



**Simulação de Cenários de Incêndio em
Parques de Tancagem**

Renata Rosa Scoralick

William dos Santos Cesario

Projeto Final de Curso

Orientador:

Prof. Carlos André Vaz Júnior

Fevereiro de 2013

Simulação de Cenários de Incêndio em Parques de Tancagem

Renata Rosa Scoralick

William dos Santos Cesario

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

Aprovado por:

Heloisa Lajas Sanches

Luiz Antônio d'Avila

Karen Signori Pereira

Orientado por:

Carlos André Vaz Junior

Scoralick, Renata Rosa. Cesario, William dos Santos.

Simulação de Cenários de Incêndio em Parques de Tancagem / Renata Rosa Scoralick, William dos Santos Cesario. Rio de Janeiro: UFRJ/EQ, 2013.

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

Orientador: Carlos André Vaz Júnior

1.Incêndios Industriais. 2.Análise de Risco. 3.Parque de Tancagem. 4.Projeto Final (Graduação – UFRJ/EQ). 5.Carlos Andre Vaz Júnior. | Simulação de Cenários de Incêndio em Parques de Tancagem.

***Dedicamos este trabalho às nossas famílias e amigos.
Obrigado por tornarem este sonho possível!***

“Não basta dar os passos que nos devem levar um dia ao objetivo, cada passo deve ser ele próprio um objetivo em si mesmo, ao mesmo tempo em que nos leva para diante.”

Johan Wolfgang Von Goethe

“To say that “nothing is true”, is to realize that the foundations of society are fragil, and that we must be the shepherds of our own civilization. To say that “everything is permitted”, is to understand that we are the architects of our actions, and that we must live with their consequences, whether glorious or tragic.”

Ezio Auditore da Firenze – Assassin’s Creed: Revelations

Agradecimentos – Renata

Ao Professor Carlos André do Vaz Júnior, DSc, (EQ-UFRJ), pelo apoio, dedicação, incentivo, orientação e amizade. Obrigada por me apoiar em todas as minhas decisões!

À Professora Heloísa Lajas Sanches, DSc, (EQ-UFRJ), pelo apoio, carinho, amizade e auxílio na minha formação acadêmica.

Ao meu amigo Willian Cesário pela ajuda na conclusão deste trabalho, amizade e apoio.

À minha amiga Carolina Delarue Tavares do Canto pela amizade, apoio, compreensão e carinho. Sem você nem tudo teria sido o sucesso que foi!

À minha irmã Natália Azeredo Soares pelos oito anos de amizade e apoio.

Ao meu irmão Márton Divényi pelo carinho, amizade e apoio nos momentos difíceis.

À minha amiga Helena Mendes pelo conhecimento, carinho, amizade e conselhos. Você é minha inspiração profissional!

Aos meus chefes Dobel Faria, Emanuel Cardoso e José Antonio Abaurrea por todo o conhecimento que hoje possuo, pela oportunidade profissional, por acreditarem em mim, pela amizade, carinho, pelos dias animados, pelas conversas, por tudo que eu vivi durante o meu estágio. Eu não tenho palavras para agradecer. Obrigada por serem tão maravilhosos.

Aos meus amigos de graduação Victor Castanheira, Diego Simões, Juliana Farah, Bernardo Saldanha, Thaissa Pereira, Mauricio Rodrigues, Thiago Moutinho, Rodrigo Lannes, Raissa Santos, Rodrigo Fernandes, Helio Vidal, Felipe Cairo, Monique dos Santos por todo apoio e auxílio nesta jornada cheia de obstáculos.

Ao meu namorado e melhor amigo Alexandre de Souza Ferreira por todo amor, carinho, compreensão, apoio, auxílio.

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.

Agradecimentos – William

Gostaria de agradecer a todos que me ajudaram no meu percurso da vida.

Ao meu orientador Carlos André do Vaz Júnior, DSc, (EQ-UFRJ), pela paciência, ajuda e, principalmente, por todo o conhecimento passado.

À Renata Scoralick, sem todo o seu trabalho duro, este projeto jamais teria ficado pronto.

Aos meus eternos chefes, Paula e Carlos Riehl, por todas as oportunidades e ensinamentos que mudaram a minha vida e modo de pensar.

A minha mãe, Maria, e ao meu irmão, Rafael. A primeira por ter me ensinado a importância dos estudos e trabalho duro, e o segundo por ter sido apenas uma criança de 7 anos recém-feitos, apesar das responsabilidades.

Aos meus amigos, Daniel, Danilo, Daniella, Felipe, João, Igor, Vanessa por todos os conselhos, e distrações. Sem elas para me relaxar, nada disso poderia ser possível.

A Mariana, Clara e Isabela, que nos momentos de aperto, dentro ou fora da faculdade, estiveram sempre por perto.

A Tatiana e Rosana que tornaram a solidão do laboratório sempre mais divertida.

A Ana, que sempre fez diferença, seja ouvindo, lendo ou me ajudando a reescrever parágrafos confusos. Mas, mais do que isso, por ter sido companheira e compreensiva e pelos momentos que dividimos até hoje. A vida não teria metade da graça sem você.

À banca examinadora, por ter aceitado tão prontamente o convite e pelo tempo investido no estudo e crítica ao trabalho de forma a enriquecê-lo.

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

Simulação de incêndio no Parque de Tancagem de Campos Elíseos

Renata Rosa Scoralick

William dos Santos Cesario

Fevereiro de 2013

Orientador: Prof. Carlos André Vaz Júnior

O presente estudo tem como objetivo determinar a influência de um eventual incêndio em parques de tancagem sobre as populações vizinhas a instalação industrial. O histórico de acidentes em plantas químicas e petroquímicas demonstra a importância do estudo das condições de segurança deste tipo de empreendimento. A Norma Técnica CETESB P4.261, "Risco de Acidente de Origem Tecnológica - Método para decisão e termos de referência" foi utilizada como referência na avaliação dos dois cenários levantados. O primeiro cenário simulado foi o rompimento catastrófico de um tanque de gasolina ou óleo cru existente em terminal localizado na região de Duque de Caxias, no Rio de Janeiro. A liberação de todo seu conteúdo e a formação de incêndio em poça foi considerada. Já no segundo cenário o incêndio ficou contido no interior de um único tanque. Estes cenários mostram-se mais frequente na análise de acidentes reais envolvendo incêndios em parque de tancagem. As equações do modelo de radiação térmica foram retiradas da literatura e os limites de exposição da CETESB (Dez/2011 2ªed.). Como resultado, o primeiro cenário demonstra que a população vizinha mais próxima poderia ser fortemente afetada, sendo exposta a níveis perigosos de radiação térmica. O diâmetro da poça de combustível formado mostrou-se determinante para essa avaliação. O segundo cenário, onde o incêndio permanece contido no interior do tanque, indicou que a população externa ao parque de tancagem não seria afetada. O posicionamento do terminal como um todo e de cada tanque individualmente também afeta a análise. Os resultados encontrados mostraram pouca dependência em relação ao combustível armazenado – gasolina ou óleo cru. Não foram simulados cenários envolvendo incêndios em mais de um tanque simultaneamente.

Sumário

1. Introdução	1
2. Parque de Tancagem: produtos armazenados, origem e destino	2
2.1 Petróleo	2
2.1.1 Classificação	2
2.1.2 Cadeia Produtiva	3
2.2 Refinarias.....	3
2.3 Principais produtos.....	4
2.4 Terminal de Abastecimento de Campos Elíseos – TECAM.....	7
3. TANQUES DE ARMAZENAMENTO	9
3.1 Definição de tanque de armazenamento.....	9
3.2 Tipos de Tanques de Armazenamento.....	9
3.2.1 Tanques de Teto Flutuante (<i>Lifting Roll</i>).....	9
3.2.2 Tanques de Teto Fixo (<i>Fixed Roof</i>)	12
3.3 Acessórios de Segurança de Tanques	12
3.3.1 Tanques de teto fixo	13
3.3.2 Tanques de teto flutuante.....	19
4. Históricos de Acidentes Industriais	22
4.1 Principais Acidentes	22
4.1.2 Feyzin - 1966	22
4.1.1 REDUC (Brasil - 1972)	24
4.1.3 México (1984).....	27
4.1.4 Venezuela (2012).....	28
5. Manual de Análise de Risco da CETESB.....	30
5.1 A Norma	30
5.2 Desenvolvimento do método para empreendimentos pontuais.....	30
5.2.1 Classificação das substâncias químicas quanto à periculosidade	31
5.2.2 Tomada de decisão quanto à necessidade de EAR ou PGR	32
5.3 Termo de Referência para a Elaboração de Estudo de Análise de Risco para Empreendimentos Pontuais.....	32
5.3.1 Caracterização do empreendimento e do seu entorno	33
5.3.2 Identificação de Perigo.....	34
5.3.3 Consolidação das hipóteses acidentais.....	34
5.3.4 Estimativa dos Efeitos Físicos e Avaliação de Vulnerabilidade	35

5.3.5 Estimativa de frequências	39
5.3.6 Estimativa e avaliação de risco.....	39
5.3.7 Redução do risco	42
5.4 Termo de Referência para a Elaboração de Programa de Gerenciamento de Risco	42
6. Introdução à Dinâmica de Incêndio	45
6.1 Tipos de chama	45
6.2 A combustão e suas propriedades	47
6.3 Perfil de Temperatura	49
6.4 Modelagem de Incêndio em Poça.....	50
6.4.1 Taxa de emissão de calor	50
6.4.2 Altura da chama	52
6.4.3 Taxa de queima	53
6.4.4 Tempo de queima	54
6.4.5 Radiação térmica.....	55
6.4.6 Fator de Forma	58
6.4.7 Altura “efetiva” da chama.....	64
7. Estudo de Caso	67
7.1 Letalidade	67
7.2 Radiação térmica.....	67
7.3 Cenários avaliados.....	69
7.3.1 Incêndio externo aos tanques.....	69
7.3.2 Incêndio interno ao tanque.....	70
7.4 Resultados	71
7.4.1 Incêndio externo aos tanques.....	71
7.4.2 Incêndio interno ao tanque.....	73
8. CONCLUSÃO	77
Referências Bibliográficas	78
ANEXO	82

