



Avaliação de Cenários de Incêndio em Poça em
Acidentes Envolvendo Transporte Rodoviário de
Etanol

Helio Lopes Vidal Neto

Monografia de Final de Curso

Orientador

Prof. Carlos André Vaz Júnior, D.Sc.

Outubro de 2013

AVALIAÇÃO DE CENARIOS DE INCÊNDIO EM POÇA EM ACIDENTES ENVOLVENDO TRANSPORTE RODOVIÁRIO DE ETANOL

Helio Lopes Vidal Neto

Monografia de Final de curso submetido ao Corpo Docente da Escola de Química, como parte dos requisitos necessários a 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

Outubro de 2013

Vidal Neto, Helio Lopes.

Avaliação de Cenários de Incêndio em Poça em Acidentes Envolvendo Transporte Rodoviário de Etanol/Helio Lopes Vidal Neto. Rio de Janeiro: UFRJ/EQ, 2013.

(Monografia) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Escola de Química, 2013.

Orientador: Carlos André Vaz Junior

1.Incêndio 2. *Poll Fire* 3.Transporte 4.Produutos Perigosos 5.Monografia. (Graduação – UFRJ/EQ) 6. Carlos André Vaz Junior, D.Sc.

Em memória da minha mãe e do meu avô.

“E sem saber que era impossível,
foi lá e fez”.

Jean Cocteau

AGRADECIMENTOS

Ao Professor Carlos André do Vaz Júnior, DSc, (EQ-UFRJ), pelo apoio, dedicação, incentivo, orientação.

Ao meu pai, que sempre do jeito dele, me apoiou, aconselhou e me proveu os recursos necessários para que esses 5 anos fossem o menos traumáticos possível.

Aos meus amigos e irmãos Wesley Vidal, Alessandro Vidal, Victor Figueiredo, Guilherme Figueiredo, Everton Almeida, Rodrigo Guimaraes, Phelipe Rocha e Welington Guimaraes pelos momentos felizes e tristes que passaram ao meu lado.

A Claudia Figueiredo, que me adotou como um filho, pelos conselhos, broncas e carinho.

À minha namorada e companheira de todos os momentos Claire Ramos por todo amor, carinho, compreensão, apoio, auxílio.

Aos meus amigos de graduação Andreza Torres, Leandro Vidal, Maristela Fujimoto, Camilla Carvalho, Victor Castanheira, Juliana Farah, Rodrigo Fernandes, Renata Scoralick Felipe Cairo, Monique dos Santos por toda amizade e ajuda nas horas de desespero.

Aos meus amigos e companheiros de trabalho Leonardo Ottoni, Fabricio Jannuzzi, Evelyn Yuri, Lucas Caetano, Marta Garcia, Mayara Barrionuevo, Mateus Craveiro, Daniel Silveira, Camilla Affonso, Luciana Vaz e Gabriel Ares por toda amizade que foi criada nesses últimos anos e por alavancar minha evolução profissional.

Ao ILOS pela experiência profissional que me proporcionou.

A todos que de alguma forma contribuí para que minha estadia na Escola de Química fosse mais agradável.

À Escola de Química – UFRJ, pelo aprendizado e convívio nesta instituição durante minha vida acadêmica;

Agradeço também à banca examinadora pela disponibilidade de avaliar nosso projeto e contribuir com sua experiência acadêmica.

Resumo da Monografia de Final de Curso apresentado a Escola de Química como parte dos requisitos necessários para obtenção do grau de Engenharia Química.

Avaliação de Cenários de Incêndio em Poça em Acidentes Envolvendo Transporte Rodoviário de Etanol

Helio Lopes Vidal Neto

Outubro de 2013

Orientador: Prof. Carlos André Vaz Júnior

O presente estudo tem como objetivo avaliar a segurança provida pela área de isolamento inicial proposta pela ABIQUIM (Associação Brasileira da Indústria Química) para cenários acidentais envolvendo carregamento rodoviário de etanol. A demanda de etanol, que é caracterizado por ser um líquido inflamável e tóxico, tem aumentado por diversos fatores ao longo da história. A demanda tende a crescer no futuro devido ao aumento do número de carros *flex* em circulação e a possível elevação do preço da gasolina para o consumidor final. Por consequência da elevação da demanda, a movimentação deste produto dentro do território nacional também cresce. A avaliação da matriz nacional de transporte de cargas mostra que cerca de 90% da movimentação de etanol combustível é realizada através do modal rodoviário. Analisando o histórico de acidentes envolvendo etanol percebe-se que a maior parte envolve a etapa de transporte. Dentre todos os acidentes rodoviários envolvendo cargas diversas, acidentes com líquidos inflamáveis representam cerca de 1/3 dos registros. A avaliação aqui realizada empregou quatro cenários acidentais. Para a avaliação da área de isolamento para cada cenário, foi utilizada a metodologia proposta pela NIST (*National Institute of Standards and Technology*), um instituto federal do governo americano que desenvolve procedimentos, normas e tecnologias. Os resultados encontrados para todos os cenários mostram que a área de isolamento proposta pelo manual da ABIQUIM é satisfatória para acidentes rodoviários envolvendo carregamento de etanol. Caso o isolamento seja adequadamente implementado pelas equipes de resposta a emergências, mesmo em caso de incêndio da carga a população estaria exposta a níveis considerados seguros de radiação térmica. Cenários envolvendo explosões, contudo, não foram avaliados.

SUMÁRIO

1	Introdução	1
1.1	Objetivo	1
2	Mercado de Etanol: oferta, demanda e logística	2
2.1	Histórico	2
2.2	Deficit do Etanol	6
2.3	Transporte de Etanol	7
2.4	Transporte Rodoviário De Produtos Perigosos	9
2.5	Legislação	12
2.6	Acidentes no Transporte de Produtos Perigosos	13
2.7	Abiquim	17
2.8	Programa de Atendimento a emergência	19
3	Teoria do Fogo	22
3.1	Combustão	22
3.2	Tipos de Chama	23
3.3	Modelagem de Incêndio em Poça	24
3.3.1.	Diâmetro da Chama - D	25
3.3.2.	Taxa de Emissão de Calor – Q ou HRR	27
3.3.3.	Altura da Chama - H	29
3.3.4.	Fluxo Térmico - q''	30
3.3.5.	Altura efetiva - H_{ef}	34
3.3.6.	Fator de Forma - F	36
4	Metodologia	44
4.1	Modelos	44
4.2	ASD – Acceptable Separation Distance	46
4.3	Cenários Analisados	49
5	Resultados	53
5.1	Diâmetro da Chama	53
5.2	Altura da Chama	54

5.3	ASD – <i>Acceptable Separation Distance</i>	55
5.3.1.	Gráfico Simplificado.....	55
5.3.2.	Cálculo Detalhado.....	58
6	Conclusão.....	63
7	Referências bibliográficas.....	64
ANEXO 1 – RÓTULOS DE RISCO PARA CADA CLASSE.....		69
ANEXO 2 – TABELAS		73

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 - Participação no mercado por produto em 2012. Fonte: Sindicato de Distribuidores de Combustível – SINDICOM.	2
Figura 2 - Preço médio anual do petróleo. Fonte: Folha Online, 2013.	3
Figura 3 - Comparação de produção de automóveis – Tipo de Combustível – Brasil. Fonte: ANFAVEA – Associação Nacional dos Fabricantes de Veículos, 2009.	5
Figura 4 - Participação dos modais na matriz de transporte dos EUA e do Brasil em 2010. Fonte: ILOS, 2012.	7
Figura 5 - Matriz de Transporte de Etanol no Brasil. MILANEZ et al 2010.	9
Figura 6 - Exemplo de painel de segurança e rótulo de risco. Fonte: TORRERO 2013.	10
Figura 7 - Rótulo de Risco utilizado para transporte de líquidos inflamáveis. Fonte: TORRERO 2013.	10
Figura 8 - Caminhão tanque com rótulo de risco de líquidos inflamáveis e painel de segurança. Fonte: Gazeta Web, 2013.	12
Figura 9 - Emergências Químicas atendidas pela CETESB entre 1978 e 2011. Fonte: CETESB 2011.	15
Figura 10 – Emergências atendidas pela CETESB por classe de risco. Fonte: CETESB 2011.	16
Figura 11 - Caminhão de combustível tombado na Rua Atucuri - Zona Oeste de São Paulo. Fonte: Portal Terra de notícias, 2013.	16
Figura 12 – Caminhão tombado na BR – 116. Fonte: Blog Sobrevivencialismo no Brasil, 2013.	17
Figura 13 - Áreas de Isolamento e Proteção. Fonte: ABIQUIM, 2011.	19
Figura 14 - Fluxograma com ações a serem tomadas em caso de emergência. Fonte: DNIT, 2005.	21
Figura 15 - Triângulo do fogo. Fonte:UFRRJ, 2013.	22
Figura 16 - Incêndio do tipo <i>Jet Fire</i> . Fonte: <i>Industrial Gasburner</i> , 2013.	23
Figura 17 - Incêndio do tipo <i>Fire Ball</i> Fonte: <i>Neinzuregl-Suedeschiene</i> , 2013.	24
Figura 18 - Incêndio do tipo <i>Poll Fire</i> . Fonte: Pyrotarp, 2013.	24
Figura 19 - Parâmetros de escoamento do modelo de fonte. Fonte: TORRERO, 2013.	26
Figura 20 - Relação entre a taxa de emissão de calor e as fases da combustão. Fonte: FTD, 2004.	29
Figura 21 - Características dinâmicas do incêndio em poça. Fonte: UTK, 2013.	30
Figura 22 - Modelos de radiação térmica. Fonte: (NIST, 2000).	32
Figura 23 - Correlações empíricas de “Shokri e Beyler” e “Mudan e Croce”, para incêndios em poça. Fonte: (NIST, 2000).	33
Figura 24 - Incêndio em poça de diesel com 15 metros quadrados de área. Fonte: NIST, 2000.	34
Figura 25 - Modelo de chama sólida modificado. Fonte: (NIST, 2000).	34
Figura 26 - Altura da zona luminosa para incêndio a gasolina, onde $X_{r_{max}} = 0,35$, $q_f'' = 2400$ kW/m ² , $k = 0,05$ m ⁻¹ e $E_f = 100$ kW/m ² . Fonte: NIST, 2000.	36

Figura 27 - Coordenadas utilizadas na estimativa do fator de forma. Fonte: (NIST, 2000)...	37
Figura 28 - Modelos esquemáticos de cilindro e de placa para cálculo do fator de forma. Fonte: (NIST, 2000).....	38
Figura 29 - Notações usadas para o calculo do fator F para um elemento pontual (2) exposto a uma radiação de uma superfície (1). Fonte: SCORALICK E CESARIO, 2013.	40
Figura 30 - Elemento diferencial planar para retângulo paralelo finito. Fonte: (SCORALICK E CESARIO, 2013).....	41
Figura 31 - Elemento diferencial planar para retângulo em 90° ao plano do elemento e perpendicular a borda do plano (SCORALICK E CESARIO, 2013).	41
Figura 32 - elemento diferencial inclinado em um ângulo arbitrário a um retângulo finito (A2 não deve passar através do plano de dA1). Fonte: SCORALICK E CESARIO, 2013.....	42
Figura 33 - Elemento no plano ao exterior do cilindro circular de comprimento finito. O plano não intercepta o cilindro. Fonte: SCORALICK E CESARIO, 2013.	42
Figura 34 - Elemento na forma de anel planar ou coaxial em um plano perpendicular ao plano do cilindro de altura finita. Fonte: SCORALICK E CESARIO, 2013.	43
Figura 35 - Modelo representativo de um tanque de Etanol com 45 m ³	45
Figura 36 - Distância Aceitável de Separação (ASD) para formas de chama aproximadas por um cilindro. Fonte: (NIST, 2000)	47
Figura 37 - Análise da série histórica de vazamento de etanol nos acidentes atendidos pela CETESB de 1978 até 2013. Fonte: CETESB.	50
Figura 38 - Causas dos acidentes no transporte rodoviário de Etanol com vazamento. Fonte: CETESB.	51
Figura 39 - Carreta de etanol tombada. Fonte: http://www.jcnet.com.br , acessado em 21 de setembro de 2013.	51
Figura 40 - Cenários considerados no vazamento constante do fluido. (A seta e a bola vermelha indicam os locais de vazamento).	52
Figura 41 - Diâmetro encontrado para os cenários propostos.	54
Figura 42 – Altura da chama encontrada para os cenários propostos.....	54
Figura 43 - Pontos ASD para diâmetros de chama igual a 20 m.	56
Figura 44 - Resultados das regressões realizadas para obtenção da relação ASD x qf".	57
Figura 45 - Resultados de ASD obtidos pelo método "Gráfico Simplificado".	58
Figura 46 - Valores de H/D para os cenários avaliados.	59
Figura 47 - Fragmento da tabela de fator de forma para uma chama cilíndrica. Fonte: NIST, 2000.....	60
Figura 48 - Resultado da regressão linear S/D x F.	61
Figura 49 - S/D encontrado para os cenários avaliados.	61
Figura 50 - ASD encontrados para o método do cálculo detalhado para os cenários avaliados.	62
Figura 51 - Comparação entre as ASD's encontradas pelos métodos utilizados.	62

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 - Projeção da demanda potencial de etanol (em bilhões de litros) <i>Fonte: MILANEZ, A. Y. et al, 2012.</i>	5
Tabela 2 - Crescimento planejado da produção (por meio de expansões e greenfields) pelos grupos econômicos entrevistados (em bilhões de litros). <i>Fonte: MILANEZ, A. Y. et al, 2012.</i>	6
Tabela 3 - Relação de classes de produtos perigosos. <i>Fonte: Resolução ANTT 420.</i>	11
Tabela 4 – Resumo dos itens constantes da legislação municipal de São Paulo sobre o transporte de cargas perigosas (COSTA E RIBEIRO, 2011).	13
Tabela 5 - Taxa de emissão de calor para alguns materiais (FTD, 2004).	28
Tabela 6 - Fator F para o modelo cilíndrico com um elemento recebendo radiação máxima. <i>Fonte: NIST, 2000.</i>	39
Tabela 7 - Fator F para o modelo placa plana com um elemento recebendo radiação máxima. <i>Fonte: NIST, 2000.</i>	39
Tabela 8 - Taxas de emissão térmica para líquidos perigosos. <i>Fonte: (NIST, 2000)</i>	48
Tabela 9 - Resumo dos cenários.	52
Tabela 10 - Valores de ASD encontrados para diferentes diâmetros de chama.	55
Tabela 11 - Valores de fator de forma utilizados para a regressão S/D x F.	59

Lista de Símbolos

Q : taxa de liberação de calor;

q_f' : taxa de liberação de calor por unidade de área do combustível;

A : horizontal da poça;

H_{ef} : altura da região luminosa;

X_{rmax} : fração radiada máxima;

k : constante (0,05 1/m);

D : diâmetro do chama;

E_f : poder emissivo total do fogo na sua superfície;

q'' : fluxo de radiação térmica;

F é o fator de forma;

τ_f : transmissividade atmosférica para a radiação térmica;

ϵ_f : emissividade efetiva da chama;

H_f : altura da chama (m);

D : diâmetro da poça;

ρ_a : densidade do ar ambiente;

g : aceleração da gravidade;

m'' : taxa de queima;

$\Delta H_{c,eff}$: calor efetivo de combustão;

A_f : área horizontal de combustível;

k, β : constantes empíricas;

V : volume vazado;

V_{mL} : vazão mássica;

ρ : densidade do fluido;

C_0 : fator de atrito;

A : área do furo;

P_g : pressão manométrica no interior do recipiente;

h_{L0} : altura inicial do líquido;

A_t : área transversal do tanque;

T : tempo de vazamento;

$D_{\text{máx}}$: diâmetro máximo da poça;

V_s : vazão volumétrica;

y : taxa de regressão do líquido no incêndio em poça;

$t_{\text{máx}}$: tempo para atingir o diâmetro máximo da poça.

1 Introdução

O desenvolvimento econômico nacional elevou as taxas de consumo de inúmeros produtos, forçando o aumento de produção das plantas industriais. As elevações do consumo e da produção ocasionaram, por sua vez, um maior fluxo desses produtos ao longo do território nacional, permitindo a chegada ao consumidor final.

No caso do Etanol Combustível, o aumento da frota de veículos *flex* aliado ao possível aumento do preço final da gasolina, irá alavancar fortemente a demanda por este combustível nos próximos anos. Desta forma a movimentação deste produto dentro do território nacional tende a aumentar consideravelmente.

O aumento do fluxo desse produto torna também cada vez mais frequentes as ocorrências de acidentes. Embora os acidentes possam ocorrer em qualquer fase do processo, da fabricação até chegada ao consumidor final, é durante o transporte que a segurança operacional torna-se ainda mais complexa. Segundo Torrero (2013), na etapa de transporte existem inúmeras variáveis que não podem ser controladas, diferente de um ambiente industrial, onde as condições são controladas e estabelecidas.

Em cenários de acidentes com produtos perigosos é importante ter respostas rápidas e corretas. O “Manual de Atendimento a Emergência para Produtos Perigosos”, da ABIQUIM (Associação Brasileira da Indústria Química), é uma fonte de consulta rápida e que fornece informações de segurança para emergências com diversos produtos, auxiliando os profissionais de emergência nas decisões iniciais.

1.1 Objetivo

O presente estudo tem como objetivo avaliar a área de isolamento inicial proposta pelo Manual da ABIQUIM em caso de acidente rodoviário envolvendo carga de etanol combustível. As recomendações do Manual foram confrontadas com a metodologia de simulação de incêndios em poças de líquidos inflamáveis proposta pelo NIST – *National Institute of Standards and Technology* (2000). O NIST é uma agência americana que desenvolve padrões, normas, procedimentos e tecnologias. A metodologia NIST permite o cálculo da distância de separação aceitável (distância segura) entre o evento acidental e a população vizinha.

2 Mercado de Etanol: oferta, demanda e logística

Pelo fato de apresentar elevada produtividade agrícola, inúmeras aplicações, e crescente interesse pelas questões de sustentabilidade, o etanol brasileiro, proveniente da cana-de-açúcar, é um combustível com grande potencial de emprego (MILANEZ *et al*, 2010). Em relação ao mercado de combustíveis, o etanol hidratado representa quase 10% do total de combustíveis comercializados no Brasil, em todos os setores, e não apenas automotivo (Figura 1). Embora de amplo uso, a parcela de etanol permanece menor que a da gasolina no caso do mercado automotivo. Ressalta-se que a partir de maio de 2013, a gasolina automotiva passou a ser composta por 25% de etanol anidro. Ou seja, o consumo de gasolina acaba, indiretamente, elevando também o consumo de etanol no país.

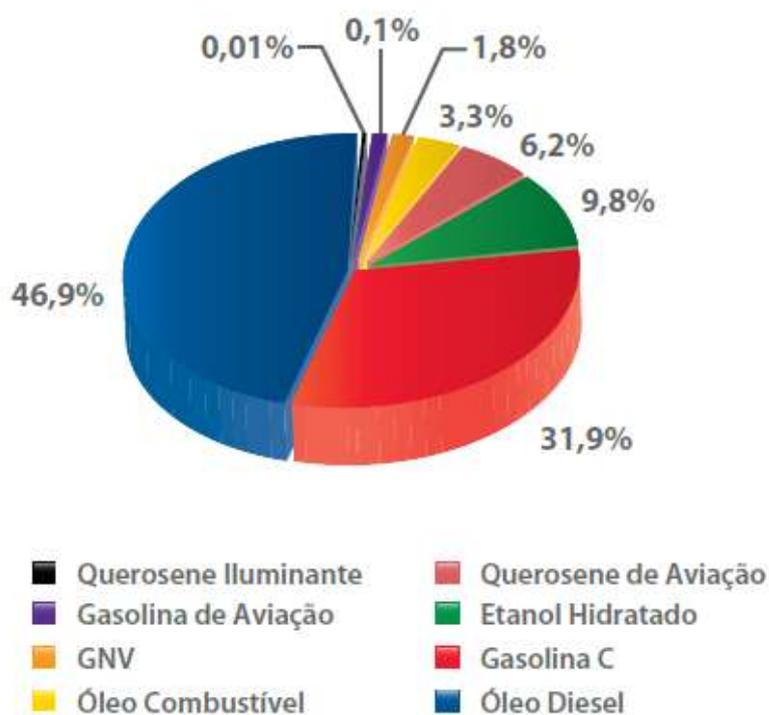


Figura 1 - Participação no mercado por produto em 2012. Fonte: Sindicato de Distribuidores de Combustível – SINDICOM.

2.1 Histórico

Antes da década de 70 o etanol combustível não era considerado economicamente relevante para o Brasil, e sua produção era complementar à de açúcar, produto que impulsionava a expansão canieira principalmente para o atendimento da demanda externa. Contudo, a crise do petróleo, em 1973, promoveu forte elevação no preço desta matéria-

prima como mostra a Figura 2, além de gerar instabilidade no seu fornecimento. Em paralelo, houveram problemas no mercado internacional de açúcar devido a superprodução, promovendo redução acentuada nos preços deste produto. Com o simultâneo aumento do preço do petróleo e queda no preço do açúcar, fazia sentido empregar o etanol como combustível substituto à gasolina, derivada do petróleo. Deste modo, o governo brasileiro lançou, em 1975, o Programa Nacional do Álcool (Proálcool), impulsionando a produção deste combustível e incentivando a modernização e a consolidação do setor (Portal Nova Cana).

