branco.  
Texto (obrigatório): preto, na metade inferior do rótulo:  
"RADIOATIVO"  
"CONTEÚDO....."  
"ATIVIDADE....."  
Colocar uma barra vermelha após a palavra "RADIOATIVO".  
Número "7" no canto inferior.



(Nº 7B)  
Categoria II - Amarela  
Símbolo (trifólio): preto.  
Fundo: metade superior amarela com bordas brancas, metade inferior branca.  
Texto (obrigatório): preto, na metade inferior do rótulo:  
"RADIOATIVO....."  
"CONTEÚDO....."  
"ATIVIDADE....."  
Em um retângulo de bordas pretas: "ÍNDICE DE TRANSPORTE".  
Colocar duas barras verticais vermelhas após a palavra "RADIOATIVO".  
Número "7" no canto inferior.



(Nº 7C)  
Categoria III - Amarela  
Símbolo (trifólio): preto.  
Fundo: metade superior amarela com bordas brancas, metade inferior branca.  
Texto (obrigatório): preto, na metade inferior do rótulo:  
"RADIOATIVO....."  
"CONTEÚDO....."  
"ATIVIDADE....."  
Em um retângulo de bordas pretas: "ÍNDICE DE TRANSPORTE".  
Colocar três barras verticais vermelhas após a palavra "RADIOATIVO".  
Número "7" no canto inferior.



(Nº 7E)  
Classe 7: Material Fissil  
Fundo: branco.  
Texto (obrigatório): preto na metade superior do rótulo: "FISSIL".  
Em um retângulo de bordas pretas na metade inferior do rótulo:  
"Índice de segurança de criticidade".  
Número "7" no canto inferior.



(Nº 8)

Símbolo (líquidos, pingando de dois recipientes de vidro e atacando uma mão e um pedaço de metal): preto.

Fundo: metade superior branca.

metade inferior preta com borda branca.

Número "8" no canto inferior.



(Nº 9)

Símbolo (sete listras verticais na metade superior): preto.

Fundo: branco.

Número "9", sublinhado no canto inferior.