Lista de Figuras

Figura 2.1: Vista aérea do TECAM	7
Figura 3.1: Tanques de teto flutuante	10
Figura 3.2: Tanque de teto flutuante interno	11
Figura 3.3: Película Flutuante	11
Figura 3.4: Tanques de teto fixo	12
Figura 3.5 - Colapsado em função do bloqueio do respiro por um plástico	13
Figura 3.6: Válvula de Pressão e Vácuo	14
Figura 3.7: Funcionamento de Válvulas de Pressão e Vácuo	14
Figura 3.8: Recheio da Válvula Corta Chama	15
Figura 3.9: Válvula de alívio conjugado com corta chama	15
Figura 3.10: Sistema de Espuma	17
Figura 3.11: Boca de visita aberta para a manutenção do tanque	18
Figura 3.12: Escada helicoidal	19
Figura 3.13: Válvula quebra vácuo	20
Figura 3.14: Esquema de dreno de teto	20
Figura 3.15: Escada e anel de contraventamento TQ 1007	21
Figura 4.1: Procedimento de amostragem	23
Figura 4.2: Esfera em chamas	24
Figura 4.3: Esferas de GLP após o acidente	25
Figura 4.4: Parte superior de um tanque de GLP encontrada a um quilometro do local	26
Figura 4.5: Destruição da planta da PEMEX	28
Figura 4.6: Terceiro tanque incendiado	29
Figura 4.7: População vizinha a Refinaria Amuay	29
Figura 5.1: Representação das regiões de probabilidade de fatalidade associadas aos valores de referência para o efeito de radiação térmica	37
Figura 5.2: Representação das regiões de probabilidade de fatalidade associadas aos valores de referência para o efeito de sobrepressão	38
Figura 5.3: Representação do risco individual por meio dos contornos de isorrisco	40
Figura 5.4: Critério de tolerabilidade para risco social	42
Figura 6.1 Incêndio em Jato	46

Figura 6.2 Bola de fogo	46
Figura 6.3 Incêndio em poça	46
Figura 6.4 Triângulo do fogo	47
Figura 6.5: Tetraedro do fogo	48
Figura 6.6 Curva Padrão e curva para queima de hidrocarbonetos	49
Figura 6.7 Relação entre a taxa de emissão de calor e as fases da queima	51
Figura 6.8: Flutuações na altura da chama	52
Figura 6.9 – Transmissão de calor – Radiação	56
Figura 6.10 – Modelos de incêndio	57
Figura 6.11 Poder emissivo em função do diâmetro do incêndio para um incêndio em poça de gasolina	58
Figura 6.12 Modelos esquemáticos de cilindro e placa plana para calculo do fator de forma.	58
Figura 6.13 Notações usadas para o calculo do fator F	59
Figura 6.14: Notações usadas para o calculo do fator F para um elemento pontual (2) exposto a uma radiação de uma superfície (1)	60
Figura 6.15: Elemento diferencial planar para retângulo paralelo finito. A normal ao elemento passa através do canto retângulo	61
Figura 6.16: Elemento diferencial planar para retângulo em 90° ao plano do elemento e perpendicular a borda do plano	61
Figura 6.17: A partir do elemento diferencial inclinado em um ângulo arbitrário a um retângulo finito. (A_2 não deve passar através do plano de dA_1)	62
Figura 6.18: Elemento no plano ao exterior do cilindro circular de comprimento finito. O plano não intercepta cilindro	62
Figura 6.19: Elemento na forma de anel planar ou coaxial em um plano perpendicular ao plano do cilindro de altura finita	63
Figura 6.20: Figura ilustrativa do exemplo	63
Figura 6.21: Emissão de radiação da zona luminosa	64
Figura 6.22: Fração de radiação (X_r), em função do diâmetro para heptano (*), óleo cru (o) e querosene (+)	65
Figura 6.23: Altura da zona luminosa para incêndio a gasolina, onde $X_{r_{max}} = 0,35$, $q_f'' = 2400 \text{ kW/m}^2$, $k = 0,05 \text{ m}^{-1}$ e $E_f = 100 \text{ kW/m}^2$	66
Figura 7.1: Elemento na forma de anel planar ou coaxial em um plano perpendicular ao plano do cilindro de altura finita	68

Figura 7.2 Zonas de risco para vazamento com contenção (escala 1,75 cm : 500 m)	72
Figura 7.3 Zonas de risco para vazamento com contenção (escala 2,1 cm : 100 m)	75
Figura 7.4 Zonas de risco para vazamento com contenção (escala 2,1 cm : 100 m)	76

Lista de Tabelas

Tabela 2.1: Caracterização do petróleo	2
Tabela 2.2: Refinarias no Brasil	5
Tabela 2.3: Produtos derivados do petróleo	6
Tabela 2.4: Produção das Refinarias Brasileira	6
Tabela 2.5: Informações gerais do TECAM	7
Tabela 2.6: Capacidade Nominal de Armazenamento do TECAM	8
Tabela 2.7: Informações técnicas dos tanques do TECAM	8
Tabela 3.1: Concentração mínima de oxigênio	16
Tabela 5.1: Nível de Inflamabilidade	31
Tabela 5.2: Nível de Toxidade	31
Tabela 5.3: Critério para decisão de elaboração da documentação	32
Tabela 5.4: Identificação de Perigos	34
Tabela 5.5: Substâncias a serem utilizadas nas simulações para petróleo e derivados	36
Tabela 6.1 Taxa de emissão de calor de diversos materiais	51
Tabela 6.2 Taxa de emissão de calor de diversos materiais	52
Tabela 6.3 Dados para estimativa de taxa de queima para incêndio em poça	54
Tabela 6.4: 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	59
Tabela 6.5: 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.	59
Tabela 7.1: Informações técnicas dos tanques do TECAM	70
Tabela 7.2 Dados obtidos para incêndio em piscina contido no TECAM	72
Tabela 7.3 Valores das constantes para Gasolina e Petróleo	73
Tabela 7.4 Dados obtidos para incêndio em piscina com petróleo – incêndio no tanque.	74
Tabela 7.5 Dados obtidos para incêndio em piscina com gasolina – incêndio no tanque	74

Lista de Símbolos

- P_r : Função matemática do tipo *Probit*;
- t : Tempo de exposição a radiação térmica;
- I : Fluxo de radiação térmica (eq 7.1);
- q'' : Fluxo de radiação térmica (eq 7.2);
- F : Fator de forma;
- τ : Transmissividade atmosférica para a radiação térmica;
- ε_f : Emissividade efetiva da chama;
- E_f : Poder emissivo total do fogo na sua superfície;
- r_1 : Diâmetro do incêndio em poça;
- r_2 : Distância do centro da poça ao elemento;
- l : Altura efetiva (Eq 7.4)
- H : Altura efetiva (Eq 7.5 e Eq 7.6)
- X_{rmax} : Fator de ajustes;
- k : Constante ($0,05 \text{ m}^{-1}$);
- D : Diâmetro de poça;
- q_f'' : Taxa de emissão de calor por unidade de área;
- Q : Taxa de liberação total de calor;
- A : Área horizontal da poça;
- m'' : Taxa de queima ou perda de massa;
- $\Delta H_{c,eff}$: Calor efetivo de combustão;
- A_f : Área horizontal de combustível;
- $k.\beta$ = Constantes empíricas.

1. Introdução

O desenvolvimento industrial possibilita a diversificação e massificação de produtos ofertados. De modo a atender a necessidade crescente por produtos, instalações industriais cada vez maiores e mais complexas vêm sendo construídas. O aumento da produção veio com o maior porte dos equipamentos, assim como redução nas paradas e aumento da carga de trabalho. Contudo, a intensa rotina de trabalho, mais que aumentar a produção, pode também resultar no aumento do risco operacional.

Nos estabelecimentos industriais, medidas adequadas para prevenir os incêndios e preservar a segurança dos trabalhadores vêm sendo adotadas. Especificamente, os equipamentos e as instalações que apresentam elevados riscos de incêndio são construídos de modo a garantir a segurança dos trabalhadores e população vizinha. Os acidentes industriais têm sido discutidos sob várias óticas, especialmente em razão do impacto à sociedade, ao meio ambiente, perdas econômicas e de imagem das corporações envolvidas, percepção do setor como um todo, etc.

Na segurança de processos o histórico de acidentes torna-se importante para o estudo da segurança das instalações. Acidentes industriais vêm provocando diversos efeitos danosos, tais como liberação de nuvens de gases ou vapores tóxicos e/ou inflamáveis, incêndios na forma de jato ou poça, explosões, contaminação de solos, rios e lagoas, etc. Estes cenários podem gerar grandes perdas materiais, ambientais e humanas, envolvendo inclusive comunidades externas ao ambiente industrial.

Este estudo teve como foco a análise de diferentes cenários de incêndios em parques de tancagem, assim como a avaliação de risco destes cenários. No capítulo 2, é detalhado o contexto industrial do refino no Brasil, desde as refinarias existentes (privadas ou estatais) até atual situação do mercado. Posteriormente, aborda-se a principal refinaria do estado do Rio de Janeiro, REDUC, e o parque de tancagem de Campos Elíseos, TECAM.

No capítulo seguinte são abordadas as definições de parque de tancagem e tanques de armazenamento, sendo este último detalhando em suas variações. Por fim são apresentados os tipos de equipamento instalados nos tanques para garantir, em caso de incêndio, a segurança do empreendimento.

No capítulo 4, acidentes industriais relacionados a armazenamento de combustíveis são detalhados. Neste capítulo, o acidente na Refinaria de Amuay (Venezuela), ocorrido durante a realização deste estudo, e cujas proporções atingiram a população vizinha, também foi citado.

No capítulo 5, a norma CETESB de avaliação de risco é apresentada com o objetivo de explicar a realização e estrutura de uma análise de risco.