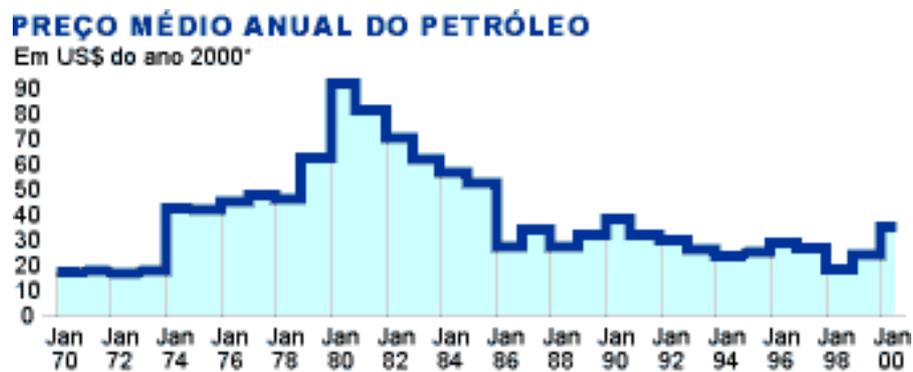


Figura 2 - Preço médio anual do petróleo. Fonte: Folha Online, 2013.

Posteriormente, no período entre as décadas de 80 e de 90, o mercado brasileiro de etanol atravessou uma forte crise decorrente de três fatores: (i) crise fiscal no governo brasileiro, reduzindo significativamente os financiamentos subsidiados aos antigos e novos empresários do setor; (ii) redução dos preços internacionais do petróleo (Figura 2); (iii) e crise de abastecimento de etanol no mercado interno, em 1989, decorrente da oferta insuficiente de álcool. O desabastecimento ocorreu devido ao fato que a produção nacional de etanol não acompanhou a elevação da demanda interna, já que muitos produtores direcionaram suas produções para o açúcar, aproveitando-se dos elevados preços internacionais (RAMOS E FILHO, 2006). Deste modo, embora o Brasil tivesse se tornado uma referência mundial no uso de etanol como combustível automotivo, a venda de carros a álcool foi reduzida a praticamente zero nos anos seguintes, com um total descrédito do público sobre a viabilidade do Pró-Alcool. Enquanto campanha publicitária de 1983 anunciava “Carro a álcool, você ainda vai ter um”, no início da década de 90 possuir um carro movido a etanol era um “mico” (ISTO É DINHEIRO, 2012).

Quase quarenta anos depois do início do Proálcool, o mercado nacional de etanol se encontra novamente em uma fase positiva. A recuperação ocorreu a partir de 2003, com o

advento da tecnologia de motores *flex fuel*. De acordo com a Agência Nacional de Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis – ANP, entre 2003 e 2008, a demanda por etanol hidratado apresentou crescimento acumulado de aproximadamente 310%. Segundo dados do Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento – MAPA, a produção de etanol era de 14,6 bilhões de litros na safra 2003-2004, alcançando 27,7 bilhões de litros na safra 2008-2009 (MILANEZ *et al*, 2010). Destaca-se, porém, que o aumento no consumo de etanol não se deve apenas ao sucesso dos motores *flex*, mas também ao teor crescente de álcool na gasolina, exigido pelo governo.

É ainda importante observar que os automóveis *flex* proporcionam não apenas demanda atual, mas também demanda potencial por álcool no futuro. A demanda potencial pode ou não se concretizar, dependendo da relação entre os preços do etanol e da gasolina para o consumidor final. Do ponto de vista do consumidor final, avaliando preço e quilometragem por litro, o preço do etanol deve corresponder a cerca de 70% do preço da gasolina para que, financeiramente, o consumidor se torne indiferente entre os dois combustíveis no momento de abastecer seu veículo. Para a maior parte da população, o emprego do biocombustível não se deve a razões ecológicas ou de sustentabilidade, mas sim ao custo direto do combustível na bomba. Deste modo, é o desempenho do veículo (quilômetros por litro) e o preço do combustível na bomba, que definem a escolha pelo combustível a ser empregado.

Conforme dados fornecidos pela Associação Nacional dos Fabricantes de Veículos Automotores – Anfavea, as vendas de veículos *flex* representavam em 2009 cerca de 80% das vendas totais de automóveis, como pode ser visto na Figura 3. A participação desses veículos na frota total de automóveis vem crescendo ao longo dos anos, gerando uma perspectiva de crescimento sustentado no longo prazo para o mercado de etanol combustível no Brasil. Contudo, pode-se estar assistindo ao surgimento dos mesmos problemas que no passado promoveram o fracasso do Proálcool. O aumento da demanda por etanol combustível vem promovendo descompasso no mercado, com crescimentos desiguais da demanda potencial e da oferta. A consequência mais visível desse *gap* se dá sobre os preços do etanol. De acordo com o Centro de Estudos Avançados em Economia Aplicada – Cepea da Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz (Esalq), houve aumento de 27% de preços médios de venda do etanol pelas usinas entre as safras 2008-2009 e 2010-2011 (MILANEZ, *et al*, 2012).

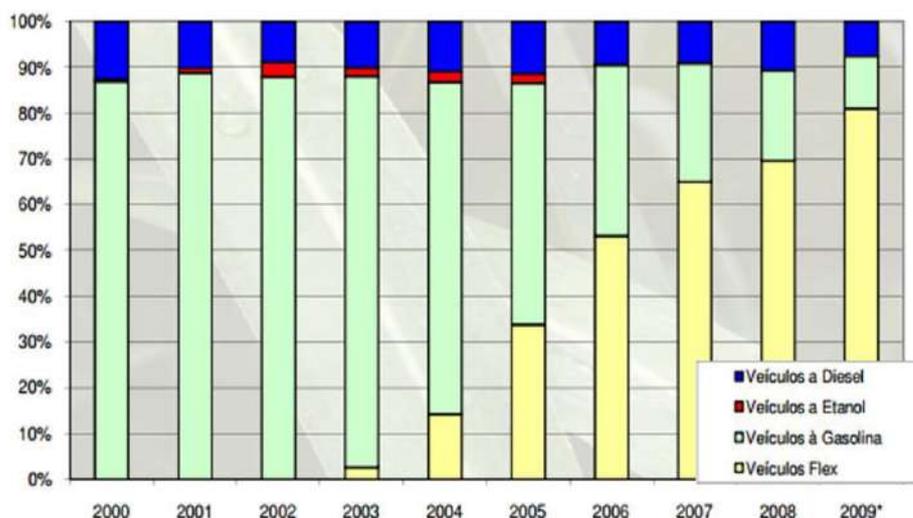


Figura 3 - Comparação de produção de automóveis – Tipo de Combustível – Brasil. Fonte: ANFAVEA – Associação Nacional dos Fabricantes de Veículos, 2009.

Para superar os problemas associados à oferta de etanol, é essencial investir no setor sucroenergético e na expansão de sua capacidade produtiva. Em função disso, por meio de uma pesquisa de intenção de investimentos com os maiores grupos do setor, Milanez e colaboradores (2012) fizeram um estudo para avaliar se a oferta planejada é suficiente para suprir a demanda potencial de etanol até o ano de 2015. A Tabela 1 foi extraída deste estudo, e apresenta a projeção de demanda de etanol.

Tabela 1 - Projeção da demanda potencial de etanol (em bilhões de litros) *Fonte:* MILANEZ, *et al*, 2012.

	2011	2012	2013	2014	2015
Demanda doméstica por etanol carburante	23.7	27.8	31.5	36.2	40.8
Demanda domestica por etanol não carburante ¹	2.7	2.7	2.8	2.9	2.8
Demanda internacional	1.8	2.0	2.5	3.2	3.9
Demanda total	28.2	32.5	36.8	42.3	47.5

¹ Etanol utilizado para fins que não a combustão. Ex: Etanol utilizado em produtos de limpeza, produção de cosméticos e etc.

Com base na Tabela 1, a demanda potencial por etanol crescerá 19,6 bilhões de litros até 2015, o que representa um aumento de quase 13% ao ano entre 2011 e 2015. Para que toda essa demanda potencial seja plenamente atendida pela oferta doméstica de etanol é preciso incrementar a produção de cana, incorporar novas áreas para cultivo e, talvez criar programas de subsídios para os produtores. Porém, em um cenário econômico complexo, com gastos governamentais em elevação e receitas em queda, os subsídios governamentais podem não ser viáveis.

2.2 Deficit do Etanol

No estudo de Milanez e colaboradores (2012) foi realizada pesquisa de investimentos com os principais grupos econômicos do setor sucroenergético. Ao todo, participaram da pesquisa 21 desses grupos, cuja produção efetiva de etanol representa cerca de 43% da produção brasileira. Adicionalmente, o estudo recorreu a anúncios veiculados na mídia, com base nos quais foi possível mapear o crescimento pretendido de outros três grupos do setor. O estudo mostra que, quanto à capacidade de moagem, o crescimento total desses grupos deverá ser de 35 milhões de toneladas de cana, que, acrescido à capacidade atual de 33,5 milhões de toneladas, permitirá alcançar uma capacidade total de 68,5 milhões de toneladas na safra 2015-2016.

Tabela 2 - Crescimento planejado da produção (por meio de expansões e greenfields) pelos grupos econômicos entrevistados (em bilhões de litros). Fonte: MILANEZ, A. Y. et al, 2012.

	2010	2011	2012	2013	2014	2015
Capacidade de produção instalada	13.0	14.6	16.7	19.9	21.9	23.6
Produção efetiva	9.1	10.3	12.8	15.6	17.0	18.2
Capacidade de produção (%)	30.0	29.0	23.0	22.0	22.0	23.0
Crescimento acumulado da capacidade instalada por meio de expansões e greenfields		1.6	2.1	5.3	7.3	8.9
Crescimento acumulado da produção efetiva		1.2	2.5	5.3	6.7	7.9

Verifica-se pela

Tabela 2 que os principais grupos do mercado pretendem ter um crescimento acumulado de capacidade de produção de etanol de 8,9 bilhões de litros na safra de 2015/2016, sendo que o crescimento acumulado efetivo se restringe a 7,9 bilhões de litros. O estudo realizado por Milanez et al (2012) também mostra que esse acréscimo de capacidade de produção seria capaz de atender ao acréscimo da demanda.

2.3 Transporte de Etanol

Pensando no cenário de logística atual, embora o governo venha aumentando os investimentos em outros modais, o principal meio para transporte de cargas no Brasil ainda é o modal rodoviário, o qual respondia por 63% do TKU (Tonelada por Quilômetro Útil) movimentado no país, segundo pesquisa feita pelo Instituto ILOS em 2010, conforme Figura 4. O grande volume movimentado e o fato de ser um dos modais com preço unitário mais elevado para longas distâncias (perdendo apenas para o aéreo) fazem com que o transporte rodoviário de cargas tenha ampla representatividade nos custos logísticos do país. Segundo Hjar e Lobo (2011), em 2008, os gastos com a movimentação de carga pelas rodovias brasileiras foram de R\$ 164,5 bilhões, o que representa 5,7% do Produto Interno Bruto (PIB) brasileiro.

Comparado a outros países, como Estados Unidos, a matriz de transporte brasileiro se mostra muito dependente do modal rodoviário, conforme Figura 4.

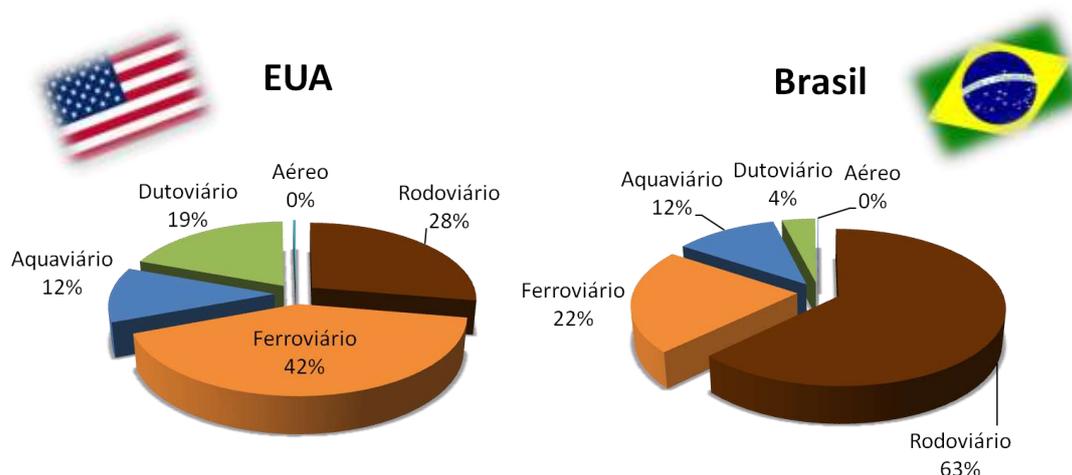


Figura 4 - Participação dos modais na matriz de transporte dos EUA e do Brasil em 2010.

Fonte: ILOS, 2012.

Analisando os motivos para a predominância deste modal no Brasil, destaca-se o grande período de tempo no qual o governo priorizou o desenvolvimento do transporte rodoviário em detrimento dos demais. O governo passou anos investindo em construção de novas estradas, facilitando o crédito para aquisição de veículos, especialmente caminhões, e modernizando as estradas já existentes. O segundo grande motivo para a predominância deste modal é o baixo número de restrições e as fracas regulamentações impostas para o transporte rodoviário.

Embora longe de ser o ideal em relação aos outros modais, o modal rodoviário possui algumas vantagens, em especial a maior velocidade de respostas às demandas, devido ao baixo custo dos investimentos e às menores exigências regulamentadoras. Porém, as péssimas condições de muitas estradas brasileiras, que aliada à manutenção precária de veículos, acabam por ocasionar frequentes interrupções no transporte, assim como os engarrafamentos especialmente nas proximidades dos grandes centros urbanos e portos, prejudicam o desempenho deste modal. É interessante destacar que embora este modal tenha contado com o incentivo do governo durante muitos anos, refletindo-se em uma das malhas rodoviárias mais extensas do mundo, o Brasil conta com apenas 13% das rodovias pavimentadas, um índice muito aquém das principais economias mundiais (HIJJAR E LOBO 2011).

Tratando do transporte de etanol especificamente, a predominância do transporte rodoviário é ainda mais acentuada. Isto deve-se à alta competitividade do modal para curtas distâncias e baixo volume de carga. Muitas usinas produtoras de etanol estão localizadas em locais isolados, produzindo volumes que não justificam o investimento em outros meios de transporte, tais como ferroviário ou dutoviário (MILANEZ et al 2010). Como se pode verificar na Figura 5, somente o volume transportado pelo modal rodoviário representa mais de 90% das movimentações do produto em território nacional. Destaca-se que grande parte deste volume é composto pelo fluxo que sai dos produtores do estado de São Paulo e segue para os consumidores na própria região sudeste. O estado de São Paulo concentrou nos anos de 2006 / 2007, 60% da produção nacional (BERNARDES 2012).

Na Figura 5 destaca-se ainda o percentual transportado pelo modal ferroviário (7%). Este se deve quase exclusivamente ao volume transportado pela empresa ALL na malha que liga a região centro oeste à região sul do Brasil (MILANEZ et al 2010).

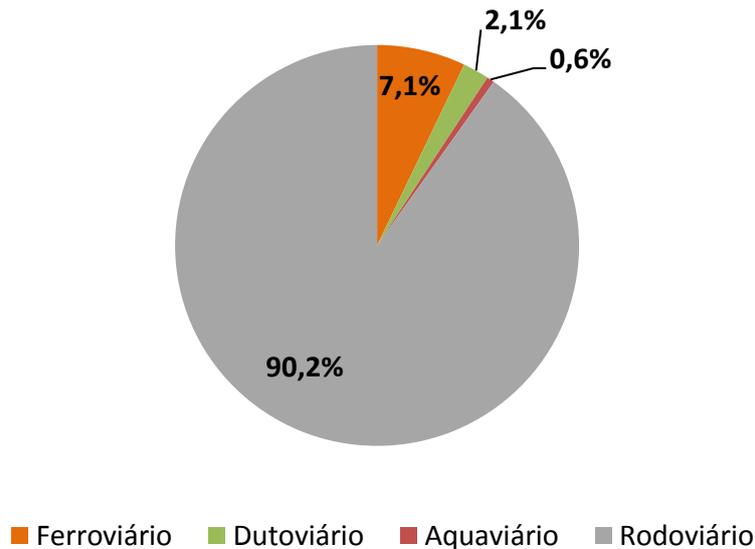


Figura 5 - Matriz de Transporte de Etanol no Brasil. MILANEZ et al 2010.

2.4 Transporte Rodoviário de Produtos Perigosos

O etanol é classificado como um líquido inflamável pela Norma 30 da NFPA - National Fire Protection Association, sendo por tanto considerado um “produto perigoso” para o transporte. No Brasil, produtos perigosos tem sua regulamentação de transporte, tanto rodoviário quanto ferroviário, regida pela ANTT – Agência Nacional de Transportes Terrestres. A ANTT estabelece os padrões necessários para a movimentação desse tipo de carga no Brasil através da Resolução 420, de 12 de fevereiro de 2004.

A ANTT estabelece, entre outros fatores, a indentificação visual da carga, representando graficamente seus riscos. A identificação visual dos riscos ocorre com a colocação de “rotulos de risco” e “painéis de segurança”. O painel de segurança deve possuir o número de risco e o número da ONU, enquanto o rótulo de risco deve apresentar o símbolo de risco e a classe ou subclasse de risco, conforme mostrado na Figura 6 e Figura 7. Os rótulos para cada classe, estabelecidos na resolução 420 da ANTT, estão ilustrados no Anexo 1.

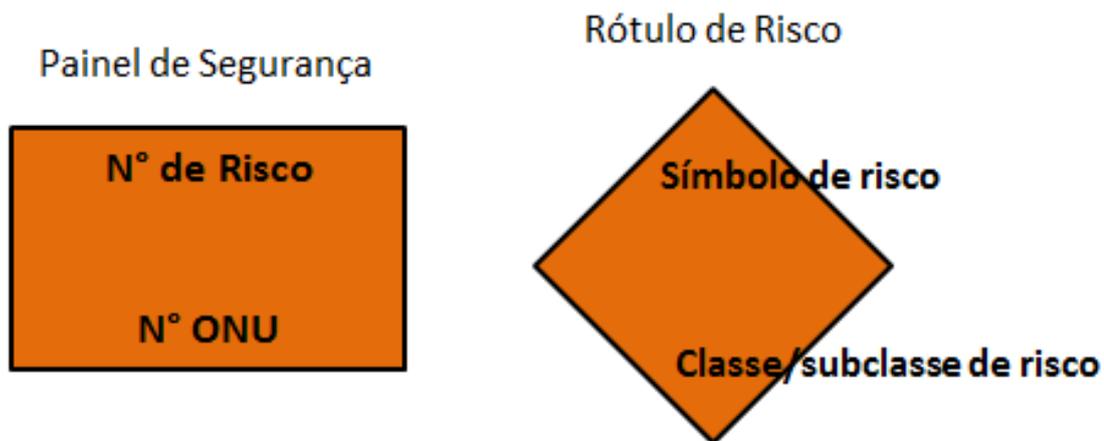


Figura 6 - Exemplo de painel de segurança e rótulo de risco. Fonte: TORRERO 2013.



Figura 7 - Rótulo de Risco utilizado para transporte de líquidos inflamáveis. Fonte: TORRERO 2013.

A Tabela 3 mostra a relação das classes e subclasses para o transporte, as quais possuem seus respectivos rótulos de risco.

Tabela 3 - Relação de classes de produtos perigosos. Fonte: Resolução ANTT 420.

Classe	Subclasse	Definições
Classe 1: Explosivos	Subclasse 1.1	Substâncias e artigos com risco de explosão em massa
	Subclasse 1.2	Substâncias e artigos com risco de projeção, mas sem risco de explosão em massa
	Subclasse 1.3	Substâncias e artigos com risco de fogo e com pequeno risco de explosão ou de projeção, ou ambos, mas sem risco de explosão em massa
	Subclasse 1.4	Substâncias e artigos que não apresentam risco significativo
	Subclasse 1.5	Substâncias muito insensíveis, com risco de explosão em massa
	Subclasse 1.6	Artigos extremamente insensíveis, sem risco de explosão em massa
Classe 2: Gases	Subclasse 2.1	Gases inflamáveis
	Subclasse 2.2	Gases não-inflamáveis, não-tóxicos
	Subclasse 2.3	Gases tóxicos
Classe 3: Líquidos inflamáveis	-	Líquidos inflamáveis
Classe 4: Sólidos inflamáveis; substâncias sujeitas à combustão espontânea; substâncias que, em contato com água, emitem gases inflamáveis	Subclasse 4.1	Sólidos inflamáveis, substâncias auto-reagentes e explosivos sólidos insensibilizados
	Subclasse 4.2	Substâncias sujeitas à combustão espontânea
	Subclasse 4.3	Substâncias que, em contato com água, emitem gases inflamáveis
Classe 5: Substâncias oxidantes e peróxidos orgânico	Subclasse 5.1	Substâncias oxidantes
	Subclasse 5.2	Peróxidos orgânicos
Classe 6: Substâncias tóxicas e substâncias infectantes	Subclasse 6.1	Substâncias tóxicas
	Subclasse 6.2	Substâncias infectantes
Classe 7: Material radioativo	-	:Material radioativo
Classe 8: Substâncias corrosivas	-	Substâncias corrosivas
Classe 9: Substâncias e artigos perigosos diversos	-	Substâncias e artigos perigosos diversos

O transporte de produtos perigosos também é caracterizado pelo uso de veículos especiais, os quais variam de acordo com as propriedades do produto. O etanol, assim como diversos outros líquidos inflamáveis, é transportado em caminhões-tanques não pressurizados, como o mostrado na Figura 8.



Figura 8 - Caminhão tanque com rótulo de risco de líquidos inflamáveis e painel de segurança. Fonte: Gazeta Web, 2013.

2.5 Legislação

A legislação federal brasileira referente ao transporte de produtos perigosos é composta de um decreto-lei, oito leis, nove decretos, trinta e nove resoluções, dez portarias, dezessete regulamentos técnicos, uma instrução normativa, dezessete normas brasileiras e onze normas regulamentadoras (COSTA E RIBEIRO, 2011).

Segundo Torrero (2013), o primeiro país da América Latina a regulamentar o transporte de produtos perigosos foi o Brasil. Isto aconteceu no início da década de 80 após um acidente com pentaclorofenato de sódio que vitimou 6 pessoas no Rio de Janeiro. Época na qual entrou em vigor a primeira legislação no âmbito nacional, e primeira da América Latina, sobre transporte de produtos perigosos, o Decreto nº 88.821 de 06 de outubro de 1983.

Para muitos analistas o decreto criava excessiva burocracia e limitava o fluxo de carga necessário ao desenvolvimento. Tal decreto era uma compilação de regulamentos de outros países, e foi substituído pelo Decreto 96004/88. Finalmente, em 12 de fevereiro de 2004 foi aprovada a resolução 420 da ANTT, que complementava e acrescentava instruções para o transporte desses produtos.

Além da legislação federal, alguns estados que têm suas próprias leis e resoluções que tratam do assunto, como Rio Grande do Sul (Lei nº 7.877, de 28 de dezembro de 1983), Bahia (Resolução nº 1039, de 06 de dezembro de 1994), Distrito Federal (Decreto n.º 21.930, de 31 de janeiro de 2001), Paraná (Decreto nº 4299, de 21 de junho de 2001) e Santa Catarina (Decreto nº 2.894, de 20 de maio de 1998) (COSTA E RIBEIRO 2011).

Enquanto o governo federal e alguns estados contam com regulamentação sobre o transporte de produtos perigosos, o mesmo cenário não é observado nos municípios. Poucas cidades possuem uma legislação própria sobre este tema, como é o caso da cidade de São Paulo (COSTA E RIBEIRO, 2011). Segundo os autores, a cidade de São Paulo possui hoje a legislação de transporte de produtos perigosos mais completa do Brasil. A Tabela 4 detalha os itens constantes da legislação municipal de São Paulo.

Tabela 4 – Resumo dos itens constantes da legislação municipal de São Paulo sobre o transporte de cargas perigosas (COSTA E RIBEIRO, 2011).

Itens	Legislação Municipal de São Paulo
Comissão Municipal	ok
Condições de Circulação	ok
Fornecimento de Informações	ok
Plano de Emergência	ok
Pátios de Retenção	ok
Fiscalização	ok
Penalidades	ok
Cadastro na Prefeitura	ok
Especificações Técnicas	X

Segundo Torrero (2013), para atualizar e fiscalizar todos esses decretos, leis e resoluções, existem vários órgãos que atuam conjuntamente, dos quais podem-se citar o Ministério dos Transportes, representado pelo GEIPOT (Empresa Brasileira de Planejamento de Transportes); a ANTT e o DNIT, que além de outras atribuições, são responsáveis pela pesquisa e elaboração de documentos-base para a regulamentação dos modais ferroviário e rodoviário; o INMETRO (Instituto Nacional de Metrologia), encarregado da elaboração de regulamentos técnicos (Normas Técnicas), que visam a viabilização da segurança e qualidade de veículos, equipamentos e operações; a ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas), mais especificamente o CB 16 (Comitê Brasileiro 16), responsável pela elaboração de normas técnicas necessárias para subsidiar a implementação da legislação do Ministério dos Transportes.

2.6 Acidentes no Transporte de Produtos Perigosos

Embora o transporte de produtos perigosos sempre represente risco não apenas para os profissionais responsáveis pelo deslocamento da carga, mas também para a população em geral, o desenvolvimento econômico de um país muitas vezes está relacionado tanto à

produção quanto ao transporte de produtos químicos. Isso se torna especialmente relevante no caso do transporte de combustíveis.

O órgão ambiental de São Paulo - CETESB, destaca que a atividade de transporte de produtos perigosos envolve sempre riscos ao meio ambiente e às pessoas (CETESB, 2005). Alguns fatores colaboram para o aumento do número de ocorrências e a gravidade dos acidentes nas rodovias do país. Dentre estes se destaca a urbanização ao longo de trechos das rodovias, que aumenta a densidade demográfica nas proximidades da malha rodoviária. Este aumento ocasiona uma maior probabilidade de atropelamentos de animais e pessoas que atravessam constantemente a via. Eleva ainda a possibilidade de colisões com veículos em baixa velocidade entrando ou saindo das áreas urbanas. Além da maior probabilidade de acidentes, a proximidade física da população com a estrada eleva o risco desta população ser exposta a cargas perigosas durante cenários acidentais. Outros fatores relevantes são a utilização de frotas de caminhões com idade avançada, uso indevido de medicamentos por parte dos motoristas, as jornadas de trabalho muito longas, os problemas de conservação das vias, etc. (ALVES et al 2009).

Um acidente rodoviário com veículo transportando carga perigosa pode ocasionar diferentes cenários acidentais, tais como explosões, incêndios, formações de nuvens tóxicas ou inflamáveis, etc. As explosões podem ser físicas ou químicas. As explosões físicas são ocasionadas pela rápida descompressão de gás pressurizado, como ocorre durante o estouro de um pneu. Os efeitos desta explosão tendem a ser locais. As explosões químicas porém envolvem reações químicas extremamente energéticas, emitindo calor e gerando forte onda de pressão. Os danos gerados por uma explosão química podem se alastrar por dezenas de metros. A explosão pode resultar em incêndios ou no lançamento de fragmentos – “efeito granada”. Além de causar danos patrimoniais, explosões podem ser fatais para socorristas e população próxima, causando queimaduras, traumatismos e lesões variadas (CURBANI, 2006).

No caso de incêndios envolvendo cargas perigosas, há o perigo do calor emitido pela queima. A emissão do calor pode ser letal por si só, além de promover a propagação do fogo ou gerar a ocorrência de explosões, em particular de BLEVE².

² 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: TORRERO 2013.

Finalmente, existem ainda cenários envolvendo a liberação de nuvens inflamáveis ou tóxicas. Tais nuvens podem atingir regiões distantes. Enquanto nuvens inflamáveis representam um perigo em função da ocorrência de incêndio ou explosão, nuvens tóxicas podem ser letais devido a sua ação toxicológica sobre os seres vivos.

Acidentes com produtos perigosos podem ocorrer em diversas etapas da cadeia de produção e escoamento, porém as incertezas na etapa de transporte são maiores devido ao grande número de variáveis presentes (TORRERO, 2013). Segundo registros de acidentes atendidos pela CETESB envolvendo agentes químicos no período de 1978 a 2011, cerca de 50% foram na etapa de transporte (Figura 9). Devido às características do transporte de carga no Brasil, existe grande destaque para o modal rodoviário, que concentrou 42,1% dos registros de acidentes no período (Figura 9).

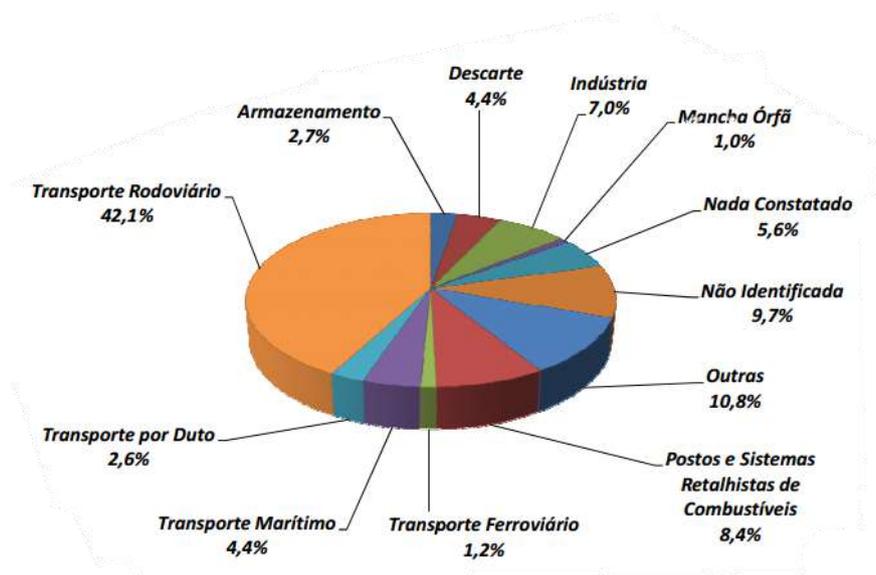


Figura 9 - Emergências Químicas atendidas pela CETESB entre 1978 e 2011. Fonte: CETESB 2011.

Dentre os produtos perigosos, os líquidos inflamáveis (classe na qual se insere o etanol) se destaca no percentual de acidentes atendidos pela CETESB. Os líquidos inflamáveis foram responsáveis por mais de 33% das ocorrências, como se pode observar na Figura 10. Embora esse dado pareça inicialmente alarmante, ele é provavelmente decorrência do elevado uso deste modal no transporte de líquidos perigosos.

A Figura 11 e a Figura 12 mostram exemplos de acidentes com veículos, que transportavam combustível.

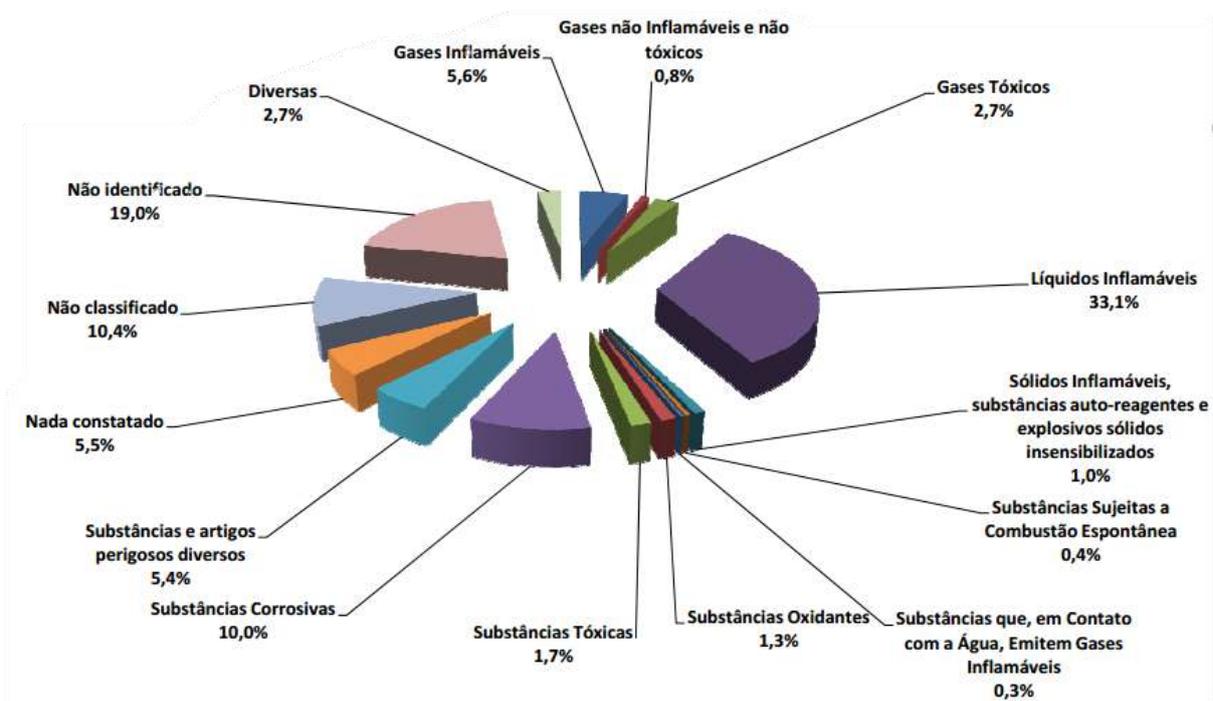


Figura 10 – Emergências atendidas pela CETESB por classe de risco. Fonte: CETESB 2011.



Figura 11 - Caminhão de combustível tombado na Rua Atucuri - Zona Oeste de São Paulo.

Fonte: Portal Terra de notícias, 2013.



Figura 12 – Caminhão tombado na BR – 116. Fonte: Blog Sobrevivencialismo no Brasil, 2013.

2.7 Abiquim

A ABIQUIM – Associação Brasileira de Indústrias Químicas é uma entidade sem fins lucrativos e que foi fundada em 16 de junho de 1964. Congrega indústrias químicas bem como prestadores de serviço ao setor, especialmente nas áreas de logística, transporte, gerenciamento de resíduos e atendimentos a emergências. Esta se estruturou para realizar o acompanhamento estatístico do setor, promover estudos sobre as atividades e os produtos desenvolvidos, acompanhar mudanças na legislação e assessorar as empresas associadas em diversos assuntos, inclusive nas negociações de acordos internacionais (ABIQUIM, 2011).

A entidade é formada por comissões temáticas e setoriais constituídas por técnicos e dirigentes das empresas associadas, que formam a base das atividades. 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. O SASSMAQ - Sistema de Avaliação de Segurança, Saúde, Meio Ambiente e Qualidade, tem como objetivo reduzir, de forma contínua e progressiva, os riscos de acidentes nas operações de transporte e distribuição de produtos químicos. O sistema foi lançado pela ABIQUIM em maio de 2001. Destaca-se que as

empresas químicas associadas à ABIQUIM se comprometem a contratar apenas firmas de transporte certificadas pelo SASSMAQ.

Além de atuar na prevenção de acidentes, através do SASSMAQ, a ABIQUIM conta com o Programa Pró-Química, um canal de comunicação via telefone, para fornecer suporte técnico em caso de acidentes com produtos químicos. Além do suporte técnico, o Programa visa ainda estabelecer contato imediato com o fabricante, transportador ou responsável pelo agente químico em caso de acidentes, além de informar entidades públicas e privadas que possam prover atendimento a ocorrências dessa natureza. A central de atendimento do Programa Pró-Química funciona 24 horas por dia.

Adicionalmente, a ABIQUIM lançou, em parceria com a Abicolor, o programa o “Olho Vivo na Estrada”. Este tem como objetivo prevenir atitudes inseguras no transporte de produtos perigosos por meio da conscientização dos motoristas. A meta do programa é reduzir a zero o número de acidentes rodoviários com produtos químicos. O conceito básico do programa é de que, antes de um grande acidente, ocorreram várias pequenas falhas que não foram comunicadas à empresa ou tratadas por esta. O “Olho Vivo na Estrada” incentiva o motorista a relatar essas ocorrências, possibilitando a adoção de ações preventivas ou corretivas (TORRERO, 2013).

Além das comissões e grupos de pesquisa, a ABIQUIM conta ainda com a publicação do “Manual para Atendimento a Emergências com Produtos Perigosos”, lançado pela primeira vez em 1989. Esse Manual tem por base a resolução 420 da ANTT e orientações de transporte terrestre de produtos perigosos da ONU e de outros países.

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 citadas 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, que podem variar de riscos a saúde a explosão. 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.

Na Figura 13 pode ser observada a forma da área de isolamento inicial e a área de proteção, conforme apresentado no Manual.

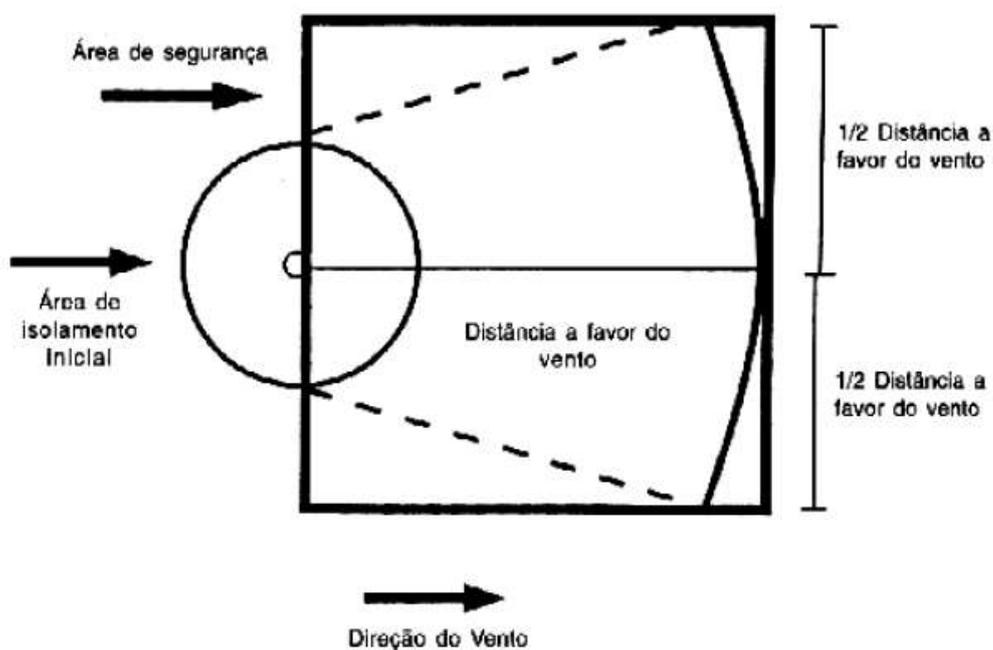


Figura 13 - Áreas de Isolamento e Proteção. Fonte: ABIQUIM, 2011.

Para o etanol é sugerido a utilização da Guia 127, a qual indica como área de isolamento inicial uma distância de 50 metros em todas as direções e posteriormente, no caso de grandes vazamentos, 300 metros na direção do vento. A Guia 127 do Manual da ABIQUIM encontra-se no anexo 2 deste estudo.

2.8 Programa de Atendimento a emergência

Um plano de emergência é composto por uma série de medidas que devem ser tomadas em um possível cenário acidental com objetivo de otimizar os recursos humanos e materiais para mitigar as consequências para a população. O Programa deve conter o

procedimento com as ações a serem tomadas de acordo com o tipo de acidente e produto, além de medidas preventivas.

O DNIT desenvolveu um manual para implementação de um PAE (plano de atendimento à emergência) para atendimento a sinistros envolvendo o transporte rodoviário de produtos perigosos. Este documento indica as ações que devem ser contempladas, além de citar a necessidade da identificação das características da rodovia ou do trecho desta para realização de melhorias na via com o objetivo de evitar a ocorrência de acidentes ou minimizar as consequências, caso este ocorra (DNIT, 2005).

Segundo o manual do DNIT, deve ser especificada toda a logística necessária de atendimento, serviços e equipamentos e orientação às ações de isolamento, sistema de resgate de vítimas, operações de neutralização da agressividade do produto, disposição e transbordo de produtos, operação de rescaldo e recuperação ambiental com ações efetuadas para eliminar ou minimizar as consequências do vazamento do produto perigoso (DNIT, 2005). Na Figura 14 é mostrado um fluxograma esquemático das indicações de ações a serem tomadas em caso de emergência.

3 Teoria do Fogo

Eventos envolvendo incêndios tem grande importância dentro dos cenários acidentais envolvendo transporte rodoviário de produtos perigosos. Isso ocorre devido à capacidade da radiação térmica gerada causar lesões graves ou letais em pessoas, assim como danos físicos na estrutura de construções (NIST, 2000). A ocorrência de um incêndio em acidentes é mais frequente que ocorrência de explosão (PLANAS et al, 2007).

A formação de fogo depende basicamente de três agentes para ocorrer: Combustível, Comburente e Calor, como pode ser observado na Figura 15.



Figura 15 - Triângulo do fogo. Fonte:UFRRJ, 2013.

3.1 Combustão

O fogo é uma reação de combustão muito rápida, na qual a chama é a parte visual desta. A combustão, como qualquer outra reação química, é uma mistura de reagentes em proporções adequadas. Deste modo, para haver combustão precisa-se combinar o comburente com os vapores inflamáveis do combustível (SCORALICK E CESARIO, 2013).

O comburente, na maior parte dos casos é o oxigênio. As razões de comburente/combustível na mistura reacional podem variar de combustível para combustível. Por exemplo, o metano necessita de 13% de concentração de oxigênio, enquanto o hidrogênio precisa de apenas 10% (CROWL e LOUVAR, 2011).

Por sua vez, o combustível é o material que tem propriedade de queima, podendo ser sólido, líquido ou gasoso. Apesar de o combustível estar em qualquer uma destas fases, a chama ocorre sempre na fase vapor (SCORALICK E CESARIO, 2013).

Finalmente, o calor a uma forma de energia, que é fornecida a reação de forma a inicia-la e propaga-la.

3.2 Tipos de Chama

O formato da chama em um incêndio pode ser classificado de três formas:

- *Jet Fire* ou Incêndio em Jato: Trata-se de uma chama desenvolvida a partir de um jato de gás ou líquido. Este tipo de incêndio ocorre em geral em casos de vazamento de recipientes pressurizados, como pode ser percebido na Figura 16.
- *Fire Ball* ou Bola de Fogo: Trata-se da combustão de uma nuvem de combustível. Tal incêndio propaga-se verticalmente e possui curta duração, da ordem de poucos segundos (NOGUEIRA, 2007). Ele pode ser verificado na Figura 17.
- *Pool Fire* ou Incêndio em Poça: Trata-se da queima de uma poça de combustível em uma superfície, onde a queima ocorre apenas na área superficial do combustível. A Figura 18 ilustra este tipo de chama. Segundo Nogueira (2007), a maioria dos incêndios decorrentes de vazamentos de combustíveis líquidos é deste tipo.



Figura 16 - Incêndio do tipo *Jet Fire*. Fonte: *Industrial Gasburner*, 2013.



Figura 17 - Incêndio do tipo *Fire Ball* Fonte: *Neinzuregl-Suedeschiene*, 2013.



Figura 18 - Incêndio do tipo *Poll Fire*. Fonte: *Pyrotarp*, 2013.

O presente trabalho está focado na simulação de incêndios em poça (*Poll Fire*), pois este é o incêndio mais comumente observado em acidentes rodoviários envolvendo a presença de líquidos inflamáveis.

3.3 Modelagem de Incêndio em Poça

Diferentes cenários podem ser classificados como incêndios em poça, desde uma pequena poça restrita a um pequeno espaço confinado até uma grande poça espalhada livremente por uma grande área. Deste modo, esse tipo de incêndio é classificado em duas classes (GOTTUK, 2004):

- Confinado: Incêndio em poça o qual se encontra confinado por paredes ou barreiras que não permitem que o combustível se espalhe.

- Não Confinado: Incêndio o qual ocorre em superfície livre, no qual o combustível se espalha livremente.