O capítulo 6 é composto pela parte teórica que constitui o estudo de incêndios em instalações industriais. Apresentam-se diversos conceitos relevantes, seguindo de uma descrição mais detalhada sobre incêndios em poça e dos modelos usados no capítulo seguinte.

Por fim, o capítulo 7 discute dois cenários possíveis de acidentes que poderiam ser observados no TECAM. No primeiro cenário, o rompimento de um dos tanques com vazamento do líquido nele contido, o qual entraria em combustão. No segundo cenário, o incêndio é limitado ao interior do tanque. Em ambos os casos foram explorados os efeitos sobre a população vizinha ao parque de tancagem. Os resultados são apresentados e discutidos para cada um dos cenários. A conclusão deste estudo e propostas para trabalhos futuros são então descritas no capítulo 8.

2. Parque de Tancagem: produtos armazenados, origem e destino

Este capítulo visa apresentar a logística de armazenamento de compostos como petróleo e seus derivados em parques de tancagem. Especial atenção será dada ao TECAM, parque de tancagem localizado no Rio de Janeiro.

2.1 Petróleo

O petróleo é considerado uma fonte de energia não renovável, de origem fóssil, sendo matéria prima da indústria petroquímica. O petróleo bruto é constituído de cadeias de hidrocarbonetos.

2.1.1 Classificação

O petróleo pode ser classificado de diferentes formas dependendo dos parâmetros físicos e químicos usados.

Os refinadores de petróleo preocupam-se em classificá-lo quanto à quantidade relativa das sucessivas frações de destilação, composição química ou propriedades físicas destas frações. A classificação que tem sido mais utilizada pelos refinadores foi estabelecida pelo U. S. Bureau of Mines, e a métrica usada é o fator de caracterização UOP (KUOP). Este é um indicativo da origem e natureza de um petróleo, e seus principais parâmetros são °API e a viscosidade cinemática.

A classificação mais empregada atualmente relaciona o teor de hidrocarbonetos presentes no petróleo. A distribuição percentual de hidrocarbonetos é que define os diversos tipos de petróleo existentes no mundo. A Tabela 2.1 apresenta as classificações possíveis, bem como a concentração de parafinas, saturados, naftênicos e aromáticos usadas para a determinação das classes.

Tabela 2.1: Caracterização do petróleo

Fonte: Petrobrás, 2002.

Tipo de Petróleo	Concentração no Petróleo (<210°C)		
Parafínicos	P>N e P>40%	S>50%	AA<50%
Parafínicos-naftênicos	P≤40% e N≤40%	S>50%	AA<50%
Naftênicos	N>P e N>40%	S>50%	AA<50%
Aromáticos Intermediários	P>10%	S≤50%	AA≥50%
Aromáticos asfálticos	P≤10% e N≤25%	S≤50%	AA≥50%
Aromáticos naftênicos	P≤10% e N≥25%	S≤50%	AA≥50%

Obs: S = saturados; P = parafinas; N = naftênicos; AA = aromáticos + resinas + asfaltenos

2.1.2 Cadeia Produtiva

A cadeia produtiva do petróleo pode ser dividida em quatro grandes grupos: exploração, refino, indústria petroquímica e indústria de transformação. Os produtos obtidos em cada um dos grupos são, dentre outros:

- Exploração: Gás Natural, Etano e Propano e Petróleo;
- Refino: Gasolina, Óleo Diesel, Querosene, *Bunker* e Nafta;
- Indústria Petroquímica: Produção de Olefinas e Aromáticos e Produção de Polímeros
- Indústria de Transformação: Embalagens, Filmes, Componentes automotivos, Fios, Tubos, Cabos, Eletrodomésticos e Fibras.

A refinaria pode ser destacada como a receptora primária do óleo cru, tendo como característica principal a produção de derivados primários. Torna-se, portanto, uma receptora de grande escala e geradora de volumes consideráveis de produtos.

De modo a igualar oferta e demanda das matérias-primas e produtos, é comum o armazenamento tanto do petróleo como dos seus derivados, em parques de tancagem. Estes são compostos por tanques com capacidades volumétricas adequadas as demandas locais.

2.2 Refinarias

Refinaria é uma planta contínua multiproduto, isto é, um sistema de processamento contínuo gerador de produtos diversos. A refinaria faz uso do petróleo como matéria-prima para obter derivados leves e pesados, como gás liquefeito de petróleo (GLP), nafta, óleo combustível, asfalto, entre outros (Simão, L.M., 2006 apud Moro, 2000).

O refino de petróleo no Brasil teve início em 1932, por iniciativa privada, quando foi construída a primeira refinaria, a Riograndense, em Uruguaiana (RS), com capacidade de 150 barris/dia (bpd). Esta processava petróleo importado do Uruguai e da Argentina. Posteriormente, em 1936, entraram em operação mais duas refinarias: Ipiranga, localizada no Rio Grande (RS), com capacidade para 1.000 bpd, e a das Indústrias Matarazzo de Energia, em São Caetano (SP) (Costa, P. S/D)

No final de 1946 foi incitada a construção da refinaria de Mataripe (BA), para processar o petróleo retirado dos poços baianos. As obras foram concluídas quatro anos após.

As refinarias da União, em Mauá, em São Paulo, e Refinaria de Manguinhos, na cidade do Rio de Janeiro, foram implantadas em 1954. No mesmo ano, a Petrobrás iniciava suas atividades. No ano seguinte, a refinaria de Presidente Bernardes (SP) foi inaugurada. Nesta década a duplicação da refinaria de Mataripe (BA) e construção da refinaria de Presidente Bernardes representaram medidas iniciais designadas a levar a frente a completa substituição da importação dos refinados. No final de 1956, foi concluída a Refinaria Isaac Sabbá, com capacidade para 5 mil bpd. (Costa, P. S/D)

Na década de 60 outras refinarias tiveram suas atividades iniciadas: a refinaria Duque de Caxias (RJ), em 1961; a Lubrificantes e Derivados de Petróleo do Nordeste, em 1966; a Refinaria Gabriel Passos, em Betim (MG); e a Refinaria Alberto Pasqualini, em Canoas (RS), ambas em 1968 (Costa, P. S/D).

Posteriormente, já na década de 70, foi inaugurada a refinaria de Paulínia (SP), em 1972. Nesse mesmo ano a Petrobrás assumiu o controle da Refinaria Rio Grandense e da refinaria das Indústrias Matarazzo, vindo posteriormente a encerrar as atividades destas. Dois anos depois, em 1974, a Petrobrás assumiu a concessão da Refinaria União (SP), rebatizada de Refinaria de Capuava, e da Refinaria Isaac Sabbá (AM). Já no final da década de 70, a refinaria Getúlio Vargas, em Araucária (PR) foi inaugurada.

A Refinaria Henrique Lage, em 1980, em São José dos Campos (SP), completa a lista das refinarias implantadas no Brasil (Costa, P.).

A Tabela 2.2 apresenta as principais refinarias do Brasil e suas capacidades produtivas para o ano de 2009 (Costa, P. *et al.*). Atualmente, a Petrobrás possui onze das treze refinarias em operação no país, sendo responsável por quase 99% da capacidade instalada de refino.

2.3 Principais produtos

O refino do petróleo constitui uma série de beneficiamentos pelos quais passa o mineral bruto até a obtenção de produtos de interesse (Ramos, A.L.D.).

Os produtos do refino são divididos em função da temperatura de destilação ou do processo de beneficiamento sofrido para sua obtenção. Na Tabela 2.3 encontram-se os principais produtos, divididos de acordo com a natureza de obtenção. A tabela apresenta ainda suas principais aplicações (Ramos, A.L.D.).

A Tabela 2.4 apresenta a capacidade produtiva total dos principais produtos de todas as refinarias do Brasil no ano de 2011.

Tabela 2.2: Refinarias no Brasil

Fonte: Costa, P. *et al.*

Nome das Refinarias	Sigla	Localização	Capacidade inicial	Capacidade atual (bpd)	Ano da implantação	Tipo de Economia
Riograndense	-	Uruguaiana/RS/Sul	150 bpd	-	1932	Privada
Ipiranga	-	Rio Grande/RS/Sul	1000 bpd	-	1936	Consórcio Braskem, Petrobrás e Grupo Ultra
Matarazzo	-	S. Caetano/SP/SE	500 bpd	-	1936	Privada
Landulfo Alves (Mataripe)	RLAM	São Francisco do Conde/BA/NE	-	279 mil	1950	Petrobrás
Capuava (ex-União)	RECAP	Mauá/SP/SE	20 mil bpd	53 mil	1954	Petrobrás
Manguinhos	-	Rio/RJ/SE	10 mil bpd	15 mil	1954	Privada
Presidente Bernades	RPBC	Cubatão/SP/SE	45 mil bpd	170 mil	1955	Petrobrás
Isaac Sabbá.	REMAN	Manaus/AM/Norte	5 mil bpd	46 mil	1956	Petrobrás
Duque de Caxias	REDUC	Duque de Caxias/RJ/SE	90 mil bpd	242 mil	1961	Petrobrás
Gabriel Passos	REGAP	Betim/MG/SE	45 mil bpd	151 mil	1968	Petrobrás
Lubrificantes e Derivados de Petróleo do NE	LUBNOR	Fortaleza	450 mil m ³	7 mil	1966	Petrobrás
Alberto Pasqualini	REFAP	Canoas/RS/Sul	45 mil bpd	189 mil	1968	Petrobrás
Paulínia	REPLAN	Paulínia/SP/SE	126 mil bpd	365 mil	1972	Petrobrás
Presidente Getúlio Vargas	REPAR	Araucária/PR/Sul	20 mil m ³	189 mil	1977	Petrobrás
Henrique Lage	REVAP	São José dos Campos/SP/SE	251 mil m ³	251 mil	1980	Petrobrás

Nota: Entende-se como capacidade produtiva de uma refinaria a quantidade de barris de petróleo processados por dia (bpd).

Tabela 2.3: Produtos derivados do petróleo

Fonte: Ramos, A.L.D.

Produto	Faixa de destilação	Principais aplicações
GLP	Até 40°C	Intermediário na manufatura de petroquímicos, combustíveis industriais ou domésticos, corte de metais, aerossóis.
Nafta ou Gasolina	140 – 220°C	Petroquímica (Nafta Leve), Combustível (Nafta Média e Pesada)
Querosene	150 – 300°C	Abastecimento de aeronaves a jato, instalações de aquecimento de pequeno porte
Óleo Diesel	170 – 370°C	Abastecimento de veículos pesados, instalações de aquecimento de pequeno porte.
Gasóleo	250 – 550°C	Combustível na metalurgia, combustível na indústria leve.
Óleo Combustível	Produto de Fundo	Combustível industrial, combustível para navios, veículo para agrícolas.
Asfalto	Produto de Fundo	Pavimentação, impermeabilização, pinturas.
Coque	Produto de Fundo	Na indústria de alumínio, fabricação de eletrodos, misturado com carvão

Tabela 2.4: Produção das Refinarias Brasileira

Fonte: ANP - Produção Nacional de Derivados de Petróleo, 2011.

Produto	Produção (bpe)
GLP	35.503.408
Nafta ou Gasolina	33.498.314
Querosene	32.282.199
Óleo Diesel	269.812.252
Óleo Combustível	91.809.510
Asfalto	17.264.131
Coque	23.578.194

Legenda: bpe (barris equivalentes de petróleo)

2.4 Terminal de Abastecimento de Campos Elíseos – TECAM

Situado no município de Duque de Caxias, o TECAM tem como principais atividades o recebimento e armazenamento de petróleo e derivados vindos de Angra dos Reis, de Macaé e da Ilha D'Água (Lemmers, P.H., 2011). Atua ainda no abastecimento da Refinaria Gabriel Passos (REGAP), em Minas Gerais.

A Tabela 2.5 apresenta algumas informações complementares referentes ao TECAM.

Tabela 2.5: Informações gerais do TECAM

Fonte: Lemmers, P.H., 2011.

Endereço	Estrada Fabor ORBEL s/nº, Campos Elíseos Duque de Caxias (RJ) CEP: 25225-030 Tel: (21) 3227-6130
Regional	NNESE*
Movimentação em 2008(m ³)	9.843.286
Área do terreno	958.899(m ²)
Área construída	49.362(m ²)
Ano de inauguração	1966
Número de empregados	330 (em maio-2010)

*NNESE: gerência Regional da Transpetro que engloba as regiões: Norte, Nordeste e Sudeste (com exceção do Estado de São Paulo).

O TECAM comporta onze tanques de armazenamento de petróleo e derivados, sendo dez de teto flutuante e um de teto fixo. Conforme informado na Tabela 2.5, sua movimentação anual é de aproximadamente 10.000.000m³. A Figura 2.1 ilustra a disposição espacial dos dez tanques de teto flutuante existentes no terminal.



Figura 2.1: Vista aérea do TECAM

Fonte: Lemmers, P.H., 2011.

A Tabela 2.6 apresenta a capacidade de armazenamento nominal de petróleo e seus derivados por parte do TECAM. Os produtos derivados do petróleo armazenados são: nafta (ou gasolina), óleo diesel, óleo combustível diluente e resíduo. Entende-se como resíduo, especificamente neste caso, qualquer fração líquida de hidrocarboneto que não possa ser comercializada sem antes receber tratamento e/ou processamento em um terminal ou refinaria de petróleo (Lemmers, P.H., 2011). A partir da tabela é possível observar que as operações do terminal concentram-se no armazenamento de petróleo, para o qual se destinam cinco dos onze tanques existentes.

Tabela 2.6: Capacidade Nominal de Armazenamento do TECAM

Fonte: Lemmers, P.H., 2011.

Produto	Quantidade de Tanques	Capacidade Nominal (m³)
Petróleo	5	286.462
Nafta	2	51.556
Óleo Diesel	1	26.037
Óleo Diluente	2	52.289
Resíduo	1	3.360

Conforme mencionando anteriormente, o parque de tancagem do TECAM é constituído por dez tanques de teto flutuante (TQ 1001 a TQ 1010) os quais armazenam petróleo e seus derivados; e um tanque de teto fixo (TQ de *slop*) (Lemmers, P.H., 2011). O tanque de *slop*, ou “tanque de resíduos” tem como finalidade receber resíduos oriundos de diversos pontos e operações do terminal. Por exemplo, de todas as válvulas de alívio existentes na área, assim como dos dispositivos para contenção de vazamentos em parques de bombas ou diques.

A Tabela 2.7 apresenta o volume operacional dos tanques de teto flutuante, variando de pouco menos de 23 mil metros cúbicos até mais de 65 mil metros cúbicos. Estes últimos apresentam diâmetro superior a 80 metros, sendo popularmente denominados “maracanãs”. A tabela apresenta ainda informações de altura máxima, mínima e operacional.

Tabela 2.7: Informações técnicas dos tanques do TECAM

Fonte: Lemmers, P.H., 2011.

TQ	Volume Operacional (m³)	Altura Operacional (mm)	Altura máxima de operação (mm)	Altura Mínima de operação (mm)	Diâmetro (mm)
1001	22 714	11500	12800	1700	54 860
1002	25 789	12800	12800	1800	55 860
1003	25 800	12800	12800	1800	56 860
1004	25 779	12800	12800	1900	54 850
1005	25 779	12800	12800	1900	54 870
1006	25 779	12800	12800	1900	54 870
1007	65 288	12800	12800	1700	54 880
1008	65 357	12800	12800	1700	86 520
1009	64 702	12800	12800	1800	86 540
1010	65 335	12800	12800	1700	86 530

3. TANQUES DE ARMAZENAMENTO

A tancagem de matérias-primas e produtos finais líquidos e gasosos representa etapa fundamental para o correto funcionamento em termos logísticos da indústria química e petroquímica nacional. A tancagem permite atender a sazonalidade do mercado, garantindo abastecimento mesmo em períodos de maior demanda por produtos ou menor oferta de matérias-primas. De acordo com Martins (2004), os tanques possuem a finalidade de estoque de matérias-primas, insumos e produtos. Servem para que as indústrias mantenham estoques estratégicos, garantindo, assim, a continuidade de produção e o fornecimento aos clientes.

Para a tancagem de combustíveis líquidos, três diferentes modelos de tanque se destacam: os de teto flutuante externo e interno, e os de teto fixo. Neste capítulo serão abordados os três tipos, bem como seus principais acessórios e dispositivos de segurança contra incêndio e explosão.

3.1 Definição de tanque de armazenamento

Segundo a Norma ABNT 17505-1 (2006), tanque de armazenamento é “qualquer vaso com uma capacidade líquida superior a 450L destinado à instalação fixa e não utilizado no processamento”. Para Maia, C. et al (2012), “tanques de armazenamento são equipamentos destinados a armazenar fluidos líquidos em pressões próximas à atmosférica”.

3.2 Tipos de Tanques de Armazenamento

Conforme citado, comumente os tanques utilizados para a estocagem de compostos orgânicos líquidos são classificados de acordo com o tipo de cobertura: teto fixo e teto flutuante. Estes por sua vez dividem-se em teto flutuante externo e interno (Martins, D.O. 2004).

3.2.1 Tanques de Teto Flutuante (*Lifting Roll*)

Tanques de teto flutuantes são aqueles cujo teto apoia-se sobre a superfície do líquido, acompanhando o nível do produto contido no seu interior. São comumente usados para armazenamento de produtos mais leves como naftas, gasolina, solventes, entre outros. Este tipo de tanque permite minimizar as perdas por evaporação devido às movimentações do produto (Steinmacher, F.R., 2007).

Conforme citado anteriormente, os tanques de teto flutuante podem ainda ser classificados como:

- Tanque de Teto Flutuante Externo
- Tanque de Teto Flutuante Interno

a) Tanque de Teto Flutuante Externo

Os tanques de teto flutuante externo são equipamentos que consistem de um casco cilíndrico de aço aberto no topo, equipado com um teto livre para flutuar sobre a superfície do líquido estocado. O teto acompanha as alterações de nível no tanque. O teto possui um selo entre o costado e o tanque para garantir seu vedamento (Martins, D.O.,2004).

A Figura 3.1 representa tanques de teto flutuantes externos cujos tetos encontram-se em posições diferentes devido aos diferentes níveis internos do líquido.



Figura 3.1: Tanques de teto flutuante
Fonte: Marco, 2010.

b) Tanque de Teto Flutuante Interno

Existem dois tipos básicos de tanques de teto flutuante interno: os tanques no qual o teto fixo é suportado por colunas verticais dentro do tanque, e os tanques com teto fixo autossuportados, sem coluna interna suporte.

O tanque de teto flutuante interno, como pode ser observado na Figura 3.2, possui um teto flutuante e um teto fixo no topo do costado (Martins, D.O.,2004).

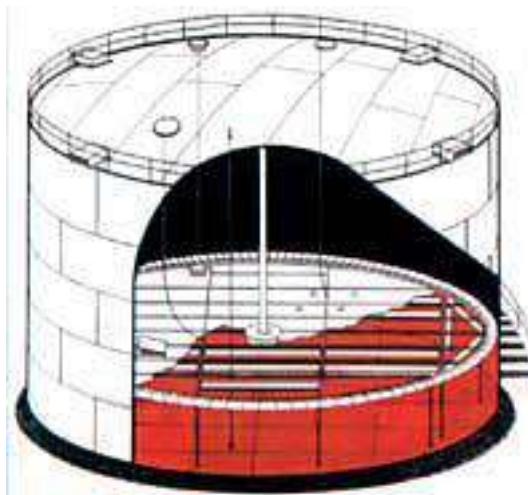


Figura 3.2: Tanque de teto flutuante interno
Fonte: E.W. Brasil Ind. e Com. Ltda.