A modelagem de incêndios em poça envolve alguns parâmetros que são obtidos a partir de modelos experimentais (SCORALICK E CESARIO, 2013). Os principais parâmetros envolvidos nesse fenômeno são os seguintes: “Diâmetro da Chama”, “Taxa de Emissão de Calor” e “Altura de Chama”.

3.3.1. Diâmetro da Chama - D

Uma vez que o cenário avaliado envolve um incêndio decorrente do derramamento de líquido inflamável em um acidente no transporte rodoviário, deve-se assumir que se trata de um incêndio em poça não confinado. Ou seja, no pior cenário, o combustível se espalha sem restrições/barreiras. Isso ocorre devido à ausência de barreiras físicas no local após o rompimento do tanque de transporte.

Segundo LEBLANC (1998), o diâmetro máximo de uma poça para um líquido vazando, considerando ignição no momento que o líquido começa a vaziar, pode ser calculado pela Equação 1:

$$\text{Equação 1: } D_{m\acute{a}x} = 2 \left(\frac{V_s}{\pi y} \right)^{\frac{1}{2}}$$

Onde:

$D_{m\acute{a}x}$ é o diâmetro máximo da poça (m);

V_s é a vazão volumétrica de vazamento do líquido (m³/s);

y é a taxa de regressão do líquido no incêndio em poça (m/s).

A Equação 1 mostrada para o cálculo do diâmetro máximo da poça depende da taxa de regressão do líquido no incêndio em poça, que depende da configuração do incêndio e é dificilmente calculada. Porém, para incêndios em poça de hidrocarbonetos foi estimado o valor de 0,1 mm/s (LEBLANC, 1998).

Outra variável da qual a Equação 1 depende é a vazão de vazamento do líquido. Para calcular esta se podem utilizar os modelos de fonte apresentados por CROWL e LOUVAR (2002), os quais descrevem a taxa de liberação de um líquido ou gás para o meio a partir das

propriedades da substância e das características do escoamento, como é mostrado na Figura 19.

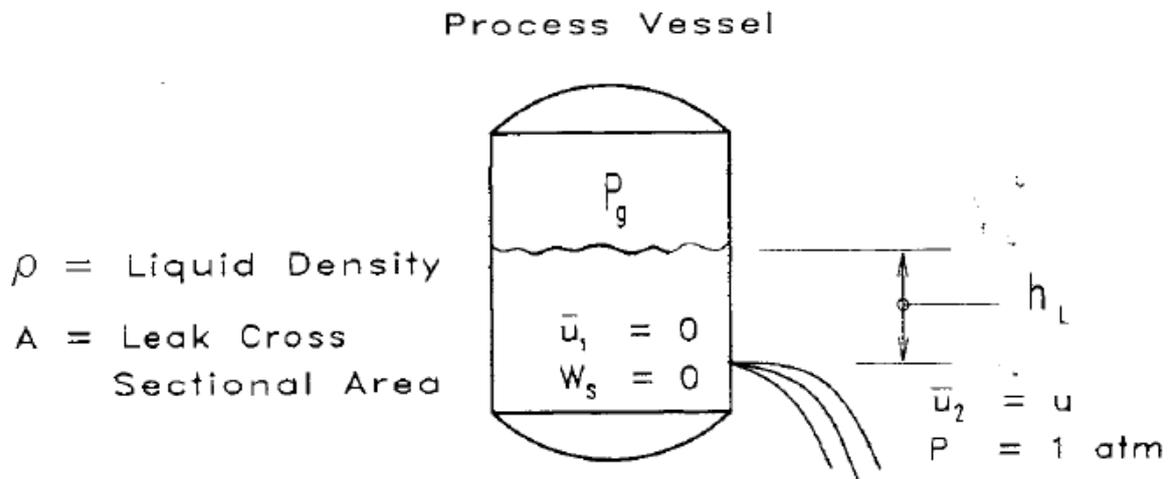


Figura 19 - Parâmetros de escoamento do modelo de fonte. Fonte: TORRERO, 2013.

O modelo de fonte para líquido armazenado em tanque é o mais adequado para o cenário estudado. Este modelo prevê que, para um líquido incompressível vazando através de um furo pequeno, onde a energia potencial se transforma em energia cinética, a vazão mássica de um vazamento de um recipiente com seção transversal constante é dada pela Equação 2.

$$\text{Equação 2: } V_{mL} = \rho C_0 A \sqrt{2 \left(\frac{P_g}{\rho} + g h_L^0 \right) - \frac{\rho g C_0^2 A^2}{A_t}} t$$

V_{mL} é a vazão mássica (Kg/s);

ρ é a densidade do fluido (Kg/m³);

C_0 é o fator de atrito (adimensional);

A é a área do furo (m²);

P_g é a pressão manométrica no interior do recipiente (Pa);

g é a aceleração gravitacional (m/s²);

h_L^0 é a altura inicial do líquido (m);

A_t é a área transversal do tanque (m²);

t é o tempo de vazamento (s).

Finalmente, LEBLANC (1998) também fornece a Equação 3, a qual fornece o tempo que o vazamento leva para atingir o diâmetro máximo de poça.

$$\text{Equação 3: } t_{max} = \frac{0,564 D_{máx}}{(gyD_{máx})^{\frac{1}{3}}}$$

Com Equação 3 é possível avaliar se o vazamento durará tempo suficiente para a poça, resultante deste, atingir o diâmetro máximo estimado na Equação 1.

Outro modo de calcular o diâmetro da poça formada por uma vazamento de líquido é utilizar o modelo apresentado pela NIST (2000), que apresenta uma estimativa do diâmetro da poça a partir do volume de líquido vazado. Este modelo bastante simples considera apenas o volume de líquido vazado para estimar o diâmetro da poça formada.

$$\text{Equação 4: } D = 10\sqrt{V}$$

Onde:

D é o diâmetro da poça;

V é o volume vazado.

3.3.2. Taxa de Emissão de Calor – Q ou HRR

A taxa de emissão de calor é uma das melhores medidas do potencial de dano de um incêndio. Porém, esta não é uma propriedade fundamental do combustível, portanto não pode ser deduzida de forma analítica a partir das propriedades básicas do material. A forma mais exata de determinar tal parâmetro é através de experimentos. Uma alternativa para os valores determinados experimentalmente é estimar a taxa de emissão de calor pela Equação 5 (FTD, 2004):

$$\text{Equação 5: } Q = \dot{m} \Delta H_{c,eff} A_f (1 - e^{-k\beta D})$$

Onde:

Q é a taxa de emissão de calor (kW);

m'' é a taxa de queima ($\text{kg/m}^2 \cdot \text{s}$);

$\Delta H_{c, \text{eff}}$ é o calor efetivo de combustão (kJ/kg);

A_f é a área horizontal de poça (combustível) (m^2);

k, β são constantes empíricas (m^{-1});

D = diâmetro da chama (m);

Alguns parâmetros da equação acima são função do combustível. Atualmente a literatura especializada apresenta valores para os combustíveis mais frequentemente empregados (tabela abaixo).

Tabela 5 - Taxa de emissão de calor para alguns materiais (FTD, 2004).

Combustível	Taxa de queima ($\text{kg/m}^2 \cdot \text{s}$)	Calor efetivo de combustão (kJ/kg)	Densidade (kg/m^3)	$K \cdot \beta$ (m^{-1})
Etanol	0,015	26.800	796	100*
Gasolina	0,055	43.700	740	2,1
PMMA	0,020	24.900	1.184	3,3

* Alguns combustíveis como metanol, etanol, polipropileno e poliestireno têm os valores das constantes desconhecidos, sendo usados valores estimados.

É importante ressaltar que os valores estimados para a taxa de emissão de calor representam os valores máximos, já que esta é dependente do tempo. A Figura 20 ilustra esta dependência, mostrando os três estágios da combustão. Como se pode perceber, ao iniciar a combustão existe uma fase de crescimento da taxa de emissão, atinge-se então um máximo ao entrar na fase estacionária, e depois os valores caem na fase de decaimento.

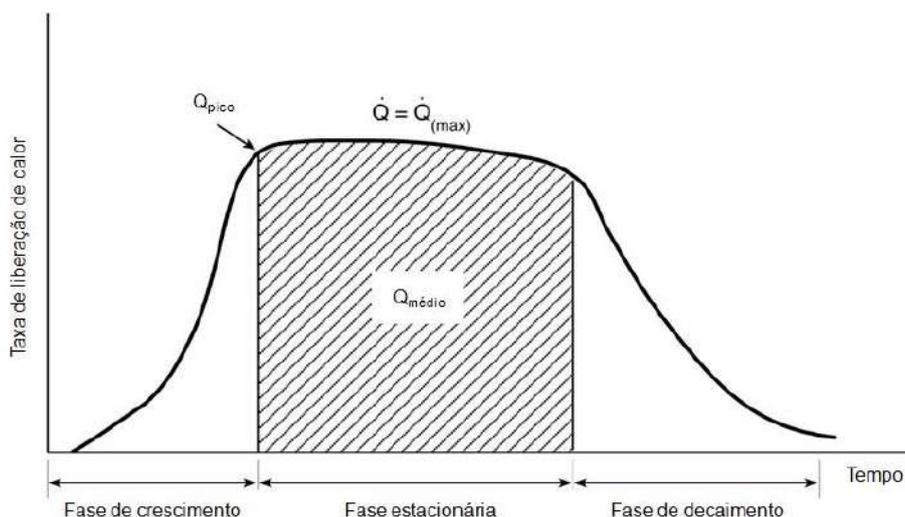


Figura 20 - Relação entre a taxa de emissão de calor e as fases da combustão. Fonte: FTD, 2004.

3.3.3. Altura da Chama - H

A altura da chama é um fator importante a ser estudado em cenários de incêndio, pois dependendo de quão alto um incêndio chega, este pode atingir e danificar estruturas que estão acima dele. O valor estimado pode variar muito de acordo com a metodologia usada. Isso se deve ao comportamento oscilatório da chama, que não apresente uma altura única ou exata durante a duração do incêndio em poça. A relação mais difundida é a que define a altura da chama como sendo aquela que a mesma possui em 50% do tempo de queima (SCORALICK E CESARIO, 2013).

A seguir são apresentadas pela Equação 6 e pela Equação 7 duas correlações usadas na determinação da altura média de chamas para incêndios em poça.

HESKESTAD (1995):

$$\text{Equação 6: } H_f = 0,235Q^{2/5} - 1,05D$$

THOMAS (1962):

$$\text{Equação 7: } H_f = 42D \left(\frac{m}{\rho_a \sqrt{gD}} \right)^{0,61}$$

Onde:

H_f é a altura da chama (m)

Q é a taxa de emissão de calor (kW)

D é o diâmetro da poça (m)

m é a taxa mássica de queima por área de poça ($\text{kg}/\text{m}^2 \cdot \text{s}$)

ρ_a é a densidade do ar ambiente (kg/m^3)

g é a aceleração da gravidade (m/s^2)

A equação de Heskestad (1995) foi desenvolvida baseada em vários cenários de incêndio, incluindo queimadores de 5 a 50 cm de diâmetro, e diferentes combustíveis como: gasolina (fogo em piscina de 0,3 a 23 m de diâmetro), combustível JP-4 (poças quadradas com lados variando de 1 a 10 m) e estruturas de madeira. No caso da equação de Thomas (1962), os experimentos foram realizados somente em estruturas de madeira com lados variando de 10 a 200 cm (SCORALICK E CESARIO, 2013).

3.3.4. Fluxo Térmico - q''

Radiação, para muitos incêndios é o modo dominante de transferência de calor, especialmente para poças de grandes dimensões. A Figura 21 mostra as características dinâmicas do incêndio em poça.

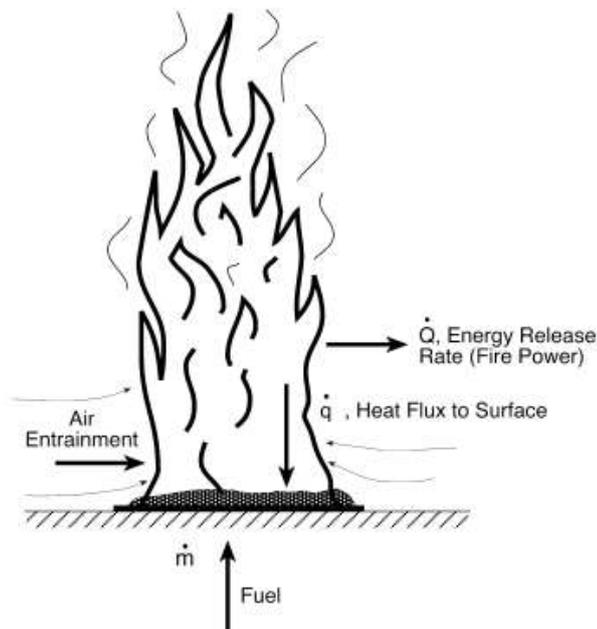


Figura 21 - Características dinâmicas do incêndio em poça. Fonte: UTK, 2013.

A transferência de calor por radiação térmica ocorre através de ondas eletromagnéticas, não sendo necessário meio material para que esse seja propagado. O calor

emitido pelo Sol, que aquece a Terra, é um exemplo clássico de transferência de calor por radiação.

Devido aos diversos formatos que a chama pode assumir, torna-se complexa a determinação exata do fluxo de radiação térmica. Por outro lado, este é um parâmetro de especial interesse, pois quantidades elevadas de radiação térmica são potencialmente letais para seres humanos, além de poderem danificar estruturas.

Para facilitar os cálculos deste parâmetro, simplificações podem ser adotadas, removendo-se a maioria dos parâmetros geométricos do cálculo e tornando-o conservador. Tal método é conhecido como o modelo de "Ponto de Origem". Neste é necessário 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, no centro da chama (Figura 22). É uma ideia semelhante ao centro de gravidade na mecânica.

Atualmente, incêndios em poça gerados por combustíveis líquidos são cada vez mais previsíveis, existindo uma quantidade considerável de dados disponíveis na literatura para validar modelos mais detalhados. Deste modo, 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 da chama. Através das paredes laterais do cilindro o calor é emitido – e não a partir de um único ponto. A Figura 22 mostra a diferença dos modelos apresentados. Ressalta-se que embora mais simples, o modelo de ponto de origem é adequado quando se busca estimar a quantidade de calor que atinge um alvo distante da chama. A uma certa distância a chama pode ser bem representada por um ponto. Porém, para alvos mais próximos, o modelo de chama sólida retorna melhores resultados.

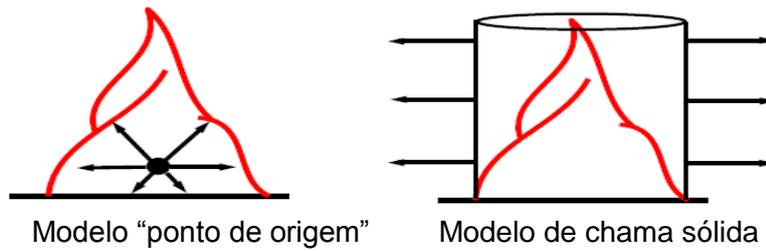


Figura 22 - Modelos de radiação térmica. Fonte: (NIST, 2000).

No modelo de radiação de “chama sólida” o fluxo de radiação térmica que atinge um alvo (q'') é obtido pela Equação 8 (NIST, 2000).

$$\text{Equação 8: } q'' = F\tau\varepsilon_f E_f$$

Onde:

q'' é o fluxo de radiação térmica (kW/m^2)

F é o fator de forma; (adimensional)

τ_f é a transmissividade atmosférica para a radiação térmica; (adimensional)

ε_f é a emissividade efetiva da chama; (adimensional)

E_f é o poder emissivo total do fogo na sua superfície (kW/m^2)

Para incêndios em poça com diâmetros maiores que alguns metros, a emissividade efetiva pode ser considerada igual a um. Uma abordagem mais conservadora também permite adotar a transmissividade atmosférica máxima, igual a 1.

O poder emissivo (E_f) para incêndios em poça pode ser determinado por através de correlações empíricas como as mostradas graficamente na Figura 23.

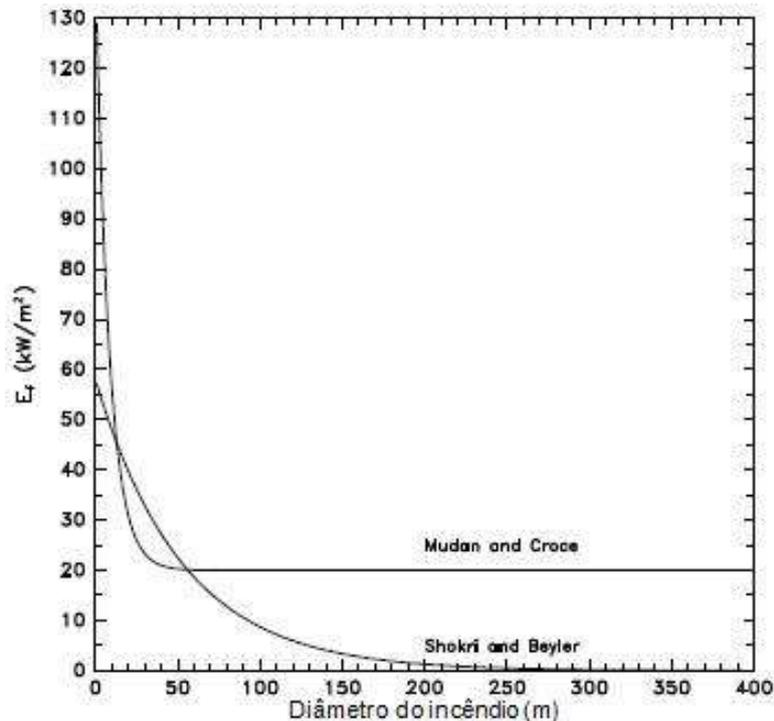


Figura 23 - Correlações empíricas de “Shokri e Beyler” e “Mudan e Croce”, para incêndios em poça. Fonte: (NIST, 2000).

A abordagem do NIST (2000) sugere o uso do valor de 100 KW/m², o qual seria o poder emissivo da parede luminosa da chama da combustão real de grandes poças de gasolina e querosene.

Analisando o valor sugerido pelo NIST (2000) e comparando ao gráfico acima, percebe-se que 100 KW/m² é um valor bastante conservador. Pelo gráfico observam-se valores de poder emissivo inferiores 40 KW/m² para chamas com diâmetros maiores que 30m. Tal diferença ocorre porque os valores encontrados na literatura são em geral para a chama como um todo, inclusive a área encoberta por fumaça e não somente para a parede luminosa, como na abordagem NIST. Quando considera-se a chama como um todo, inclusive a parcela bloqueada pela fumaça, obtém-se um valor menor de emissão de calor por área, já que a fumaça escura age como se fosse um corpo negro, absorvendo a radiação térmica emitida. A NIST emprega apenas a parcela visível da chama. Segundo a NIST (2000), para grandes poças, apenas 20% da área do cilindro ideal que representa a chama no modelo de chama sólida, representa efetivamente a parte visível da chama, os outros 80% são encobertos por fumaça, como mostrado na Figura 24. Isso ocorre devido a queima parcial.



Figura 24 - Incêndio em poça de diesel com 15 metros quadrados de área. Fonte: NIST, 2000.

3.3.5. Altura efetiva - H_{ef}

Como citado anteriormente, grande parte da parede luminosa da chama é isolada pela fumaça formada, que age como uma barreira térmica. Deste modo se faz necessário o cálculo de uma altura efetiva de chama. Na Figura 25 é possível verificar o modelo de chama sólida modificado, no qual é levada em consideração a presença da fumaça. A altura da chama considerada é a altura da parede luminosa.

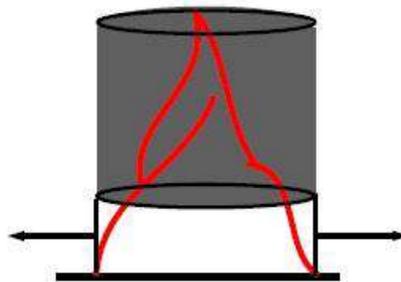


Figura 25 - Modelo de chama sólida modificado. Fonte: (NIST, 2000).

A altura da região luminosa, ou altura efetiva, pode ser determinada utilizando a Equação 9 (NIST, 2000):

$$\text{Equação 9: } H = \frac{X_{rmax} e^{-kD} D q_f''}{4E_f}$$

Onde:

H_{ef} é a altura da região luminosa (m);

X_{rmax} é a fração radiada máxima (0,35);

k é uma constante ($0,05 \text{ m}^{-1}$);

D é o diâmetro chama (m);

q_f'' é a taxa de emissão de calor por unidade de área do combustível (kW/m^2);

E_f é o poder emissivo total do fogo na sua superfície (kW/m^2).

A variável q_f'' pode ser calculada pela Equação 10:

$$\text{Equação 10: } q_f'' = \frac{Q}{A}$$

Onde:

Q é a taxa de liberação de calor (kW)

q_f'' é a taxa de liberação de calor por unidade de área (kW/m^2)

A é a área horizontal da poça (m^2)

Experimentalmente observa-se que a equação de altura efetiva apresentada é uma boa estimativa para a altura da parede luminosa de incêndios com diâmetro menores que 20 m. Porém, não fornece boas estimativas para incêndios com mais de 20 metros de diâmetro, como mostra a Figura 26. Isso ocorre devido à escassez de dados experimentais da taxa de emissão de calor para incêndios de grandes proporções. Portanto, quando o diâmetro do incêndio for maior que 20 metros, assume-se que este possui o valor máximo de altura efetiva, representado pela Equação 11 NIST (2000):

$$\text{Equação 11: } H = \frac{0,35e^{-120q_f''}}{4 \times 100} = 6,4 \times 10^{-3} q_f''$$

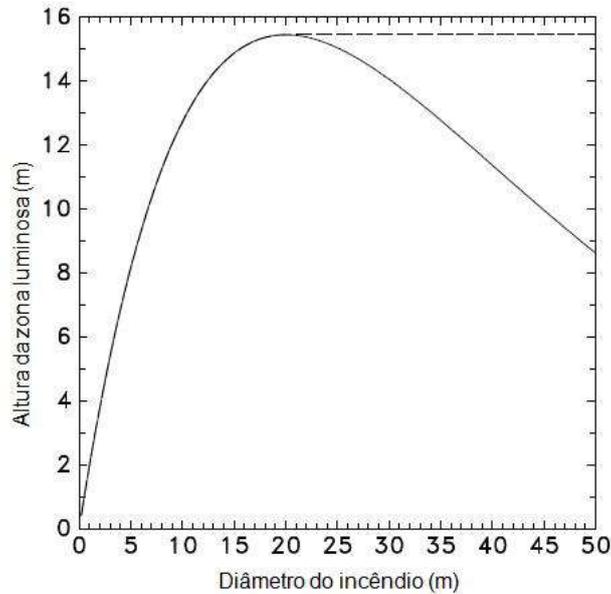


Figura 26 - Altura da zona luminosa para incêndio a gasolina, onde $X_{r_{max}} = 0,35$, $q_f'' = 2400$ kW/m^2 , $k = 0,05\text{m}^{-1}$ e $E_f = 100 \text{ kW/m}^2$. Fonte: NIST, 2000.