É interessante ressaltar que, além dos dois tipos de tetos flutuantes citados anteriormente, existe também a solução por Membranas Internas Flutuantes. Estas são construídas com materiais leves, e dispõem de unidade de flutuação independente, garantindo a vedação total do tanque. Segundo seus fabricantes, este sistema reduz significativamente a emissão de vapores e, por isso, os riscos de incêndios.

A Membrana Interna Flutuante é construída de placas de alumínio ligadas por parafusos de aço inoxidável ou de alumínio, e é equipada com um selo de vedação periférico (anel) de Nylon, como por ser observado na Figura 3.3.

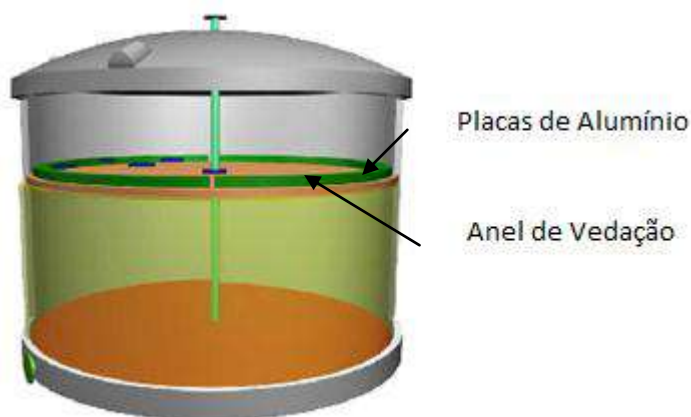


Figura 3.3: Película Flutuante
Fonte: [Emcoike](#), 2012.

A película se completa com portas de visita, que fazem o papel de válvulas de pressão e vácuo na posição de repouso (tanque vazio), pontos de amostragem, cabos anti eletricidade estática, sistema que evita a rotação da película dentro do tanque, e válvulas para alta pressão que evitam danos à película pela entrada de ar ou vapor em alta pressão no tanque. Quando necessário, a

película pode ainda ser adaptada para dispor de medidores de nível automáticos e outros sensores.

3.2.2 Tanques de Teto Fixo (*Fixed Roof*)

Os tanques de tetos fixos, como o mostrado na Figura 3.4, consistem de um corpo cilíndrico com um teto fixo cônico, curvo ou em gomos, contendo um suspiro para a ventilação durante as manobras de carregamento e descarregamento do produto (Martins, D.O., 2004 *apud* Jordan, et al., 1990). Os tanques de teto fixo são utilizados para armazenamento de produtos químicos em diferentes setores da indústria, sendo mais simples de construir. Diferentemente dos tanques de teto flutuante, os de teto fixo tendem a ser empregados para derivados de petróleo mais pesados, tais como asfalto, gasóleo, óleo diesel, etc. Isso ocorre, pois tais produtos apresentam menor perda por evaporação (Petrobras, 2011).

Conforme mencionado anteriormente, o TECAM possui apenas um tanque de teto fixo, sendo este destinado a armazenamento de resíduos.



Figura 3.4: Tanques de teto fixo
Fonte: Arxo, 2012.

3.3 Acessórios de Segurança de Tanques

Incêndios e explosões têm elevado potencial de causar danos às estruturas físicas de uma planta, assim como comprometer a segurança dos trabalhadores e populações vizinhas. Em virtude disso, a instalação de sistemas e/ou equipamentos contra esses eventos é de suma importância.

Nos terminais de tancagem modernos, uma série de equipamentos como válvulas, câmaras de espuma, sistema de inertização, entre outros, trabalham para garantir a segurança das operações realizadas. A seguir serão descritos alguns destes dispositivos.

3.3.1 Tanques de teto fixo

a) Respirador Atmosférico

São aberturas de ventilação, sendo conhecidas também como "vents" ou respiros. Durante o enchimento do tanque, o líquido bombeado vai ocupando o espaço anteriormente vazio. Com isto, os vapores são forçados a sair pelo "vent" para que o líquido possa preencher o tanque sem aumentar a pressão interna do equipamento. Em contra partida, durante a retirada de líquido do tanque, o ar permeia para dentro do tanque, mantendo constante a pressão interna e evitando a formação de vácuo.

Em ambos os casos, enchimento ou esvaziamento, a ausência do "vent" poderia resultar em acidentes. Durante o enchimento, a pressão causada pelos vapores e pelo ar ainda contido no interior do equipamento poderia resultar colapso por sobre-pressão. Por outro lado, na retirada do produto, pressões negativas seriam geradas caso não ocorresse a entrada de ar pelo "vent". Do mesmo modo que a sobre-pressão, a formação do vácuo também pode ocasionar a deformação ou mesmo colapso do tanque. Na figura 3.5, observa-se o efeito da formação de vácuo devido ao bloqueio indevido do "vent".



Figura 3.5 - Colapsado em função do bloqueio do respiro por um plástico.

Fonte: Lemmers,P.H., 2011.

b) Válvulas Pressão e Vácuo

Em tanques de armazenamento de líquidos inflamáveis o uso de "vents" é muitas vezes descartado por questões de segurança. Opta-se então pela instalação de Válvulas de Pressão e Vácuo.

As Válvulas de Pressão e Vácuo possuem uma calibração que permite ajustar um valor exato no qual os vapores serão liberados do interior do tanque, com o objetivo de que a atmosfera do tanque não atinja a zona de inflamabilidade (Lemmers,P.H, 2011).

Estas válvulas operam concomitantemente ao uso de gás inerte. O gás inerte é injetado no tanque de forma a manter a concentração de vapores do líquido inflamável longe das concentrações de risco de explosão. A Figura 3.6 representa uma Válvula de Pressão e Vácuo.



Figura 3.6: Válvula de Pressão e Vácuo
 Fonte: www.protego.com/pt/produtos.

As Válvulas de Pressão e Vácuo são instaladas nos tubos de ventilação de tanques de armazenamento de líquidos inflamáveis.

Como pode ser observado na Figura 3.7, quando a pressão excede o valor pré-ajustado, a porta de exaustão abre, eliminando a pressão positiva através da liberação de vapor para a atmosfera (posição de alívio de pressão). Quando a condição de calibração é alcançada, a porta de exaustão é fechada e vedada. Por outro lado, quando a pressão negativa excede o valor de calibração, a porta de exaustão abre permitindo a entrada de ar atmosférico ou gás inerte (posição de alívio de vácuo) (Catálogo 2012, PROTEGO®, Brasil).



Figura 3.7: Funcionamento de Válvulas de Pressão e Vácuo
 Fonte: Quik-Vent®, 2012.

c) Válvulas Corta Chama

As Válvulas Corta Chama, representada pelas Figuras 3.8 e 3.9, são instaladas unicamente em Tanques de Teto Fixo. Funcionam impedindo que as chamas de um incêndio externo alastrem-se para o interior do tanque (Catalogo ASCA, 2012, Minas Gerais).

Acredita-se que o princípio básico de funcionamento destas válvulas é a dissipação do calor da chama através do contato desta com o “recheio” do corta chama, mostrado na Figura 3.8. A perda de calor por contato com as paredes reduziria a temperatura da chama a tal ponto que a mesma não mais possa se propagar.

Este conceito foi descoberto no processo de mineração. Os mineiros observaram que lanternas protegidas por uma grade metálica com perfurações muito finas não serviam de fonte de ignição para misturas inflamáveis presentes no ambiente.

Alguns estudos recentes mostram que os corta-chama atuam não apenas através da troca térmica, mas também captando íons da reação em cadeia que compõe a chama (DRYSDALE, 2011). Porém, ainda não está clara a contribuição deste efeito na propriedade de bloquear a evolução da chama.

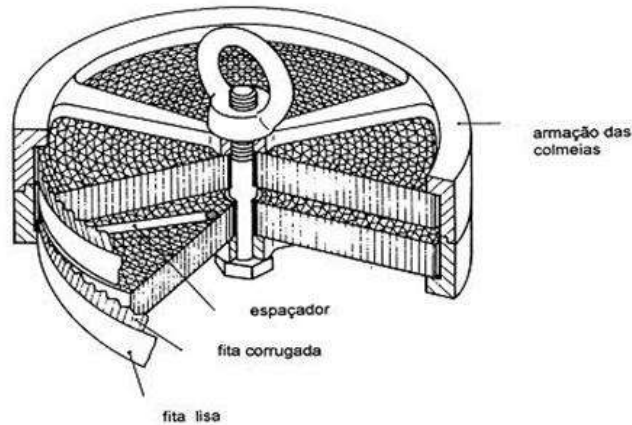


Figura 3.8: Recheio da Válvula Corta Chama
Fonte: Protego, 2012.



Figura 3.9: Válvula de alívio conjugado com corta chama
Fonte: Empresa Valeq Válvulas e Equip. Industriais Ltda.

d) Sistema de Inertização

A inertização de um tanque é o processo de inserção de gás inerte no espaço superior de tanques e reatores. Normalmente esse processo é feito para proteger seu conteúdo contra explosão, degradação ou polimerização devido à presença de oxigênio. A presença de vapores combustíveis e ar atmosférico pode resultar na formação de mistura inflamável dentro do tanque. Adicionalmente, a inertização também ajuda a proteger o equipamento da corrosão. Um sistema de inertização é projetado para operar a pressões mais altas que a atmosférica, evitando então a entrada de ar externo no recipiente.

É importante ressaltar que cada combustível apresenta uma concentração mínima de oxigênio para se inflamar. Deste modo, a concentração de oxigênio segura no interior do tanque varia em função do material armazenado. A concentração mínima necessária para haver ignição de um combustível denomina-se “concentração limite de oxigênio” (LOC), ou “concentração mínima de oxigênio” (MOC). A Tabela 3.1 apresenta valores de MOC para alguns combustíveis.

Tabela 3.1: Concentração mínima de oxigênio

Fonte: Adaptado Crowl, 2011.

Gás ou Vapor	N ₂ /Ar	CO ₂ /Ar	Gás ou vapor	N ₂ /Ar	CO ₂ /Ar
Metano	12	14,5	Querosene	10 (150°C)	13 (150°C)
Etano	11	13,5	Gás natural	12	14,5
Propano	11,5	14,5	Tricloroetileno	13	-
n-Butano	12	14,5	Acetona	11,5	14
Isobutano	12	15	Monóxido de Carbono	5,5	5,5
n-Pentano	12	14,5	Etanol	10,5	13
Etileno	10	11,5	Hidrogênio	5	5,2
Benzeno	11,4	14	Metanol	10	12

Por razões econômicas, o tipo mais comum de gás inerte usado é o nitrogênio.

Em uma configuração tradicional, o sistema de inertização consiste em: uma válvula ou regulador de inertização que permite a entrada do gás inerte no tanque sempre que necessário; uma válvula de respiro ou de recuperação de vapor para permitir que o gás escape do tanque; uma válvula de pressão de segurança/alívio de vácuo para evitar o excesso de pressão ou vácuo no tanque; tubulação e o suprimento de gás inerte.

A válvula de respiro se abre quando a pressão aumenta, deixando o gás de inertização e os vapores saírem do tanque. Por outro lado, quando o produto líquido é bombeado para fora do tanque ou quando a temperatura diminui, a pressão interna cai, e o regulador de inertização abre-se e preenche o espaço superior do tanque com nitrogênio, evitando a pressão negativa.

e) Câmara de espuma

O sistema de espuma difere dos equipamentos anteriores por ser usado não para prevenir acidentes e sim para apagar um incêndio já iniciado.

A espuma é definida como um sistema físico-químico composto por água, ar ou CO₂ e agente formador de espuma – também denominado LGE (líquido gerador de espuma).

A principal característica da espuma é possuir baixa densidade e, dessa maneira, flutuar sobre o líquido inflamável, agindo principalmente por abafamento, e menos por resfriamento. Alguns LGEs são ainda capazes de promover inibição da reação em cadeia.

A câmara de espuma, quando disponível, é instalada sobre o tanque de armazenamento de líquido inflamável, exatamente sob a junção do teto, como pode ser observado na Figura 3.10. Este sistema fixo permite que a solução seja bombeada para a câmara a partir de um ponto fora da área de risco. Após penetrar na câmara, a mistura é expandida através do proporcionador, permitindo a entrada de ar. Em seguida a mistura é descarregada contra um defletor no interior do tanque de armazenamento. O defletor direciona a espuma contra a parede interna do tanque de

armazenamento. Isto reduz a submersão da espuma e a agitação da superfície do combustível (Chemguard,2012).



Figura 3.10: Sistema de Espuma
Fonte: Petroflex,2012.

O líquido Gerador de Espuma (LGE) pode ser entendido como um detergente líquido e concentrado, especialmente formulado para, em mistura com a água pura, do mar ou salobra, formar uma espuma com características físico-químicas especiais, tais como resistência ao contato com produtos químicos e a temperatura elevadas.

Os LGEs formadores de espuma mecânica de baixa expansão classificam-se em três grandes famílias, descritas a seguir.

Os LGEs Proteínicos foram desenvolvidos a partir de proteína animal e possuíam baixa estabilidade de estoque, por este motivo foram sendo substituídos pelos LGEs Fluoroproteínicos. Estes são misturas de proteína animal e compostos fluorados. A nova formulação garantiu uma melhora na qualidade na espuma formada, além do concentrado possuir melhor estabilidade no período de estocagem. A espuma passou a apresentar ainda melhor fluidez e resistência térmica.

Finalmente, os LGEs Sintéticos-Fluorados são a geração mais recente do desenvolvimento dos LGEs, sendo totalmente sintéticos. As principais características destes, em relação aos anteriores, são uma maior estabilidade do concentrado em estoque, maior fluidez da espuma na superfície do líquido em chamas, possibilidade de uso com água doce do mar e salobra, uso conjunto com outros agentes extintores (em especial o pó químico seco) e rápida aplicação sobre as chamas (Bombeiros, 2012).

O uso mais importante da espuma é no combate a incêndios em líquidos derivados do petróleo, como, por exemplo, a gasolina. Esta possui altas pressões de vapor e baixo ponto de fulgor. A espuma é o único agente extintor permanente usado para incêndios deste tipo e sua aplicação suave sobre as superfícies inflamadas permite se extinguirem as chamas progressivamente, consolidando seu progresso até a extinção completa.

A espuma pode ser também usada para cobrir áreas expostas com inflamáveis e prevenir, assim, o desprendimento de vapores que poderiam incendiar-se. Os riscos de incêndios em derramamentos são assim rapidamente controlados, mediante a aplicação da espuma.

Embora com amplo espectro de atuação, a espuma não é considerada agente adequado para incêndios que envolvam gases ou gases liquefeitos. Outra restrição é quanto a sua aplicação em recipientes contendo produtos quentes, cuja temperatura esta acima do ponto de ebulição da água, seja por circunstâncias normais, ou devido à exposição ao fogo. Finalmente, deve-se considerar o tamanho dos tanques ao decidir-se em relação ao uso de espuma para combate a incêndios. Sabe-se que a espuma deve ser aplicada de maneira a cobrir toda a superfície do líquido em chamas. Para tanques com grande diâmetro a espuma pode não ter total eficácia.

f) Bocas de visita

Bocas de visita são aberturas no costado e no teto dos tanques de teto fixo ou flutuante. São usados para a inspeção, manutenção e serviços de limpeza como o que pode ser observado na Figura 3.11. Ventilação e iluminação dos tanques também são funções da boca de visita.

De acordo com a Norma ABNT 7821 (1983), Anexo D, não existe um número padrão de bocais e acessórios nos tanques de armazenamento. Esse número depende do tipo de tanque, da sua localização e da necessidade interna de cada refinaria e terminal.



Figura 3.11: Boca de visita aberta para a manutenção do tanque
Fonte: Tecmesul, 2012.

g) Escadas

De acordo com a Norma N-270 (2010) da Petrobrás, todos os tanques devem ter a sua própria escada de acesso (escada helicoidal junto ao costado) com corrimão, como pode ser observado na Figura 3.12. A Norma ressalta que, mesmo quando interligado a outros tanques vizinhos por passadiços, a escada é necessária.

No caso dos tanques de teto fixo, a escada deve ser apoiada diretamente no último anel do costado. Ao lado das plataformas de topo, devem ser instalados guarda-corpos na periferia do teto, de cada lado da plataforma, com 3 m de comprimento.



Figura 3.12: Escada helicoidal
Fonte: Dreams Time, 2011.

3.3.2 Tanques de teto flutuante

a) Sistema de Espuma

Tanto para tanques de teto fixo como para tanques de teto flutuantes são empregados os sistemas de espuma. Porém, de acordo com a Norma ABNT NBR 17505-7 (2006), os tanques de teto flutuante poderão ser protegidos apenas por aplicadores manuais de espuma sendo, portanto, dispensados do sistema fixo.

b) Válvula Quebra - Vácuo

De acordo com o anexo D da Norma ABNT 7821 (1983), é obrigatório o uso de respiros adequados com o objetivo de evitar a formação de vácuo no tanque quando este é esvaziado. A válvula abre-se antes que o teto atinja a posição de repouso, permitindo que o ar permeie para o interior do tanque, igualando as pressões internas e externas e evitando a formação de vácuo. (Lemmers,P.H, 2011)

A Figura 3.13 apresenta uma Válvula Quebra Vácuo.



Figura 3.13: Válvula quebra vácuo
Fonte: Factoptum - Válvulas Quebra Vácuo, 2012.

c) Dreno de Teto

Ainda de acordo com o anexo D da Norma 7821, os tanques de teto flutuante devem ser compostos por drenos do tipo sanfonados de mangueira ou tubulação metálica articulada, que possuem o objetivo de drenar águas pluviais do teto do tanque, como mostrado na Figura 3.14.

Quando o tanque não possui recurso para evitar a formação de depressões nas chapas, deve-se, obrigatoriamente, fazer uso de um dreno para águas pluviais.

Todos os tanques devem possuir ainda dreno de emergência, descarregando as águas pluviais no interior dos tanques caso os drenos principais estejam obstruídos. Este sistema pode ser operado automaticamente (tanques de teto simples), ou manualmente (tanques de teto duplo). No caso dos tanques de teto duplo, estes deverão possuir drenos de emergência construídos de tal forma que impeçam a passagem do líquido estocado para a face superior do teto.

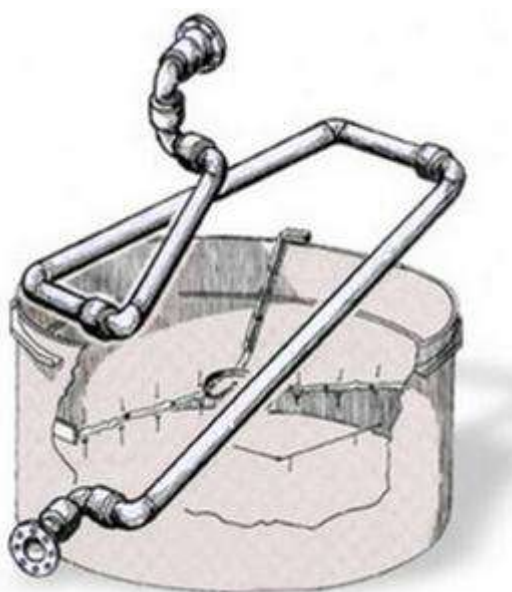


Figura 3.14: Esquema de dreno de teto
Fonte: J. de Jonge, 2012.

d) Bocas de visita

A Norma NBR 7821 obriga a instalação de uma boca de visita no tanque de teto flutuante. Esta pode estar localizada no teto ou no costado.

e) Anéis de Contraventamento

Os Anéis de Contraventamento são determinados, pela Norma NBR 7821, como meio de garantia da estabilidade, contra a pressão do vento, do costado do tanque de teto aberto.

Tanques sujeitos a rajadas forte de vento mantêm sua estrutura circular pelo aumento da resistência devido ao uso de Anéis de Contraventamento (Figura 3.15).