3.3.6. Fator de Forma - F

Fator de Forma é um parâmetro puramente geométrico, o qual indica a fração da emissão da radiação térmica que incide sobre um determinado corpo diretamente. Por isso, este parâmetro possui grande relevância para o cálculo da transmissão de calor por radiação.

O emprego do fator de forma na análise de incêndios reais envolve uma série de simplificações, de modo a reduzir o esforço computacional que seria requerido se todos os detalhes geométricos fossem efetivamente considerados. Na prática a precisão dos demais parâmetros empregados tende a não justificar um maior detalhamento no cálculo do fator de forma (SCORALICK E CESARIO, 2013). Este parâmetro é dependente da localização e posicionamento do alvo, assim como da geometria da chama. Seu valor se encontra entre 0 e 1. A seguir são apresentadas algumas formas de cálculo.

a) Método de Tabela:

O método de tabela é um método simples de determinação do fator de forma. Para chamas cilíndricas (modelo de chama sólida) são utilizadas as variáveis mostradas na Figura 27.

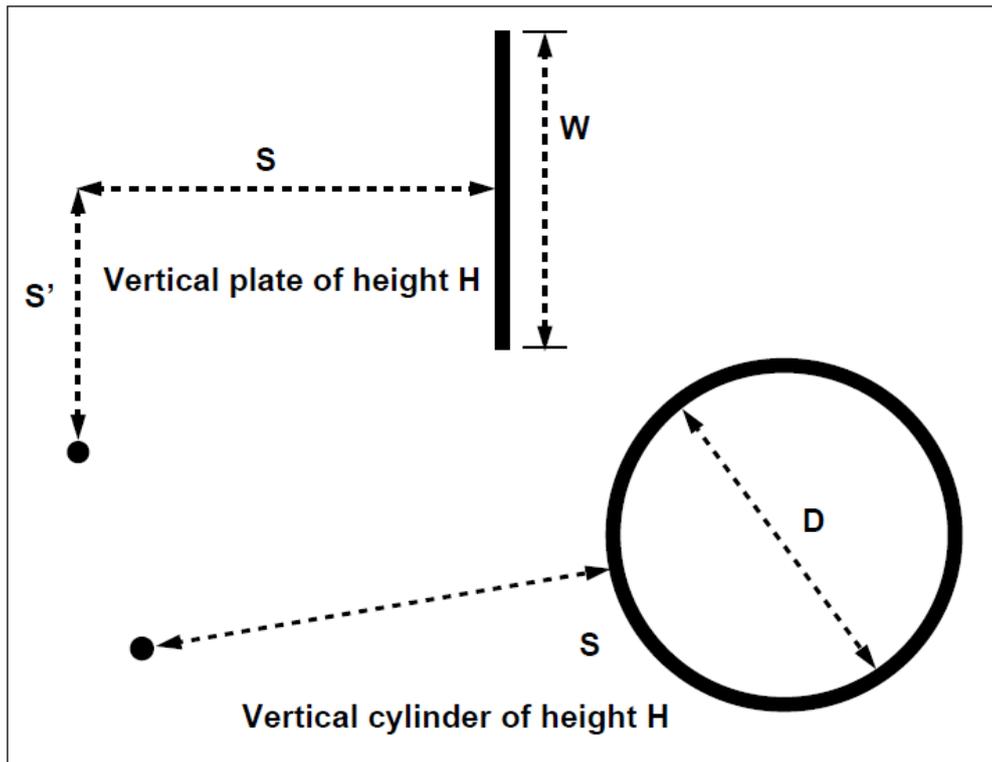


Figura 27 - Coordenadas utilizadas na estimativa do fator de forma. Fonte: (NIST, 2000).

O modelo de cilindro vertical é utilizado para chamas que possuem formato de cilindro ou se aproximam deste. O critério utilizado para aproximar a chama de um cilindro é a razão entre a maior dimensão e a menor dimensão. Caso a razão seja maior que 2,5 deve-se adotar o modelo de parede plana, caso contrário o modelo de cilindro vertical pode ser escolhido e o diâmetro equivalente utilizado é mostrado na Equação 12 (NIST, 2000).

$$\text{Equação 12: } D = \sqrt{\frac{4A}{\pi}}$$

De modo geral, os modelos utilizados visam utilizar um formato sólido que oculte totalmente a chama da “visão” do alvo, como pode ser observado na Figura 28.

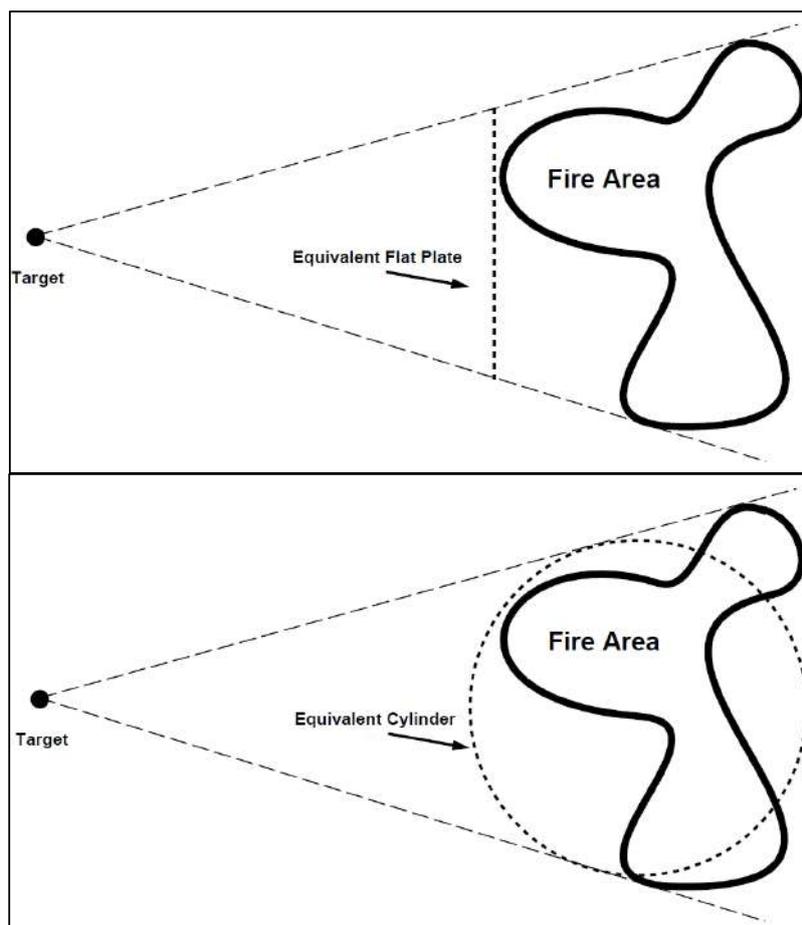


Figura 28 - Modelos esquemáticos de cilindro e de placa para cálculo do fator de forma.

Fonte: (NIST, 2000)

Após definir qual o melhor modelo esquemático a ser utilizado e as dimensões deste, é possível obter o valor do fator de forma através da sua respectiva da Tabela 6 para o modelo de cilindro e da Tabela 7 para o modelo de parede plana. A altura do incêndio deve ser admitida como sendo a altura em que ainda é possível ver suas chamas, ou seja, altura efetiva ou altura da parede luminosa (NIST, 2000).

Tabela 6 - Fator F para o modelo cilíndrico com um elemento recebendo radiação máxima³.

Fonte: NIST, 2000

S/D	H/D																		
	0.01	0.02	0.03	0.04	0.05	0.06	0.07	0.08	0.09	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1
0.1	0.044	0.087	0.128	0.166	0.201	0.233	0.262	0.288	0.311	0.331	0.442	0.481	0.497	0.506	0.510	0.513	0.515	0.517	0.518
0.2	0.019	0.039	0.058	0.077	0.095	0.113	0.130	0.146	0.162	0.177	0.289	0.349	0.380	0.399	0.410	0.417	0.422	0.425	0.427
0.3	0.012	0.023	0.035	0.046	0.057	0.068	0.079	0.090	0.101	0.111	0.198	0.256	0.294	0.318	0.334	0.344	0.352	0.357	0.361
0.4	0.008	0.016	0.024	0.031	0.039	0.047	0.054	0.062	0.069	0.076	0.142	0.193	0.230	0.256	0.274	0.287	0.297	0.304	0.310
0.5	0.006	0.011	0.017	0.023	0.029	0.034	0.040	0.045	0.051	0.056	0.107	0.149	0.183	0.208	0.227	0.242	0.253	0.261	0.268
0.6	0.004	0.009	0.013	0.017	0.022	0.026	0.030	0.035	0.039	0.043	0.084	0.119	0.148	0.172	0.190	0.205	0.217	0.226	0.233
0.7	0.003	0.007	0.010	0.014	0.017	0.021	0.024	0.028	0.031	0.034	0.067	0.096	0.122	0.143	0.161	0.175	0.187	0.196	0.204
0.8	0.003	0.006	0.008	0.011	0.014	0.017	0.020	0.022	0.025	0.028	0.055	0.080	0.102	0.121	0.137	0.151	0.162	0.172	0.180
0.9	0.002	0.005	0.007	0.009	0.012	0.014	0.016	0.019	0.021	0.023	0.046	0.067	0.086	0.103	0.118	0.131	0.142	0.151	0.159
1.0	0.002	0.004	0.006	0.008	0.010	0.012	0.014	0.016	0.018	0.020	0.039	0.057	0.074	0.089	0.102	0.114	0.125	0.134	0.141
2.0	0.001	0.001	0.002	0.002	0.003	0.004	0.004	0.005	0.005	0.006	0.012	0.018	0.024	0.030	0.035	0.040	0.045	0.050	0.055
3.0	0.000	0.001	0.001	0.001	0.001	0.002	0.002	0.002	0.003	0.003	0.006	0.009	0.012	0.015	0.017	0.020	0.023	0.025	0.028
4.0	0.000	0.000	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.002	0.002	0.003	0.005	0.007	0.009	0.010	0.012	0.014	0.015
5.0	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.002	0.003	0.005	0.006	0.007	0.008	0.009	0.010	0.011
6.0	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001	0.001	0.001	0.001	0.002	0.002	0.003	0.004	0.005	0.006	0.006	0.007	0.008
7.0	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001	0.001	0.001	0.002	0.002	0.003	0.004	0.004	0.005	0.005	0.006
8.0	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001	0.001	0.002	0.002	0.003	0.003	0.004	0.004	0.005
9.0	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001	0.001	0.001	0.002	0.002	0.003	0.003	0.004	0.004
10.0	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001	0.001	0.001	0.001	0.002	0.002	0.003	0.003	0.004

Tabela 7 - Fator F para o modelo placa plana com um elemento recebendo radiação máxima.

Fonte: NIST, 2000⁴.

S/W	H/W																		
	0.01	0.02	0.03	0.04	0.05	0.06	0.07	0.08	0.09	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1
0.1	0.050	0.098	0.143	0.185	0.223	0.256	0.286	0.311	0.333	0.352	0.444	0.470	0.480	0.484	0.486	0.488	0.489	0.489	0.489
0.2	0.024	0.049	0.072	0.096	0.118	0.140	0.161	0.181	0.200	0.218	0.343	0.401	0.428	0.442	0.450	0.455	0.457	0.459	0.461
0.3	0.016	0.031	0.047	0.062	0.077	0.092	0.106	0.120	0.134	0.148	0.257	0.325	0.364	0.387	0.401	0.409	0.415	0.418	0.421
0.4	0.011	0.022	0.033	0.044	0.055	0.065	0.076	0.086	0.096	0.107	0.195	0.259	0.302	0.330	0.348	0.360	0.368	0.373	0.377
0.5	0.008	0.016	0.024	0.033	0.041	0.049	0.057	0.065	0.072	0.080	0.151	0.206	0.248	0.277	0.298	0.312	0.322	0.329	0.335
0.6	0.006	0.013	0.019	0.025	0.031	0.038	0.044	0.050	0.056	0.062	0.118	0.166	0.203	0.232	0.253	0.269	0.281	0.289	0.296
0.7	0.005	0.010	0.015	0.020	0.025	0.030	0.035	0.039	0.044	0.049	0.095	0.135	0.168	0.195	0.216	0.232	0.244	0.253	0.261
0.8	0.004	0.008	0.012	0.016	0.020	0.024	0.028	0.032	0.036	0.040	0.077	0.111	0.140	0.164	0.184	0.200	0.212	0.222	0.230
0.9	0.003	0.007	0.010	0.013	0.016	0.020	0.023	0.026	0.029	0.033	0.064	0.093	0.118	0.140	0.158	0.173	0.185	0.195	0.203
1.0	0.003	0.005	0.008	0.011	0.014	0.016	0.019	0.022	0.025	0.027	0.054	0.078	0.100	0.120	0.136	0.151	0.162	0.172	0.180
2.0	0.001	0.002	0.002	0.003	0.004	0.005	0.005	0.006	0.007	0.008	0.015	0.023	0.030	0.037	0.043	0.050	0.056	0.061	0.066
3.0	0.000	0.001	0.001	0.001	0.002	0.002	0.002	0.003	0.003	0.003	0.007	0.010	0.014	0.017	0.020	0.023	0.027	0.030	0.032
4.0	0.000	0.000	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.002	0.002	0.002	0.004	0.006	0.008	0.010	0.012	0.014	0.015	0.017	0.019
5.0	0.000	0.000	0.000	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.003	0.004	0.005	0.006	0.008	0.009	0.010	0.011	0.012
6.0	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.002	0.003	0.004	0.004	0.005	0.006	0.007	0.008	0.009
7.0	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001	0.001	0.001	0.001	0.002	0.003	0.003	0.004	0.005	0.005	0.006	0.006
8.0	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001	0.001	0.002	0.002	0.003	0.003	0.004	0.004	0.005
9.0	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001	0.001	0.002	0.002	0.003	0.003	0.004	0.004	0.004
10.0	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001	0.001	0.001	0.002	0.002	0.003	0.003	0.004	0.004

Segundo NIST (2000) a Tabela 7 pode ser utilizada diretamente para o modelo de prato vertical somente quando a distância do alvo para a linha central do prato S' for igual a zero. Quando este valor for diferente de zero, deve-se utilizar a Equação 13 para estimar o valor do fator de forma.

$$\text{Equação 13: } F(S, S', H, W) = \frac{F(S,0,H,2S'+W) - F(S,0,H,2S'-W)}{2}, \quad 2S' > W$$

$$F(S, S', H, W) = \frac{F(S,0,H,2S'+W) - F(S,0,H,W - 2S')}{2}, \quad 2S' < W$$

b) Método de Equação:

Para geometrias que não sejam bem representadas pelos modelos cilíndricos e de placa plana é possível adotar a Equação 14 (SCORALICK E CESARIO, 2013)

³ Ver anexo 2

⁴ Ver anexo 2

Equação 14:
$$F = \int_0^{A_1} \frac{\cos\theta_1 \cos\theta_2}{\pi r^2} dA_1$$

Esta equação permite que seja calculado o calor irradiado de uma superfície qualquer em relação a um ponto a uma distância r da mesma, conforme indicado na Figura 29.

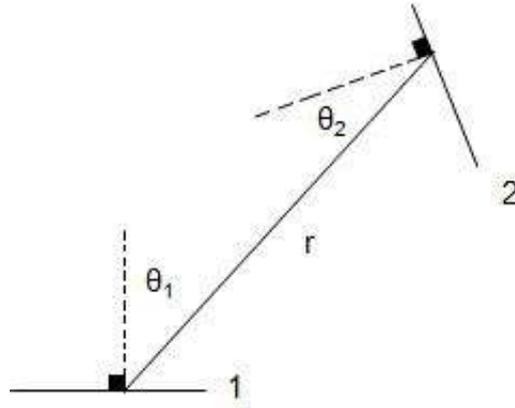


Figura 29 - Notações usadas para o cálculo do fator F para um elemento pontual (2) exposto a uma radiação de uma superfície (1). Fonte: SCORALICK E CESARIO, 2013.

O uso prático da Equação 14 é muito complexo. Na literatura é possível encontrar equações deduzidas para geometrias mais usuais. Como essas equações foram desenvolvidas para geometrias específicas, a utilização desta fica restrita as geometrias para as quais foram desenvolvidas.

Fator de forma para elemento planar para retângulo paralelo infinito (SCORALICK E CESARIO, 2013).

Equação 15:

$$F_{d1-2} = \frac{1}{2\pi} \left\{ \frac{a}{c(1+(\frac{a}{c})^2)^{1/2}} \tan^{-1} \left[\frac{b}{c(1+(\frac{a}{c})^2)^{1/2}} \right] + \frac{b}{c(1+(\frac{b}{c})^2)^{1/2}} \tan^{-1} \left[\frac{a}{c(1+(\frac{b}{c})^2)^{1/2}} \right] \right\}$$

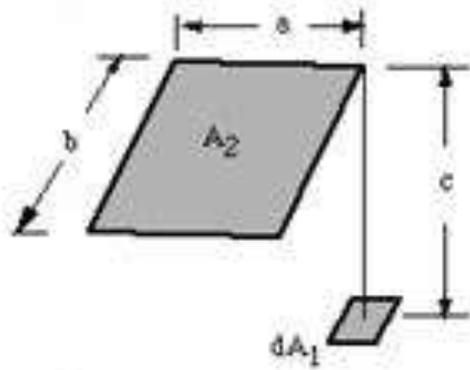


Figura 30 - Elemento diferencial planar para retângulo paralelo finito. Fonte: (SCORALICK E CESARIO, 2013)

Fator de forma para elemento planar para retângulo em 90° ao plano do elemento e perpendicular a borda do plano (SCORALICK E CESARIO, 2013).

$$\text{Equação 16: } F_{d1-2} = \frac{1}{2\pi} \left\{ \tan^{-1} \left(\frac{b}{c} \right) - \frac{c}{b \left[\left(\frac{a}{b} \right)^2 + \left(\frac{c}{b} \right)^2 \right]^{1/2}} \tan^{-1} \left[\frac{1}{\left[\left(\frac{a}{b} \right)^2 + \left(\frac{c}{b} \right)^2 \right]^{1/2}} \right] \right\}$$

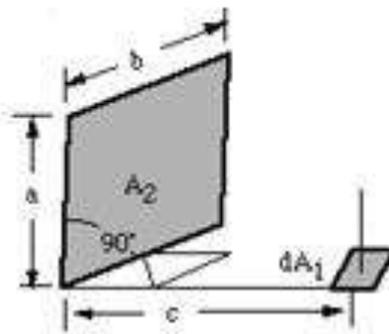


Figura 31 - Elemento diferencial planar para retângulo em 90° ao plano do elemento e perpendicular a borda do plano (SCORALICK E CESARIO, 2013).

Fator de forma para elemento inclinado em um ângulo arbitrário a um retângulo finito (SCORALICK E CESARIO, 2013).

$$\text{Equação 17: } F_{d1-2} = \frac{1}{2\pi} \left[\tan^{-1} \left(\frac{b}{c} \right) \cos \theta_i + \tan^{-1} \left(\frac{a}{c} \right) \cos \theta_j + \frac{a \cos \theta_k - \cos \theta_i}{\left[1 + \left(\frac{a}{c} \right)^2 \right]^{1/2}} \tan^{-1} \frac{b}{c \left[1 + \left(\frac{a}{c} \right)^2 \right]^{1/2}} + \frac{b \cos \theta_k - \cos \theta_j}{\left[1 + \left(\frac{b}{c} \right)^2 \right]^{1/2}} \tan^{-1} \frac{a}{c \left[1 + \left(\frac{b}{c} \right)^2 \right]^{1/2}} \right]$$

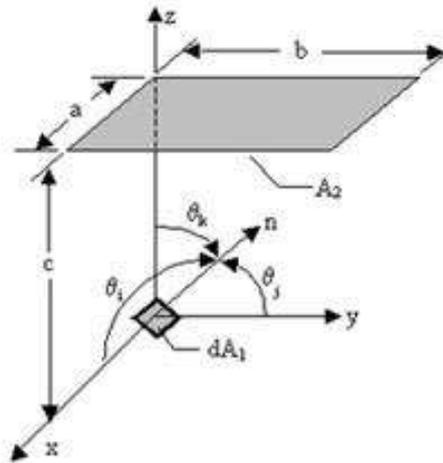


Figura 32 - elemento diferencial inclinado em um ângulo arbitrário a um retângulo finito (A2 não deve passar através do plano de dA1). Fonte: SCORALICK E CESARIO, 2013.