Figura 3.15: Escada e anel de contraventamento TQ 1007
Fonte: Lemmers,P.H, 2011.

f) Escadas

Os tanques de teto flutuantes são providos de escada que se ajusta a qualquer posição do teto, adaptando-se a qualquer posição do teto. Devem possuir corrimão em ambos os lados. A escada é projetada para o volume máximo de operação e suportar uma carga de 450kgf no meio do vão (NBR 7821 – Anexo D).

4. Históricos de Acidentes Industriais

Um acidente industrial pode provocar danos não só para a empresa, mas como para o seu entorno. Por exemplo, a liberação de vapores tóxicos pode afetar comunidades próximas, e incêndios e explosões terão repercussão dentro e fora da empresa. Estes cenários podem gerar grandes perdas materiais, ambientais e humanas, configurando assim os chamados “acidentes ampliados”.

Definem-se acidentes ampliados como sendo:

“...eventos agudos, como explosões, incêndios e emissões nas atividades de produção, isolados ou combinados, envolvendo uma ou mais substâncias perigosas com o potencial para causar simultaneamente múltiplos danos sociais, ambientais e à saúde física e mental dos seres humanos expostos” (Araújo, A.J.S. apud Freistas et al, 2000).

O estudo do histórico de acidentes torna-se importante para na identificação dos riscos, compreensão da dinâmica dos eventos e prevenção de acidentes futuros (Directiva Seveso 82/501 CEE).

4.1 Principais Acidentes

De modo a ilustrar a importância da segurança de processos em plantas químicas e petroquímicas, apresentam-se a seguir alguns acidentes industriais de elevada relevância e repercussão, que ocorreram ao longo da história.

4.1.2 Feyzin - 1966

A refinaria de Feyzin, localizada a 10 km ao sul de Lyon, na França, empregava, em 1966, 250 funcionários. Sua capacidade de processamento era de cerca de dois milhões de toneladas de petróleo bruto por ano (Lione, S.D. et al,2011).

Entre outros equipamentos, a refinaria possuía quatro esferas para tancagem de propano, quatro esferas para tancagem de butano, dois vasos utilizados para propano e butano e dez tanques de teto flutuantes utilizados para o armazenamento de gasolina e querosene.

As esferas de armazenamento de GLP estavam a aproximadamente 450m de distância da unidade mais próxima de refino, e a cerca de 300m das casas da cidade de Feyzin. A menor distância entre uma esfera de GLP e a autoestrada era de apenas 42m, e o espaçamento entre as esferas variava entre 11m e apenas 0,44m (Lione, S.D. et al,2011).

Em 04 de janeiro de 1966, um incêndio ocorreu na refinaria devido a um vazamento de GLP. O vazamento ocorreu quando um operador estava realizando um procedimento de drenagem de uma esfera de propano.

Esferas de gás muitas vezes operam em elevada pressão, mantendo-o liquefeito. Na pressão de trabalho, a água presente na mistura gasosa inicialmente enviada para os tanques se condensa, acumulando-se no fundo. A drenagem dessa água é etapa obrigatória para que o gás possa ser empregado.

O procedimento adotado consistia, resumidamente, em utilizar uma chave de válvula na operação das válvulas localizadas na descarga da esfera, abrir totalmente a válvula superior mais próxima à esfera, ajustar a vazão de descarga operando a válvula inferior de 2" (para drenagem) ou a válvula de 3/4" (para amostragem). A Figura 4.1 ilustra as instruções de operação (Renau, J.M.).

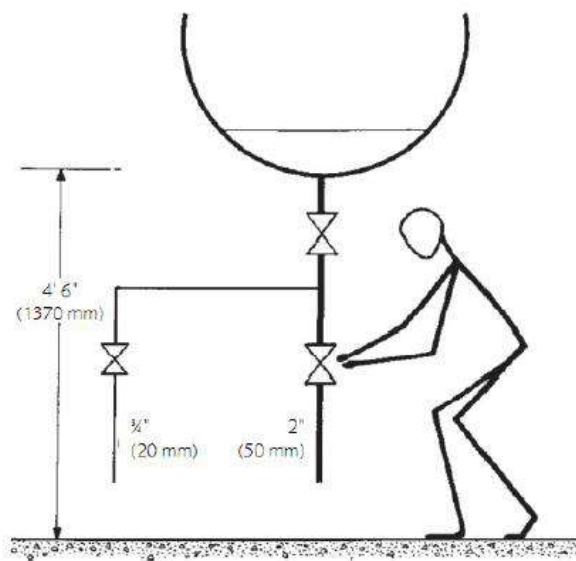


Figura 4.1: Procedimento de amostragem e drenagem
Fonte: Lione, S.D. *et al*, 2011.

Devido a uma obstrução inicialmente observada na válvula de drenagem, houve uma liberação violenta na sequência, resultando em um jato muito forte de propano que espirrou sobre o operador. O funcionário foi arremessado para trás, arrancando acidentalmente parte da chave que era usada para manusear a válvula. A partir deste momento o operador não mais conseguiu fechar a válvula (Renau, J.M.).

A nuvem de vapor de propano formada propagou-se até ser inflamada por um carro em uma estrada secundária. O incêndio em nuvem serviu de ignição para a poça de propano formada na base da esfera. O equipamento ficou então envolto por chamas, como mostrado na Figura 4.2 (Renau, J.M.).

A esfera foi aquecida por longo período, gerando um BLEVE (explosão de vapor de líquido em ebulição). Este resultou em uma bola de fogo que matou e feriu bombeiros e civis. Projéteis dessa esfera danificaram os suportes de uma segunda esfera que, mais tarde, também provocou um segundo BLEVE, iniciando a sequência de explosões. Uma série de tanques de óleo diesel e petróleo bruto também pegaram fogo. O desastre levou 48 horas para ser controlado (Lione, S.D. *et al*, 2011).

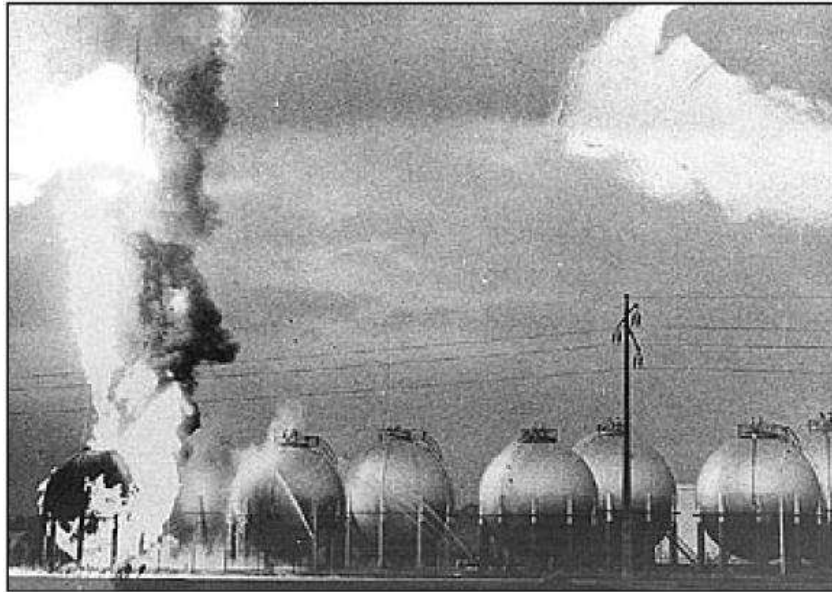


Figura 4.2: Esfera em chamas
Fonte: Lione, S.D. *et al*, 2011.

4.1.1 REDUC (Brasil - 1972)

Em 1972, um acidente de grandes proporções foi registrado na Refinaria de Duque de Caxias (REDUC), localizada no Rio de Janeiro.

O acidente ocorreu no Parque de Esferas da refinaria, responsável pelo armazenamento de GLP. Do mesmo modo que o evento na França, o acidente também foi iniciado durante o procedimento de drenagem. Em 1972 a drenagem era realizada por uma válvula de abertura manual localizada na parte inferior do tanque. A rotina de drenagem adotada na época era bastante simples, porém apresentava pontos passíveis de falha, como ficou claro.

O funcionário encarregado da drenagem inicialmente conectava uma das extremidades da mangueira de drenagem na linha, enquanto a outra extremidade era posicionada em uma vala para recolhimento da água. A seguir, a válvula de drenagem era aberta, iniciando a retirada da água. A válvula permanecia aberta até que toda a água fosse drenada, porém deveria ser fechada antes que o GLP começasse a vazar. O correto fechamento da válvula evitaria a saída de GLP. O funcionário deveria permanecer no local durante todo o procedimento.

No acidente de 30 de março de 1972, o operador abriu a válvula de uma das três esferas de Gás Liquefeito de Petróleo e, por alguma razão, se ausentou. Quando toda a água foi drenada o funcionário não se encontrava no local para fechar a válvula, de modo que GLP começou a vazar. No momento em que o operador retornou ao seu posto, não conseguiu realizar o fechamento da válvula, pois a mesma havia congelado. Gases liquefeitos quando sofrem rápida descompressão, como na liberação atmosférica, removem grande quantidade de calor do meio para sua mudança de fase. Esse fenômeno provoca o rápido congelamento de todos os equipamentos próximos.

Uma vez que o vazamento de GLP não pôde ser interrompido, uma grande e densa nuvem de gás foi rapidamente formada próxima ao chão. Na sequência, a mesma sofreu ignição, dando início a um

incêndio nas proximidades da esfera. O incêndio na saída de gás da esfera não pode ser controlado, com os recursos disponíveis na época era impossível interromper a saída do combustível.

Com o incêndio se prolongando por horas, a temperatura no ponto de vazamento superou mil graus Celsius (Costa, P., 2011). A medida que o vazamento continuava, a esfera que estava sendo drenada passou a apresentar cada vez menos carga. Isso, somado a elevada temperatura exterior, acabou por resultar em um fenômeno conhecido como BLEVE, até então pouco estudado.