Fator de forma para elemento no plano ao exterior do cilindro circular de comprimento finito (SCORALICK E CESARIO, 2013).

$$\text{Equação 18: } F_{d1-2} = \frac{S}{B} - \frac{S}{2B\pi} \left\{ \cos^{-1} \left(\frac{Y^2 - B + 1}{A - 1} \right) + \cos^{-1} \left(\frac{C - B + 1}{C + B - 1} \right) - Y \left[\frac{A + 1}{\sqrt{(A - 1)^2 + 4Y^2}} \cos^{-1} \left(\frac{Y^2 - B + 1}{B^{1/2}(A - 1)} \right) \right] - C^{1/2} \frac{C + B + 1}{\sqrt{(C + B - 1)^2 + 4C}} \cos^{-1} \left(\frac{C - B + 1}{B^{1/2}(C + B - 1)} \right) + H \cos^{-1} \left(\frac{1}{B^{1/2}} \right) \right\}$$

Onde:

$$S = s/r; X = x/r; Y = y/r; H = h/r; A = X^2 + Y^2 + S^2; B = S^2 + X^2; C = (H - Y)^2.$$

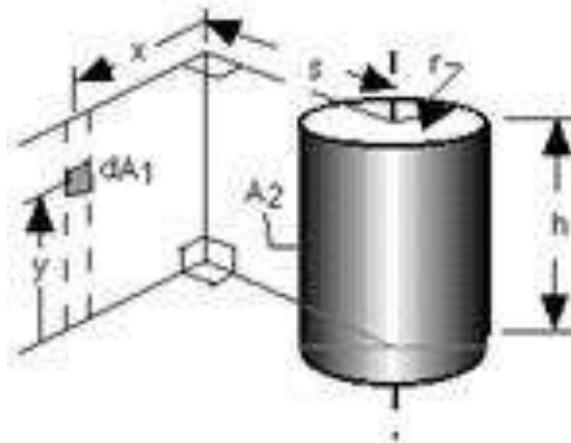


Figura 33 - Elemento no plano ao exterior do cilindro circular de comprimento finito. O plano não intercepta o cilindro. Fonte: SCORALICK E CESARIO, 2013.

Fator de forma para elemento na forma de anel planar ou coaxial em um plano perpendicular ao plano do cilindro de altura finita (SCORALICK E CESARIO, 2013).

Equação 19:
$$F_{d1-2} = \frac{1}{2\pi} \cos^{-1} R + \frac{1}{\pi} \left\{ \tan^{-1} \left[\frac{R}{(1-R^2)^{1/2}} \right] - \frac{(1+L^2-R^2)}{X} \tan^{-1} \left[\frac{X \tan(0,5 \cos^{-1} R)}{1+L^2+R^2-2R} \right] \right\}$$

Onde: $R=r_1/r_2$; $L= l/r_2$; $X=[(1+L^2+R^2)^2-4R^2]^{1/2}$

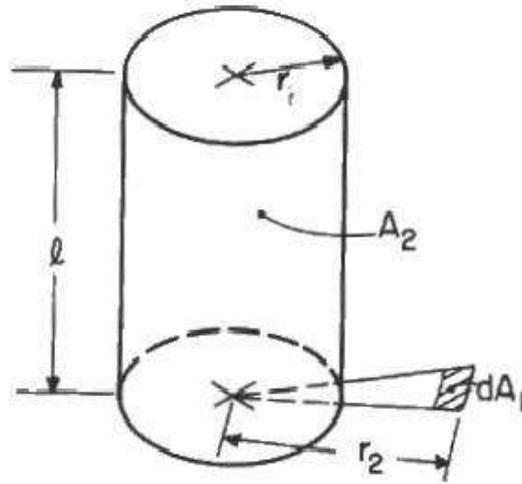


Figura 34 - Elemento na forma de anel planar ou coaxial em um plano perpendicular ao plano do cilindro de altura finita. Fonte: SCORALICK E CESARIO, 2013.

4 Metodologia

O presente trabalho buscou utilizar a metodologia de cálculo da distância de separação aceitável, ou segura (*Acceptable Separation Distance – ASD*), apresentada por NIST (2000). Nesta abordagem é utilizado o critério de nível de fluxo radiação térmica aceitável para construções (31,5 kW/m²) e para pessoas (1,4 kW/m²). Os modelos utilizados no cálculo das variáveis, das quais o fluxo de radiação térmica depende, são mostrados abaixo. Logo em seguida é mostrada a metodologia utilizada na determinação da distância de separação aceitável ou segura para pessoas.

4.1 Modelos

Diâmetro da Chama:

Para estimar o diâmetro de poça foram empregados dois modelos diferentes. Um dos modelos utilizados foi apresentado por NIST (2000) para o cálculo do diâmetro de incêndios não contidos. Essa abordagem foi apresentada anteriormente (Equação 4) e foi usada para o cenário no qual existe vazamento repentino do líquido causado por ruptura catastrófica do tanque.

$$\text{Equação 4: } D = 10\sqrt{V}$$

Um segundo modelo foi utilizado para representar acidentes nos quais há formação de um orifício no tanque e o combustível flui através deste com uma vazão constante. Sendo o intervalo de tempo entre o início e o fim do vazamento significativo, de tal forma que o vazamento não pode ser considerado repentino. Tal modelo encontrasse representado pela Equação 1, a qual determina o maior diâmetro de poça formada por um líquido com vazão V_s (m³).

$$\text{Equação 1: } D_{m\acute{a}x} = 2 \left(\frac{V_s}{\pi y} \right)^{\frac{1}{2}}$$

O valor de taxa de regressão utilizado na Equação 1, será o mesmo apresentado para incêndios em poça de hidrocarbonetos (0,1 mm/s).

Outra variável da Equação 1 é a vazão do combustível. Conforme explicado anteriormente, esta vazão será estimada através do modelo de fonte adequado (Equação 2). Como se pode perceber, a vazão varia ao longo do tempo, mas para simular o pior cenário, adotou-se a vazão máxima de vazamento, que corresponde a vazão inicial ($t = 0$).

$$\text{Equação 2: } V_{mL} = \rho C_0 A \sqrt{2 \left(\frac{P_g}{\rho} + g h_L^0 \right)} - \frac{\rho g C_0^2 A^2}{A_t} t$$

Outra restrição da equação do modelo de fonte aqui adotado é que o recipiente que contém o líquido deve apresentar área transversal constante. Logo, para adotar esse modelo de fonte, deve-se considerar que o tanque utilizado para o transporte de etanol possui seção transversal constante. Por efeito de simplificação aproximou-se o tanque por um paralelepípedo com as dimensões iguais a Figura 35, onde a largura e o comprimento do paralelepípedo são iguais a um veículo usual de transporte de etanol com a capacidade de 45 m³ (maior veículo utilizado no transporte de etanol na etapa de distribuição). A altura foi determinada de forma que o sólido apresentasse um volume de 45 m³.

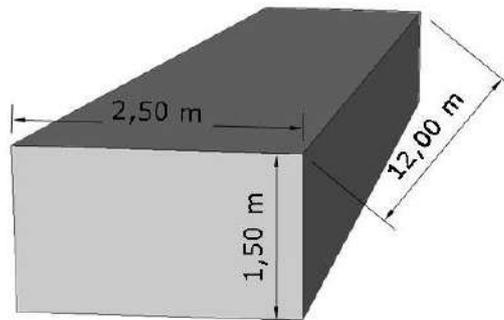


Figura 35 - Modelo representativo de um tanque de Etanol com 45 m³.

Os valores utilizados para as constantes ρ , g e P_g são respectivamente 789 Kg/m³, 9,8 m/s² e $1,01 \times 10^5$ Pa. Para o fator de atrito C_0 Torrero (2013) sugere utilizar o valor máximo deste parâmetro ($C_0 = 1$) para casos que se deseja ser mais conservador.

- Altura da Chama:

A altura do cilindro foi considerada igual a altura da parede luminosa da chama ou altura efetiva, a qual pode ser estimada pela Equação 9 e para o caso de chamas com diâmetro maior que 20 metros será utilizada a Equação 11.

$$\text{Equação 9: } H_{ef} = \frac{X_{rmax} e^{-kD} D q_f''}{4E_f}$$

$$\text{Equação 11: } H_{ef} = \frac{0,35 e^{-120} q_f''}{4 \times 100} = 6,4 \times 10^{-3} q_f''$$

O poder emissivo total (E_f) foi considerado igual a 100 kW/m². Enquanto q_f'' é constante para um determinado combustível, e pode ser obtido através da Tabela 5 como mostrado. Finalmente, k e χ_{\max} são constantes iguais a 0,05 e 35 respectivamente, e D é igual ao diâmetro da chama.

- Fator de Forma:

Para o cálculo do fator de forma foi utilizado o método de tabela, proposto pela NIST (2000), no qual será considerado o modelo esquemático cilíndrico mostrado na Figura 28. Neste, a altura e o diâmetro dos cilindros são iguais ao diâmetro e a altura da chama.

Não é aplicável o cálculo do fator de forma através de uma equação desenvolvida para uma geometria específica, pois trata-se de um incêndio não confinado, não havendo meios para definir precisamente qual a forma que esse irá tomar.

4.2 ASD – Acceptable Separation Distance

A metodologia da NIST (2000) pode ser utilizada de três formas distintas, as quais foram descritas separadamente:

- Gráfico Simplificado:

Essa metodologia pode ser utilizada quando o combustível considerado é um líquido a temperatura e pressão atmosféricas, se a chama possui base circular e não existir nenhuma obstrução entre a chama e o alvo.

Para obter a distância de separação aceitável (ASD) é utilizado o gráfico apresentado na Figura 36.

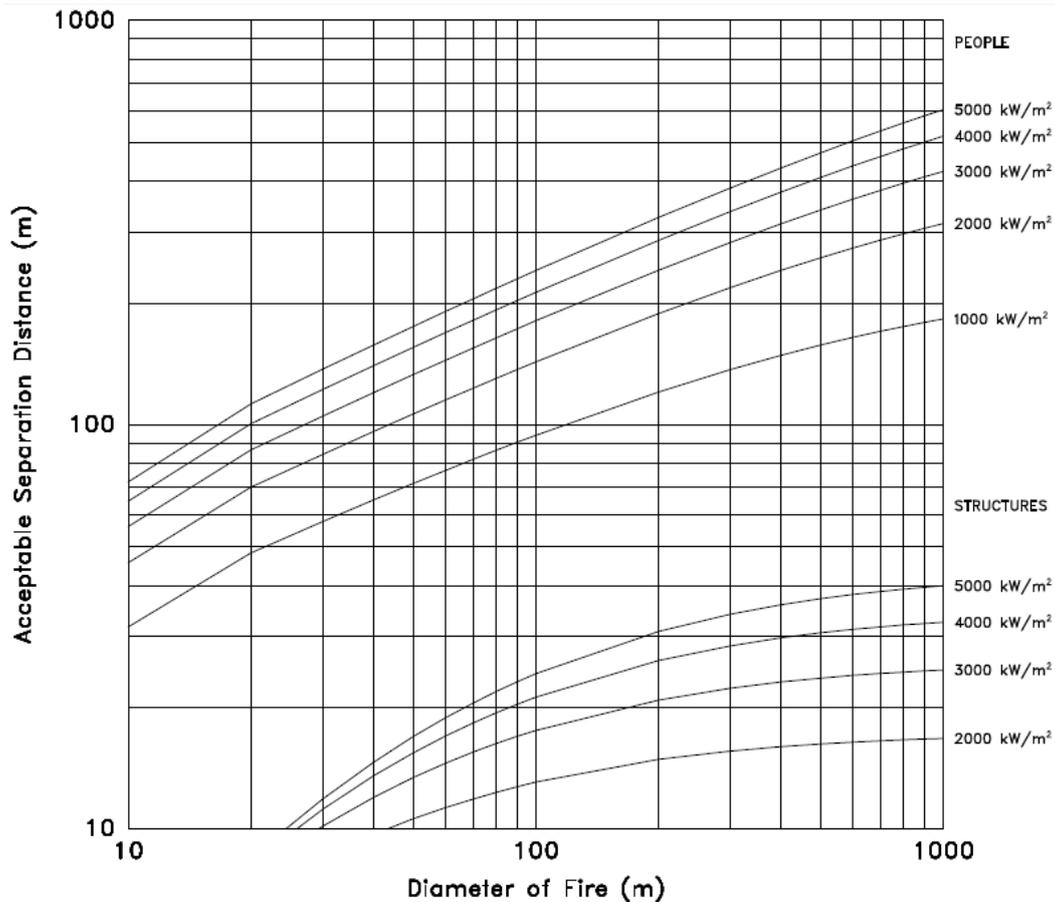


Figura 36 - Distância Aceitável de Separação (ASD) para formas de chama aproximadas por um cilindro. Fonte: (NIST, 2000)

Os parâmetros de entrada do gráfico são o diâmetro da chama, que pode ser aproximado para o diâmetro da poça (eixo x), e a taxa de emissão térmica por área, emitida pelo combustível (curvas).

A taxa de emissão por unidade de área (HRR na tabela abaixo) foi obtida através de dados experimentais, sendo constante para um determinado combustível..

Tabela 8 - Taxas de emissão térmica 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 ² /s	kJ/kg	kW/m ²	Struct. m	People 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]

Como se pode perceber, a taxa de liberação de calor por unidade de área do etanol é igual a 400 kW/m², uma das menores em comparação aos demais combustíveis.

Os modelos utilizados para o cálculo do diâmetro variam de cenário para cenário e foram apresentados no tópico 4.1.

Ao utilizar o método gráfico previamente descrito para eventos acidentais envolvendo etanol, obtém-se valores de distância de separação aceitável (ASD) de pouca precisão. Isso ocorre porque no gráfico utilizado não há uma curva referente à taxa de liberação de calor por unidade de área do etanol (400 kW/m²). Deste modo, tal abordagem foi empregada apenas para obter uma ordem de grandeza dos valores.

- Abordagem “Screen ASD”:

Através do gráfico mostrado na Figura 36, pode-se perceber que existe uma distância de separação na qual, independente do diâmetro da chama, os níveis de radiação térmica são menores que os valores máximos seguros. Esta seria uma distância “sempre segura”, ou seja, independente do diâmetro de poça, tal afastamento seria seguro em termos de emissão de

radiação térmica. Tal distância pode ser obtida através da extrapolação dos valores de distâncias de separação aceitáveis para diâmetros extremamente grandes.

O “Screen ASD” é utilizado, de modo prevencionista, quando as incertezas das condições do incêndio em poça são muito altas, como é o caso de incêndio em poça não contido, no qual existem diversas variáveis que podem influenciar no diâmetro da chama. O valor de “Screen ASD” indicado para o Etanol é de 90 metros para pessoas e 10 metros para estruturas, conforme tabela acima (coluna Screen ASD)

- Cálculo Detalhado:

O método de cálculo detalhado de NIST (2000) propõe o cálculo do fluxo de radiação térmica de uma forma direta pela Equação 8, onde ϵ_f é considerado igual a 1, pois aplica-se a grandes incêndios. τ também foi considerado igual a 1.

$$\text{Equação 8 (Simplificada): } \mathbf{q'' = FE_f}$$

O poder emissivo total (E_f) foi considerado constante e igual ao poder emissivo para a parede luminosa. Nos cálculos realizados o valor utilizado será 100 kW/m².

$$\mathbf{q'' = F * 100}$$

Como o método propõe um nível de radiação térmica seguro para pessoas igual a 1,4 kW/m², tem-se:

$$\mathbf{1,4 = F * 100 \rightarrow F = 0,014}$$

O modelo proposto para o cálculo do fator de forma mostra que este é função do diâmetro da chama, da altura da chama e da distância entre a chama e o alvo. Como o diâmetro e a altura da chama podem ser calculados de acordo com os modelos mostrados no tópico 4.1, a única variável que resta é a distância entre a chama e o alvo, a qual será a distância de separação aceitável ou segura.

4.3 Cenários Analisados

Os cenários analisados podem ser divididos em dois grupos, um no qual é considerado que todo o volume vaza repentinamente, por conta de um rompimento catastrófico do tanque, formando uma grande poça. No outro cenário, é considerado que o líquido vaza lenta e

constantemente do tanque através de um orifício formado no acidente. Neste cenário, o tempo que o recipiente demora para esvaziar é representativo.

Nos cenários nos quais é considerado o vazamento repentino, foram avaliados três volumes totais de vazamento diferentes, baseados no histórico de acidentes atendidos pela CETESB. Tal histórico pode ser visto na Figura 37. A média (11 mil litros), o maior vazamento registrado representado pelo valor do percentil 100% (45 mil litros) e o volume no qual, pelo menos 50% dos registros históricos possuem valores superiores, representado pelo valor do percentil 50% (5 mil litros).

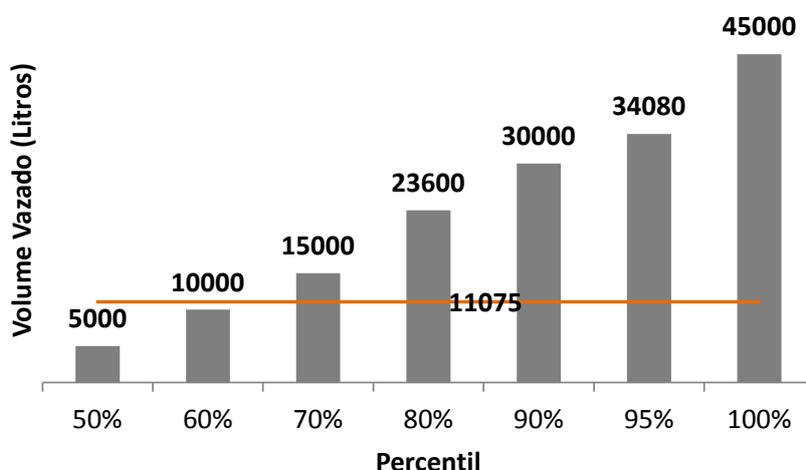


Figura 37 - Análise da série histórica⁵ de vazamento de etanol nos acidentes atendidos pela CETESB de 1978 até 2013. Fonte: CETESB.

Como pode ser observado na Figura 38, quase 34% das causas de acidentes em que ocorrem vazamentos no transporte rodoviário de Etanol, tem como causa tombamentos.

⁵ Foram considerados somente os acidentes na etapa de transporte rodoviário que houve derramamento de Etanol.

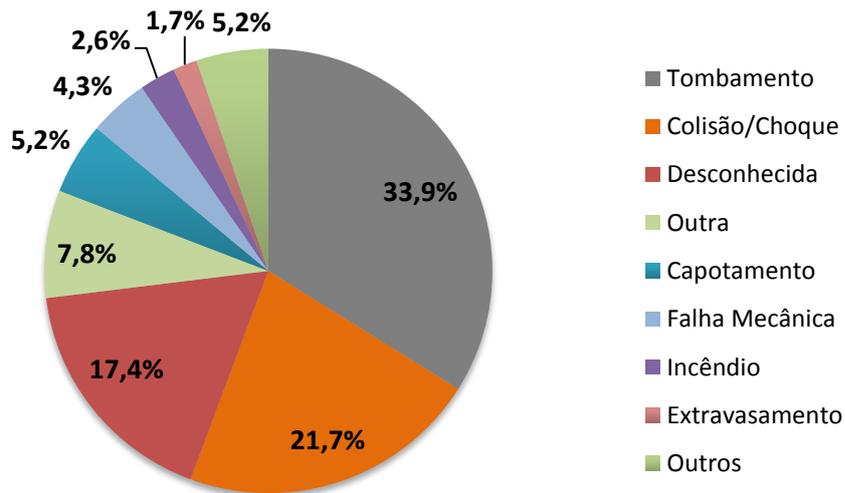


Figura 38 - Causas dos acidentes no transporte rodoviário de Etanol com vazamento. Fonte: CETESB.

Como os cenários no qual o líquido vaza repentinamente dos recipientes não representam bem a realidade, foi considerado também um cenário no qual o líquido escapa do recipiente numa vazão constante após um tombamento. Para descrever cenários acidentais envolvendo tombamento com vazamento constante da carga de etanol, foi considerado um orifício circular com 10 cm de diâmetro (área de furo: 0,007854 m²). Assumiu-se que o vazamento ocorre na base do paralelepípedo que representa o tanque de etanol, simulando o tombamento do veículo e o vazamento do líquido pelo topo do tanque, como mostrado na Figura 39. O modelo representativo deste cenário é mostrado na Figura 40.



Figura 39 - Carreta de etanol tombada. Fonte: <http://www.jcnet.com.br>, acessado em 21 de setembro de 2013.

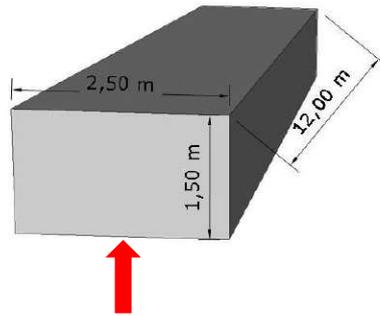


Figura 40 - Cenários considerados no vazamento constante do fluido. (A seta e a bola vermelha indicam os locais de vazamento).

A Tabela 9 mostra o resumo dos cenários que foram avaliados. Sendo os cenários nos quais foram considerados vazamento repentino por consequência do rompimento catastrófico caracterizado pelo volume vazado e o cenário no qual o líquido flui através de um orifício caracterizado pela altura relativa do líquido em relação ao orifício.

Tabela 9 - Resumo dos cenários.

Vazamento Repentino		Vazão Constante	
Cenário	Volume Vazado (m³)	Cenário	h_L^0 (m)
1	5	4	1,5
2	11		
3	45		

5 Resultados

5.1 Diâmetro da Chama

Como o cálculo realizado para definir o diâmetro da chama para o cenário 4 é diferente dos demais, o cálculo deste é mostrado de forma detalhada a seguir.

Inicialmente foi calculada a vazão de vazamento de etanol, através da Equação 2 (modelo de fonte). Para estimar a pior situação, considera-se que a vazão é constante e igual a vazão inicial ($t = 0$).

$$V_s = V_{mL}/\rho = C_0 A \sqrt{2 \left(\frac{P_g}{\rho} + g h_L^0 \right)} - \frac{g C_0^2 A^2}{A_t} t$$
$$V_s = 1 * 0,007854 \sqrt{2 \left(\frac{1,01 * 10^5}{789} + 9,8 * 1,5 \right)} - \frac{9,8 * 1^2 * 0,007854^2}{12 * 2,5} * 0$$
$$V_s = 0,1292 \text{ m}^3/\text{segundo}$$

Através da vazão calculada, foi possível realizar o cálculo do diâmetro máximo formado a partir desta pela Equação 1.

$$D_{m\acute{a}x} = 2 * \left(\frac{0,1292}{\pi * 0,00001} \right)^{\frac{1}{2}} = 40,6 \text{ m}$$

Para validar se é possível a poça alcançar o diâmetro máximo para esta vazão, foi calculado o tempo necessário para a formação desta poça pela Equação 3.

$$t_{max} = \frac{0,564 * 40,6}{(9,8 * 0,00001 * 40,6)^{\frac{1}{3}}} = 67 \text{ s}$$

Considerando que o caminhão possui capacidade de 45 m³, para a vazão calculada, o tempo necessário para esvaziar todo o tanque, seria de 348 segundos, portanto, o vazamento ocorre tempo suficiente para a poça atingir seu diâmetro máximo.

Para os demais cenários o cálculo foi realizado diretamente a partir do volume vazado:

$$\text{Cenário 1: } D = 10\sqrt{5} = 22,4 \text{ m} \quad \text{Cenário 2: } D = 10\sqrt{11} = 33,2 \text{ m}$$

$$\text{Cenário 3: } D = 10\sqrt{45} = 67,1 \text{ m}$$

Como pode-se perceber na Figura 41, todos os cenários apresentaram diâmetros superiores a 20 metros. Portanto, todos os cenários considerados representam incêndios de grande escala.

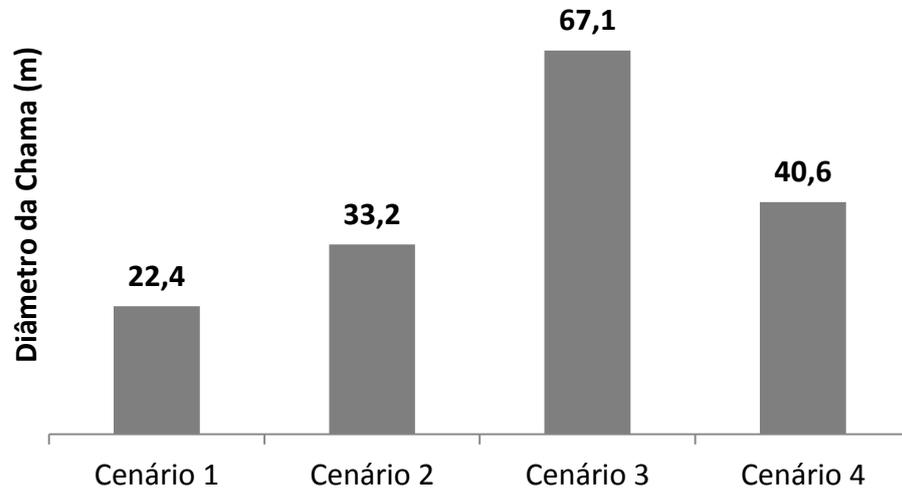


Figura 41 - Diâmetro encontrado para os cenários propostos.

5.2 Altura da Chama

Todas as alturas previstas serão iguais a altura máxima da parede luminosa, pois todos os diâmetros encontrados estão acima de 20 metros. Logo, a altura da parede luminosa será máxima para todos os cenários, como mostrado na Figura 42.

$$H_{ef} = \frac{0,35e^{-1}20q_f''}{4 \times 100} = 6,4 \times 10^{-3} * 400 = 2,6 \text{ m}$$

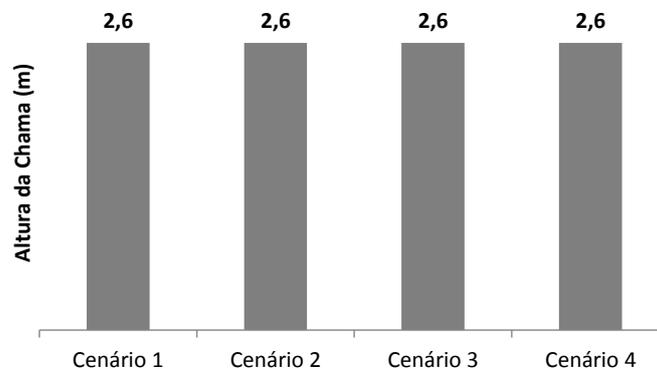


Figura 42 – Altura da chama encontrada para os cenários propostos.

5.3 ASD – Acceptable Separation Distance

5.3.1. Gráfico Simplificado

Para definir a curva do gráfico para a taxa de emissão de calor por unidade de área do Etanol foi realizada uma regressão não linear, para diversos diâmetros de chama, das curvas de ASD para pessoas x Taxa de emissão de calor por unidade de área (Figura 44).

Os pontos utilizados para construir os gráficos, nos quais as regressões foram realizadas, foram obtidos através das curvas de “ASD” de pessoas para cada taxa de emissão de calor por unidade de área, mostrados na Figura 36. Para cada diâmetro de chama foram obtidos os valores de ASD que interceptavam as curvas de pessoas, como é mostrado na Figura 43 para diâmetro de chama igual a 20 metros. Os valores de ASD encontrados no gráfico para cada diâmetro de chama são mostrados na Tabela 10.

Tabela 10 - Valores de ASD encontrados para diferentes diâmetros de chama.

ASD - Acceptable Separation Distance								
D. chama(m) qf" (kW/m ²)	10	20	30	40	50	60	70	1000
5000	73	115	150	170	175	195	200	600
4000	65	100	130	150	160	180	185	510
3000	56	85	110	125	140	150	160	415
2000	46	70	85	95	110	120	130	310
1000	32	48	58	65	70	78	80	190

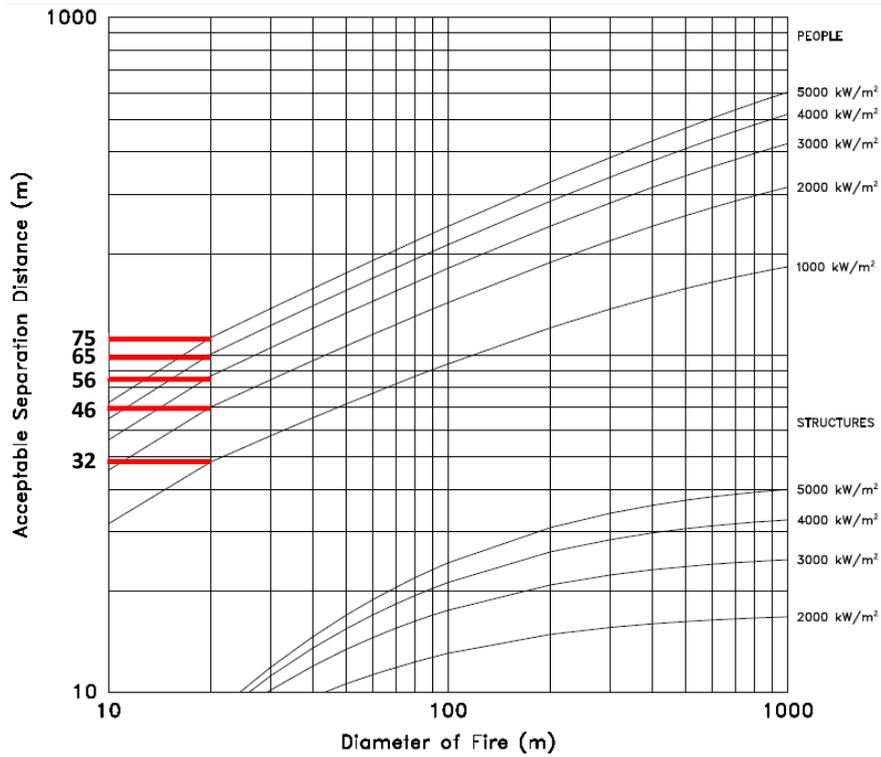
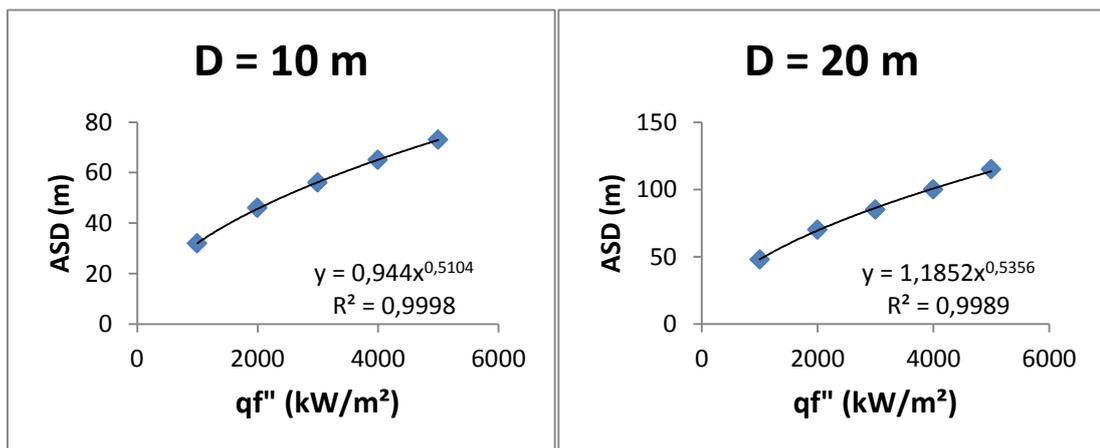


Figura 43 - Pontos ASD para diâmetros de chama igual a 20 m.

Como pode ser visto na Figura 44 as relações encontradas para a as variáveis ASD e qf'' são bem representadas por curvas de potência, as quais forneceram valores de coeficiente de correlação próximos de 1.



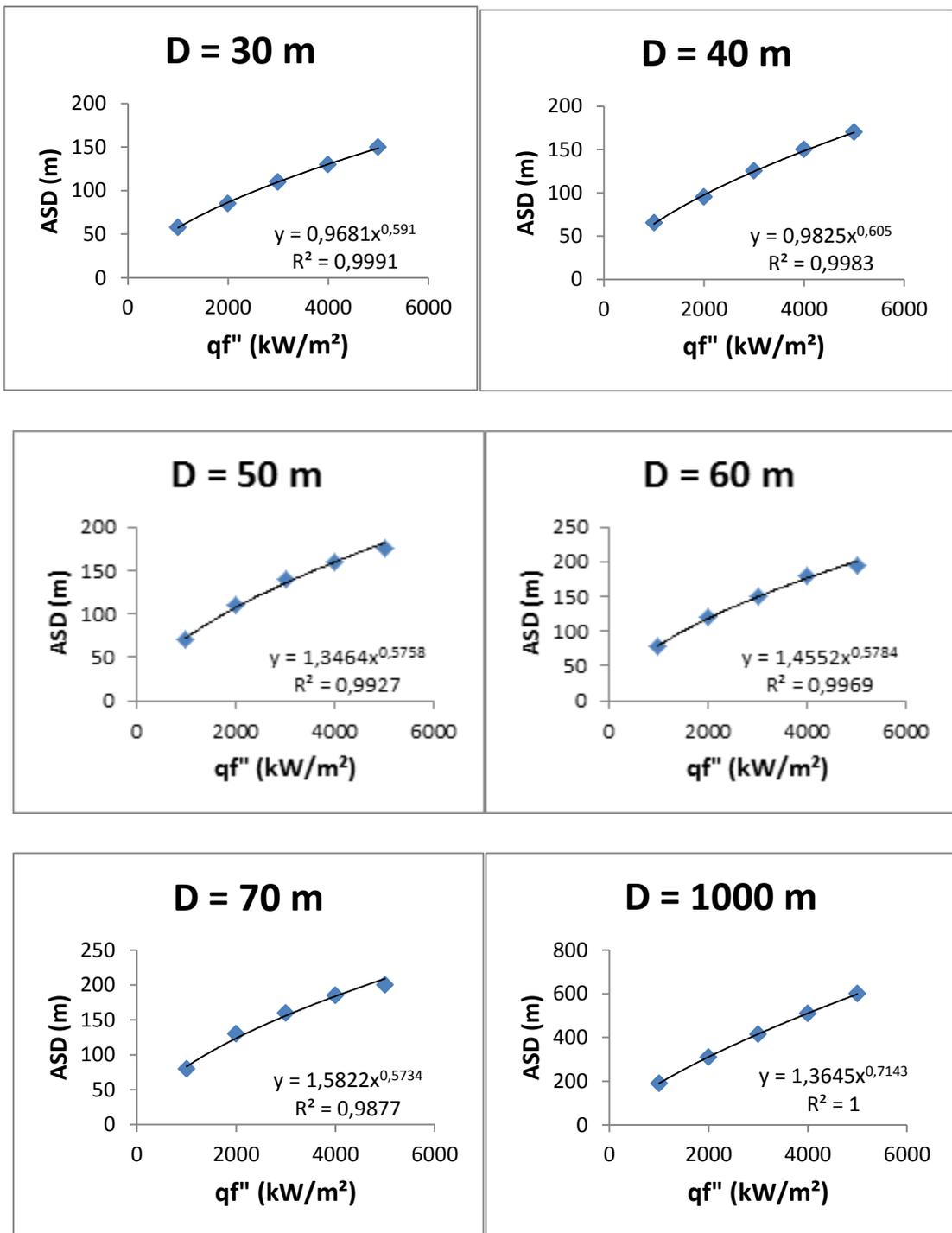


Figura 44 - Resultados das regressões realizadas para obtenção da relação ASD x qf''.

Com as equações obtidas através da regressão foi traçada a curva para 400 kW/m² no gráfico e através dessa curva foram obtidos os valores de distância de separação aceitável.

Os resultados são mostrados na Figura 45.

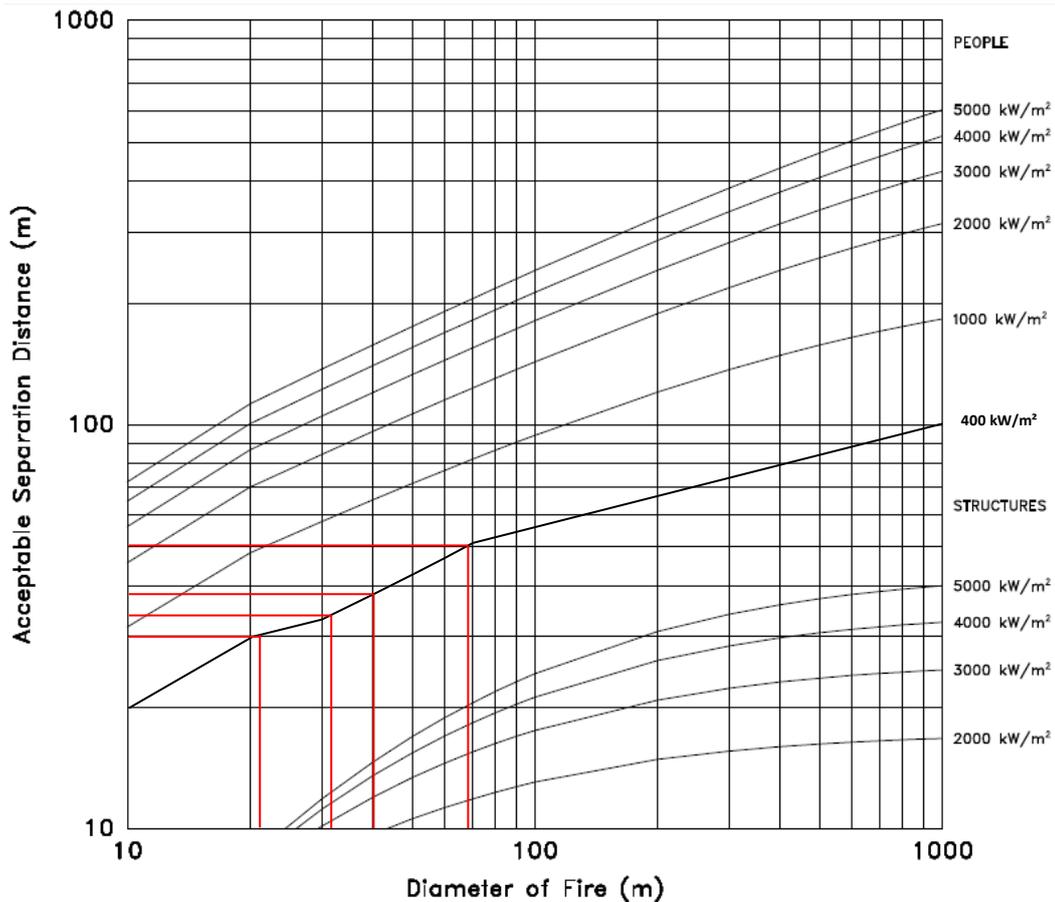


Figura 45 - Resultados de ASD obtidos pelo método "Gráfico Simplificado".

Os valores de “ASD” encontrados por esse método, como esperado, são proporcionais aos diâmetros da chama. Analisando o pior cenário encontrado (cenário 3), percebe-se que a distância encontrada para este é igual ao valor sugerido pelo Manual da ABIQUIM (2011) (50 metros).

5.3.2. Cálculo Detalhado

$$F = 0,014$$

Os dois parâmetros de entrada para obter o fator de forma no método tabela, demonstrados no tópico 4.1, são H/D e S/D . Sendo H a altura da chama, D o diâmetro da chama e S a distância da chama ao alvo. Os valores do diâmetro e altura da chama já foram obtidos nos tópicos 5.1 e 5.2 para todos os cenários. Portanto, os valores H/D podem ser calculados e são mostrados na Figura 46.

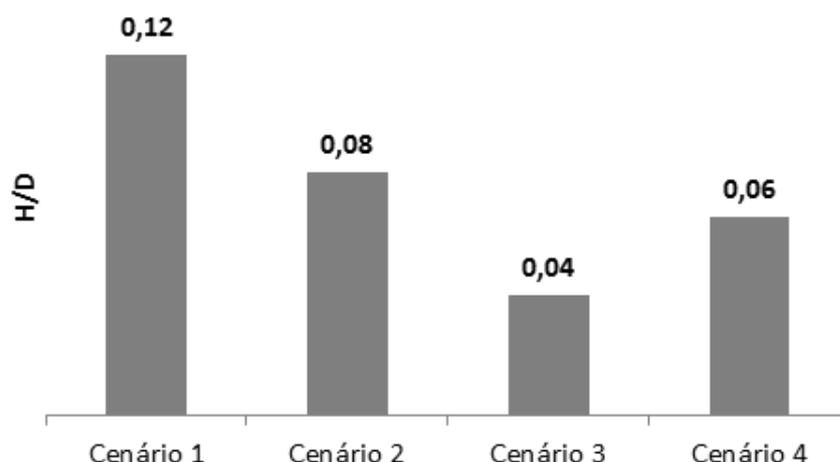


Figura 46 - Valores de H/D para os cenários avaliados.

Tendo os valores de H/D, pode-se encontrar os valores de S/D na Tabela 6, os quais equivalem a um fator de forma igual a 0,014.

Como pode ser visto na Figura 47, para as colunas que representam os valores de H/D dos cenários 1 e 2, a tabela não fornece diretamente o fator de forma igual a 0,014, por isso foi feita uma regressão não linear para definir uma função que descreve o comportamento F x H/D para esses valores.

Os pontos usados para realizar essa regressão foram os próprios pontos mostrados na Tabela 6 nas colunas que fazem referência aos valores de H/D para os cenários 1 e 2. Além disso, para o cenário 1 (H/D = 0,12), foram utilizados os valores referentes a H/D igual a 0,1, pois a tabela não nos fornece precisão suficiente. Os valores utilizados na regressão podem ser vistos na Tabela 11 e o resultado dessas podem ser vistos na Figura 48.

Tabela 11 - Valores de fator de forma utilizados para a regressão S/D x F.

Fator de Forma														
S/D \ H/D	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1	2	3	4	5
0,12	0,331	0,177	0,111	0,076	0,056	0,043	0,034	0,028	0,023	0,02	0,006	0,003	0,002	0,001
0,08	0,288	0,146	0,09	0,062	0,045	0,035	0,028	0,022	0,019	0,016	0,005	0,002	0,001	0,001

	<i>H/D</i>			
	0.08	0.09	0.1	0.2
2	0.288	0.311	0.331	0.442
0	0.146	0.162	0.177	0.289
9	0.090	0.101	0.111	0.198
4	0.062	0.069	0.076	0.142
0	0.045	0.051	0.056	0.107
0	0.035	0.039	0.043	0.084
4	0.028	0.031	0.034	0.067
0	0.022	0.025	0.028	0.055
5	0.019	0.021	0.023	0.046
4	0.016	0.018	0.020	0.039
4	0.005	0.005	0.006	0.012
2	0.002	0.003	0.003	0.006
1	0.001	0.002	0.002	0.003
1	0.001	0.001	0.001	0.002
1	0.001	0.001	0.001	0.002
0	0.000	0.001	0.001	0.001
0	0.000	0.000	0.000	0.001
0	0.000	0.000	0.000	0.001
0	0.000	0.000	0.000	0.001

Figura 47 - Fragmento da tabela de fator de forma para uma chama cilíndrica. Fonte: NIST, 2000.

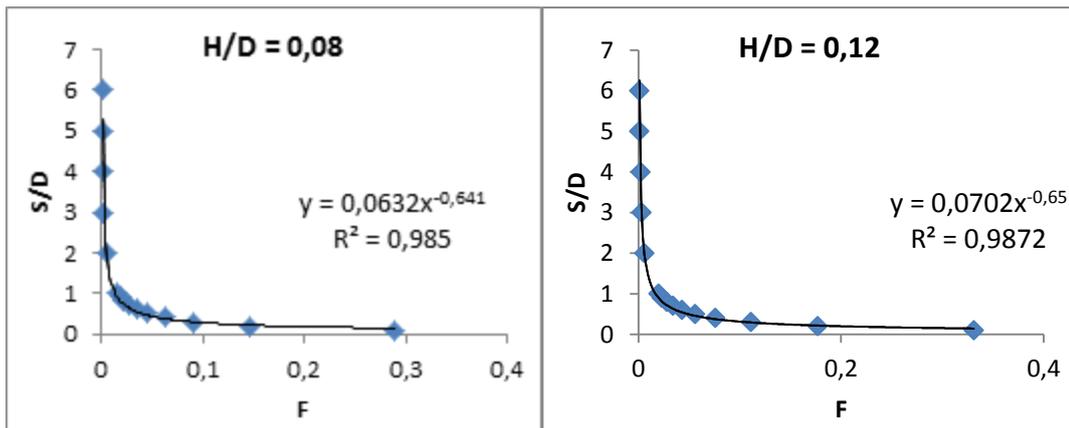


Figura 48 - Resultado da regressão linear S/D x F.

Com as relações obtidas a partir da regressão foi possível determinar o valor de S/D para os quais o fator de forma é igual a 0,014 para os cenários 1 e 2, e para os cenários 3 e 4, estes foram obtidos diretamente da Tabela 6. Os resultados são mostrados na Figura 49.

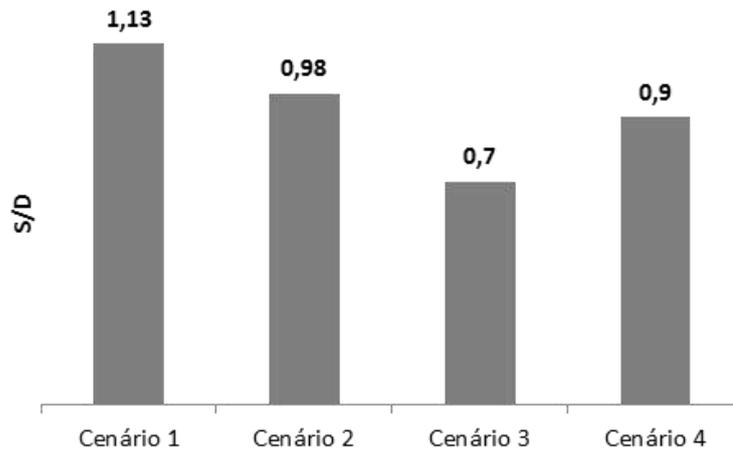


Figura 49 - S/D encontrado para os cenários avaliados.

Com os valores de S/D e com o diâmetro da chama calculado, pode-se obter o valor de ASD, o qual será igual ao valor de S diretamente. Estes são mostrados na Figura 50.

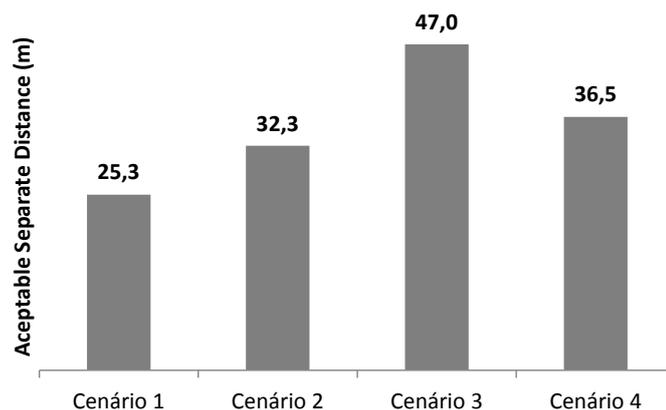


Figura 50 - ASD encontrados para o método do cálculo detalhado para os cenários avaliados.

Para todos os cenários apresentados, as distâncias de separação seguras, calculadas pelo método de cálculo detalhado, ficaram abaixo da área de isolamento indicada pelo Manual de Atendimento a Emergência da ABIQUIM, que é igual a 50 metros. Sendo que para o cenário 3, o mais catastrófico de todos, o método chegou a uma ASD igual a distância sugerida pelo Manual.

Apesar da falta de precisão para o método de gráfico simplificado, os valores para os dois métodos aplicados ficaram bem próximos, sendo o maior percentual de diferença entre os métodos 19%, encontrado para o cenário 1, como pode ser visto na Figura 51. Tal discrepância nos valores encontrados pelos dois métodos, para o cenário 1, pode ser proveniente da falta de precisão do método “gráfico simplificado” ou devido a aproximação feita no método “cálculo detalhado” para este cenário, onde a tabela de valores do fator de forma não possuía uma coluna para $H/D = 0,12$ e este foi aproximado para 0,1.

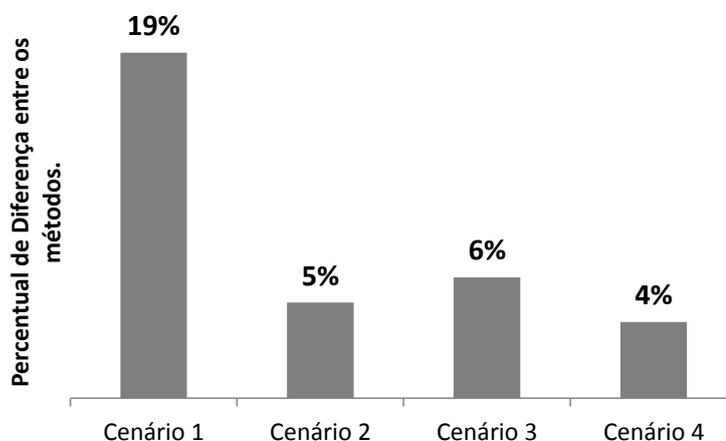


Figura 51 - Comparação entre as ASD's encontradas pelos métodos utilizados.

6 Conclusão

Para todos os cenários apresentados, as distâncias de separação aceitáveis calculadas pelos dois métodos ficaram abaixo da área de isolamento indicada pelo Manual de Atendimento à Emergências da ABIQUIM, que é igual a 50 metros. Sendo que para o cenário 3, o mais catastrófico de todos, os métodos usados chegaram a uma ASD igual a distância sugerida pelo Manual.

As regressões utilizadas para traçar a curva para a taxa de emissão térmica por unidade área igual a 400 kW/m^2 para o método “gráfico simplificado” apresentaram uma boa aproximação, pois os valores de ASD obtidos por este método apresentaram valores próximos ao método de “cálculo detalhado”.

Para acidentes com maiores proporções, como em acidentes com tanques fixos de armazenagem, a distância indicada pelo Manual da ABIQUIM, 2011 pode ser menor que a necessária para manter a integridade das pessoas.

O método de “*Screen ASD*” fornece uma distância muito maior que a indicada pelo manual, porém este é um método conservador e é utilizado em situações nas quais não se sabe qual a proporção que um incêndio pode tomar, para eliminar completamente o risco de exposição de pessoas a radiação térmica. Para calcular a ASD através do “*Screen ASD*” o diâmetro da chama é extrapolado ao infinito. No caso de transporte rodoviário, tem-se um valor limite para a chama formada pelo vazamento que é determinado pela capacidade do veículo.

7 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.

ABTLP – Associação Brasileira de Logística de Produtos Perigosos. Disponível em: <http://www.abtlp.org.br>. Acessado em: 17 de julho de 2013.

ALL – America Latina Logistics. Disponível em: http://pt.all-logistica.com/all/web/default_pti.asp?idioma=0&conta=45. Acessado em: 17 de julho de 2013.

ANFAVEA - Associação Nacional dos Fabricantes de Veículos Automotores, Comparação de Produção de Automóveis. Disponível em: <http://www.anfavea.com.br/>. Acessado em: 21 de março de 2013.

ANP - Agência Nacional de Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis, Estatística Histórica de Demanda de Etanol. Disponível em: <http://www.anp.gov.br/>. Acessado em: 22 de março de 2013.

CETESB – Companhia Ambiental do Estado de São Paulo, Estatísticas de Acidentes com Produtos Perigosos. Disponível em: <http://www.cetesb.sp.gov.br/gerenciamento-de-riscos/Emeg?ncias-Qu?micas/11-Hist?rico>. Acessado: 20 de Setembro de 2013.

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.

CROWL, Daniel A; LOUVAR, Joseph F. *Chemical Process Safety*. New Jersey, 2002, 2ª edição, 650p.

CROWL, Daniel A; LOUVAR, Joseph F, “*Chemical Process Safety, Fundamentals with Applications*”, 3. ed. Nova Jersey: Prentice Hall PTR, 2011.

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.

CURBANI, Flávio; RADAELI, Luiz Antônio. “Aplicação da modelagem da dispersão de poluentes na atmosfera para avaliação de situações de emergência relacionadas a emissões acidentais de agentes químicos”. 2006. Monografia de Pós graduação em Engenharia de Segurança do Trabalho - Centro Federal de Educação Tecnológica do Espírito Santo, Vitória. 2006.

Departamento de Engenharia Civil, Instituto de Ciência da Índia disponível em: <http://civil.iisc.ernet.in/>, acessado em 20 de setembro de 2013.

DNIT – Departamento Nacional de Infraestrutura de Trânsito. Manual para Implementação de Planos de Ação de Emergência. 2005.

Folha Online – Preço médio anual do petróleo, Disponível em: http://www1.folha.uol.com.br/folha/dinheiro/petroleo_choque1.shtml. Acessado em 12 de julho de 2013.

GazetaWeb. Disponível em: Fonte: <http://gazetaweb.globo.com>. Acessado em: 15 de julho de 2013.

GOTTUK, Daniel T. “Liquid Fuel Fire Hazard Characterization”. Flammable and Combustible Liquids Symposium. Illinois, Chicago. 2004.

HAMINS, A.; KASHIWAGI, T; BURCH,R.R. “Characteristics of pool fire burning”, In: Fire Resistance of Industrial Fluids, ASTM STP 1284, George E. Totten and Jurgen Reichel, Editora American Society for Testing and Materials, Philadelphia, 1995.

HIJJAR, Fernanda Maria; LOBO, Alexandre. “Cenário da Infraestrutura Rodoviária no Brasil”, 2011. Disponível em: http://www.ilos.com.br/web/index.php?option=com_content&task=view&id=1807&Itemid=74. Acessado: 21 de março de 2013.

ILOS - Instituto de Logística e Supply Chain. Disponível em: <http://www.ilos.com.br/web/index.php>. Acessado em: 21 de julho de 2013.

INDUSTRIAL GASBURNER. Disponível em: http://portuguese.industrial-gasburner.com/chinaskbs_resist_fire_dust_rain_and_corrosion_industrial_gas_burner_apply_in_metallurgy-166268.html. Acessado em: 19 de setembro de 2013.

ISTO É DINHEIRO. Disponível em: http://www.istoedinheiro.com.br/noticias/83715_15+ANOS+DE+TRANSFORMACOE. Acessado em: 21 de setembro de 2013.

JUNIOR, Carlos André Vaz. 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 23 set. 2012.

LEBLANC, David. “Fire Environments Typical of Navy Ships”. Dissertação de Mestrado em Engenharia da Proteção de Incêndio. Worcester Polytechnic Institute, Worcester, Massachusetts. 1998.

MAPA – Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Disponível em: <http://www.agricultura.gov.br>. Acessado em: 25 de março de 2013.

MILANEZ, Artur Yabe, et al. “Logística para o etanol: situação atual e desafios futuro”. Sucroenergético - BNDES Setorial 31, p. 49-98. 2010.

MILANEZ, Artur Yabe, et al. “O déficit de produção de etanol no Brasil entre 2012 e 2015: determinantes, consequências e sugestões de política”. Biocombustíveis - BNDES Setorial 35, p. 277 – 302. 2012.

Neinzuregl-Suedschiene. Disponível em: <http://www.neinzuregl-suedschiene.at/bilder.html>. Acessado 19 de setembro de 2013.

NOGUEIRA, L. “Análise da resistência de membros estruturais de plataformas offshore durante incêndios”. 66 f. Projeto de Graduação em Engenharia Naval. Universidade Federal do Rio de Janeiro. 2007.

PLANAS, Eulália; Casal, Joaquim. “Fire Accidents in Process Plants: Mathematical Modelling, Uncertainties and Research Needs”. CERTEC - Centre for Studies on Technological Risks.

Planas E.; Muñoz M.; Ferrero F. “Predicting the Emissive Power of Hydrocarbon Pool Fires”. Elsevier, 2007.

Portal Terra de Notícias. Disponível em: <http://www.terra.com.br/portal/>. Acessado em 4 de agosto de 2013.

Portal Nova Cana, disponível em: <http://www.biodieselbr.com/proalcool/proalcool/programa-etanol.htm>. Acessado em: 23 de setembro de 2013.

Pyrotarp. Disponível em: <http://pyrotarp.com/2008/02/04/13-scale-faa-burn-through-test/>. Acessado em 19 de setembro de 2013

RAMOS, Pedro; FILHO, Alceu de Arruda Veiga. Proálcool e Evidências de Concentração na Produção e Processamento de Cana-De-Açúcar. Informações Econômicas, SP, v.36, n.7, jul. 2006.

SCORALICK, Renata Rosa; CESARIO, William dos Santos. Simulação de Cenários de Incêndio em Parques de Tancagem. Monografia de Graduação – EQ/UFRJ. Rio de Janeiro, Rio de Janeiro. 2013.

SINDICOM - Sindicato dos Distribuidores de Combustível. Disponível em: <http://www.sindicom.com.br/>. Acessado em: 30 de março de 2013.

Sobrevivencialismo no Brasil. Disponível em: <http://sobrevivencialismonobrasil.blogspot.com.br/>. Acessado 4 de agosto de 2013.

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.

UDOP - União dos Produtores de Bioenergia. Disponível em: <http://www.udop.com.br>. Acessado em: 21 de março de 2013.

UFRRJ – Unibversidade Federal Rural do Rio de Janeiro Disponível em: <http://www.ufrj.br/institutos/it/de/acidentes/fogo.htm>. Acessado em: 20 de setembro de 2013

UNICA – União da Indústria da Cana-de-Açúcar. Dados estatísticos de produção, exportação e consumo de etanol. Disponível em: <http://www.unicadata.com.br/>. Acessado em: 22 de setembro de 2013.

UTK – University of Tennessee Knoxville. Disponível em: <http://www.engr.utk.edu/>. Acessado em: 20 de setembro de 2013.

ANEXO 1 – 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".
Colocar três barras verticais vermelhas após a palavra "RADIOATIVO".
Número "7" no canto inferior.



(Nº 7C)

Categoria III - Amarela



(Nº 7E)

Classe 7: Material Fissil

Fundo: branco.

Texto (obrigatório): preto na metade superior do rótulo: "FÍSSIL".
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.

ANEXO 2 – TABELAS

Tabela 6: Fator F para o modelo cilíndrico com um elemento recebendo radiação máxima. H é a altura do cilindro, D seu diâmetro e S a distância do elemento ao cilindro

Fonte: NIST, 2000

S/D	H/D																		
	0.01	0.02	0.03	0.04	0.05	0.06	0.07	0.08	0.09	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1
0.1	0.044	0.087	0.128	0.166	0.201	0.233	0.262	0.288	0.311	0.331	0.442	0.481	0.497	0.506	0.510	0.513	0.515	0.517	0.518
0.2	0.019	0.039	0.058	0.077	0.095	0.113	0.130	0.146	0.162	0.177	0.289	0.349	0.380	0.399	0.410	0.417	0.422	0.425	0.427
0.3	0.012	0.023	0.035	0.046	0.057	0.068	0.079	0.090	0.101	0.111	0.198	0.256	0.294	0.318	0.334	0.344	0.352	0.357	0.361
0.4	0.008	0.016	0.024	0.031	0.039	0.047	0.054	0.062	0.069	0.076	0.142	0.193	0.230	0.256	0.274	0.287	0.297	0.304	0.310
0.5	0.006	0.011	0.017	0.023	0.029	0.034	0.040	0.045	0.051	0.056	0.107	0.149	0.183	0.208	0.227	0.242	0.253	0.261	0.268
0.6	0.004	0.009	0.013	0.017	0.022	0.026	0.030	0.035	0.039	0.043	0.084	0.119	0.148	0.172	0.190	0.205	0.217	0.226	0.233
0.7	0.003	0.007	0.010	0.014	0.017	0.021	0.024	0.028	0.031	0.034	0.067	0.096	0.122	0.143	0.161	0.175	0.187	0.196	0.204
0.8	0.003	0.006	0.008	0.011	0.014	0.017	0.020	0.022	0.025	0.028	0.055	0.080	0.102	0.121	0.137	0.151	0.162	0.172	0.180
0.9	0.002	0.005	0.007	0.009	0.012	0.014	0.016	0.019	0.021	0.023	0.046	0.067	0.086	0.103	0.118	0.131	0.142	0.151	0.159
1.0	0.002	0.004	0.006	0.008	0.010	0.012	0.014	0.016	0.018	0.020	0.039	0.057	0.074	0.089	0.102	0.114	0.125	0.134	0.141
2.0	0.001	0.001	0.002	0.002	0.003	0.004	0.004	0.005	0.005	0.006	0.012	0.018	0.024	0.030	0.035	0.040	0.045	0.050	0.055
3.0	0.000	0.001	0.001	0.001	0.001	0.002	0.002	0.002	0.003	0.003	0.006	0.009	0.012	0.015	0.017	0.020	0.023	0.025	0.028
4.0	0.000	0.000	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.002	0.002	0.003	0.005	0.007	0.009	0.010	0.012	0.014	0.015	0.017
5.0	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.002	0.003	0.005	0.006	0.007	0.008	0.009	0.010	0.011
6.0	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001	0.001	0.001	0.001	0.002	0.002	0.003	0.004	0.005	0.006	0.006	0.007	0.008
7.0	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001	0.001	0.001	0.002	0.002	0.003	0.004	0.004	0.005	0.005	0.006
8.0	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001	0.001	0.002	0.002	0.003	0.003	0.004	0.004	0.005
9.0	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001	0.001	0.002	0.002	0.003	0.003	0.004	0.004	0.005
10.0	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001	0.001	0.001	0.002	0.002	0.003	0.003	0.003	0.004

Tabela 7: Fator F para o modelo placa plana com um elemento recebendo radiação máxima H é a altura da placa, W seu comprimento e S a distância do elemento ao centro da placa
 Fonte: NIST, 2000

S/W	H/W																		
	0.01	0.02	0.03	0.04	0.05	0.06	0.07	0.08	0.09	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1
0.1	0.050	0.098	0.143	0.185	0.223	0.256	0.286	0.311	0.333	0.352	0.444	0.470	0.480	0.484	0.486	0.488	0.489	0.489	0.489
0.2	0.024	0.049	0.072	0.096	0.118	0.140	0.161	0.181	0.200	0.218	0.343	0.401	0.428	0.442	0.450	0.455	0.457	0.459	0.461
0.3	0.016	0.031	0.047	0.062	0.077	0.092	0.106	0.120	0.134	0.148	0.257	0.325	0.364	0.387	0.401	0.409	0.415	0.418	0.421
0.4	0.011	0.022	0.033	0.044	0.055	0.065	0.076	0.086	0.096	0.107	0.195	0.259	0.302	0.330	0.348	0.360	0.368	0.373	0.377
0.5	0.008	0.016	0.024	0.033	0.041	0.049	0.057	0.065	0.072	0.080	0.151	0.206	0.248	0.277	0.298	0.312	0.322	0.329	0.335
0.6	0.006	0.013	0.019	0.025	0.031	0.038	0.044	0.050	0.056	0.062	0.118	0.166	0.203	0.232	0.253	0.269	0.281	0.289	0.296
0.7	0.005	0.010	0.015	0.020	0.025	0.030	0.035	0.039	0.044	0.049	0.095	0.135	0.168	0.195	0.216	0.232	0.244	0.253	0.261
0.8	0.004	0.008	0.012	0.016	0.020	0.024	0.028	0.032	0.036	0.040	0.077	0.111	0.140	0.164	0.184	0.200	0.212	0.222	0.230
0.9	0.003	0.007	0.010	0.013	0.016	0.020	0.023	0.026	0.029	0.033	0.064	0.093	0.118	0.140	0.158	0.173	0.185	0.195	0.203
1.0	0.003	0.005	0.008	0.011	0.014	0.016	0.019	0.022	0.025	0.027	0.054	0.078	0.100	0.120	0.136	0.151	0.162	0.172	0.180
2.0	0.001	0.002	0.002	0.003	0.004	0.005	0.005	0.006	0.007	0.008	0.015	0.023	0.030	0.037	0.043	0.050	0.056	0.061	0.066
3.0	0.000	0.001	0.001	0.001	0.002	0.002	0.002	0.003	0.003	0.003	0.007	0.010	0.014	0.017	0.020	0.023	0.027	0.030	0.032
4.0	0.000	0.000	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.002	0.002	0.002	0.004	0.006	0.008	0.010	0.012	0.014	0.015	0.017	0.019
5.0	0.000	0.000	0.000	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.003	0.004	0.005	0.006	0.008	0.009	0.010	0.011	0.012
6.0	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.002	0.003	0.004	0.004	0.005	0.006	0.007	0.008	0.009
7.0	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001	0.001	0.001	0.001	0.002	0.003	0.003	0.004	0.005	0.005	0.006	0.006
8.0	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001	0.001	0.002	0.002	0.003	0.003	0.004	0.004	0.005
9.0	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001	0.001	0.002	0.002	0.002	0.003	0.003	0.004	0.004
10.0	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001	0.001	0.001	0.002	0.002	0.002	0.003	0.003	0.003

Tabela 8 - Taxas de emissão térmica para líquidos perigosos. Fonte: (MCGRATTAN, et al., 2000)

Liquid	Mass Burning Rate, \dot{m}''	Heat of Combustion	HRR Per Unit Area, \dot{q}''_f	Screen ASD		Reference
	kg/m ² /s	kJ/kg	kW/m ²	Struct. m	People 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]
JP-5	0.054	43,000	2,300	20	530	Ref. [9]
Kerosene	0.039	43,200	1,700	15	400	Ref. [9]
Methyl Alcohol	0.017	20,000	340	10	80	Ref. [9]
Methyl Ethyl Ketone	0.072	31,500	2,300	20	530	Ref. [10]
Pentane	0.126	45,000	5,700	50	1300	Ref. [10]
Toluene	0.112	40,500	4,500	40	1000	Ref. [10]
Vinyl Acetate	0.136	22,700	3,100	25	700	Ref. [10]
Xylene	0.090	40,800	3,700	30	850	Ref. [9]