O BLEVE, ou explosão da primeira esfera, resultou na explosão dos demais tanques na sequência.

Em resultado das explosões, as proporções dos estragos foram enormes. Além da completa destruição do parque de esferas, como pode ser observado nas Figuras 4.3 e 4.4, inúmeras tubulações ficaram retorcidas, carros que estavam no estacionamento foram totalmente queimados, pequenas construções dentro da refinaria foram reduzidas a escombros, várias árvores derrubadas, etc (Costa, P., 2011).

Em termos de vítimas, no dia 01 de abril de 1972, 48 funcionários estavam internados. (Costa, P., 2011). O elevado número de vítimas deste acidente se deveu a alguns fatores particulares.

Primeiramente, o incêndio se prolongou durante várias horas, envolvendo inclusive a troca de turno da Refinaria. Os brigadistas do turno seguinte se juntaram ao do anterior, que continuaram trabalhando. Também se juntaram ao combate os empregados da FABOR, que colaboravam na tentativa de resolver o problema. Na sequência, a pouca compreensão sobre o fenômeno de BLEVE fez com que a real dimensão do problema não fosse compreendida. Atualmente, vários protocolos de emergência sugerem que, em cenários semelhantes, seria mais adequado abandonar a área do que insistir em manter equipes de combate no local.



Figura 4.3: Esferas de GLP após o acidente
Fonte: Puiatti, R. 2011.



Figura 4.4: Parte superior de um tanque de GLP encontrada a um quilometro do local

Fonte: Puiatti,R., 2011.

Atualmente, a remoção da água condensada nas esferas ainda é uma tarefa que precisa ser realizada, porém, por questões de segurança, algumas medidas foram empregadas. Entre elas pode-se citar o piso sob as esferas, que agora é cimentado e possui inclinação para evitar o acúmulo de combustível (poça) embaixo do equipamento. O acúmulo poderia provocar um incêndio em poça que aqueceria demasiadamente a esfera (Lione, S.D. *et al*,2011).

A tubulação imediatamente na descarga da esfera também foi modificada, e agora apresenta duas válvulas. Após estas, existe um acumulador onde a tubulação se divide: o trecho que deriva da parte superior do acumulador é usado para o escoamento de GLP e possui uma válvula de retenção; enquanto que o trecho que deriva da parte de baixo é utilizado para a drenagem de água e apresenta duas válvulas, sistema conhecido como duplo bloqueio (Lione, S.D. *et al*,2011).

Adicionalmente, o acionamento da válvula imediatamente na saída da esfera passou a ser remoto (feito a partir da sala de controle), tornando-se assim mais ágil. O afastamento físico entre o ponto de drenagem e esta válvula, obtido com as modificações na tubulação, visa evitar que, mesmo que uma das válvulas de bloqueio congele, a válvula de acionamento remoto ainda possa ser fechada. A válvula também conta com um fusível termo-sensível, que fecha caso a temperatura externa aumente (Lione, S.D. *et al*,2011).

Passou-se a utilizar, também, uma bomba para injeção de água na tubulação que, normalmente, serve para retirar o GLP da esfera. Assim, em caso de incêndio, é possível injetar água no interior da esfera através dessa tubulação. A esfera conta também com aspersão de água através de sistema de dilúvio, que em alguns casos poderia evitar o superaquecimento do casco e o seu rompimento (Lione, S.D. *et al*,2011).

Observa-se que o processo de drenagem da água acumulada nos tanques de armazenamento de GLP foi responsável por dois acidentes ampliados em um curto intervalo de tempo. Em ambos os casos, a ignição de uma nuvem de GLP desencadeou um incêndio e, por sua vez, este resultou em um BLEVE.

O acidente na Refinaria de Duque de Caxias poderia ter sido evitado se houvesse sido realizado um estudo detalhado das causas que levaram ao acidente de Feyzin, e desta forma, promover mudanças tanto na forma de operar a drenagem da água dos tanques de GLP quanto no combate ao incêndio.

4.1.3 México (1984)

Em San Juanico, no México, um acidente causado por uma série de explosões em esferas de armazenamento de Gás de Petróleo Liquefeito ocorreu em 1984, na base de armazenamento da PEMEX (Florido, J.A.A.).

O evento que deflagrou o acidente foi a ruptura de uma tubulação de 20 cm de diâmetro, que transportava GLP das refinarias para a instalação de armazenamento. Essa tubulação se localizava próxima ao parques de esferas.

A ruptura ocorreu provavelmente devido ao enchimento excessivo dos tanques e da sobrepressão na linha de transporte por retorno. Não se encontrou a causa para o mau funcionamento das válvulas de alívio dos tanques no momento em que eles começaram a ter seu nível aumentado de forma perigosa.

O vazamento de GLP continuou por cerca de 5 a 10 minutos provocando a formação de uma grande nuvem de vapor inflamável que entrou em ignição a uma distância de 100m do ponto de fuga. Neste caso, a fonte de ignição direta foi o “flare” instalado inadequadamente ao nível do solo, pois no entendimento da empresa, dado a força dos ventos no local, a instalação do mesmo a uma altura mais elevada comprometeria a sua eficiência (Florido, J.A.A.).

O incêndio da nuvem de vapor gerou um incêndio de grandes proporções que atingiu primeiramente 10 habitações. Pouco mais de dez minutos depois, uma das esferas menores explodiu, gerando uma bola de fogo de aproximadamente 300m de diâmetro. Na sequência, outras quatro esferas e quinze cilindros provocaram BLEVEs sucessivos por cerca de uma hora e meia. Todas as explosões chegaram a ser registradas pelo sismógrafo da Universidade da Cidade do México (Lione, S.D. *et al*,2011).

O relatório oficial avaliou os danos e concluiu que os estragos por ondas de pressão não foram muito graves, e que os danos da explosão da nuvem de gás não foram a principal causa dos estragos mais severos, mas sim os BLEVEs observados.

Apenas quatro dos cinquenta e quatro depósitos originais da planta permaneceram íntegros. Registra-se que um dos cilindros foi lançado a quase 1.200m de distância e outros 11 foram deslocados mais de 100m. A área ficou completamente destruída, como pode ser observado na Figura 4.5. Fragmentos dos 4 tanques esféricos menores foram lançados a mais de 400m de distância (Lione, S.D. *et al*,2011).



Figura 4.5: Destruição da planta da PEMEX
Fonte: Zonno, I.V., 2003.

Os danos aos edifícios que se localizavam no exterior do terminal foram de grandes proporções, e praticamente todas as construções em um raio de 300m foram totalmente destruídas. Muitas pessoas sofreram queimaduras graves por gotas incandescentes de GLP que caíram sobre a cidade. Como saldo final, mais de 500 pessoas morreram e mais de 7.000 sofreram ferimentos. Esse acidente foi um dos mais mortais desastres industriais da história mundial.

Destaca-se que a planta não apresentava sistemas de detecção de gás, o que poderia ter limitado as dimensões do desastre. O terminal de armazenamento carecia, também, de planejamento em caso de emergência, além de estar localizado muito próximo de residências e lojas comerciais.

Um agravante significativo para o desastre foi o caos gerado pelo trânsito de veículos durante a evacuação, que impediu o acesso correto à área pelas equipes de resgate de emergência.

Ficou claro que a destruição total das instalações ocorreu devido a falhas nos sistemas de proteção dos depósitos, incluindo a instalação de sistemas de isolamento de emergência e cortinas de água de resfriamento. Os suportes das esferas e cilindros não eram termicamente protegidos contra fogo.

Em virtude do grande número de mortos e feridos nas proximidades da instalação de armazenamento, passou a existir uma preocupação maior com relação à localização de instalações que apresentem riscos de acidentes graves. O número de habitações nos arredores da planta de San Juanico cresceu sem controle por anos antes do acidente.

4.1.4 Venezuela (2012)

Os casos estudados anteriormente abordavam acidentes em tanques de armazenamento de GLP. Embora historicamente o armazenamento de gases esteja mais propenso a gerar grandes acidentes, não se pode excluir o perigo do armazenamento de líquidos inflamáveis e combustíveis.

Incêndios em tanques de armazenamento de líquidos também promovem acidentes ampliados, como no mais recente caso ocorrido na Refinaria de Amuay, na Venezuela.

Na madrugada do dia 25 de agosto de 2012, a Refinaria de Amuay, no norte da Venezuela, sofreu um enorme incêndio que teria sido iniciado por vazamento de gás em um parque de tancagem. Devido às condições climáticas da região no dia do acidente, o gás teria se acumulado e gerado a explosão. Pelo menos nove tanques de armazenamentos de líquidos combustíveis foram afetados, tendo seu conteúdo totalmente incendiado. A Figura 4.6 mostra um dos nove tanques incendiados. Observa-se ainda o enorme dano estrutural sofrido pelos tanques.



Figura 4.6: Terceiro tanque incendiado
Fonte: O Globo, 2012.

Apenas três dias após iniciado, o incêndio na refinaria foi totalmente extinto. O número de vítimas fatal foi de aproximadamente 41 pessoas, dentre estes pelo menos 20 militares da Guarda Nacional Bolivariana (GNB), responsáveis pela segurança patrimonial da refinaria. O acidente deixou ainda cerca de 80 feridos.

Destaca-se que a refinaria estava localizada em uma zona residencial e comercial. Grande parte do seu perímetro atualmente é habitada por pessoas de baixa renda, como pode ser observado na Figura 4.7. Cerca de 520 moradias teriam sido afetadas.

Até o momento não existem informações detalhadas do acidente, porém o governo venezuelano prometeu uma investigação “rápida e eficaz” sobre o ocorrido.



Figura 4.7: População vizinha a Refinaria Amuay
Fonte: Correio Brasiliense, 2012.

5. Manual de Análise de Risco da CETESB

Este capítulo descreve a norma P4.261 da CETESB, emitida em Dezembro de 2011 (2ª ed). A norma é referente à análise de riscos de acidentes de origem tecnológica, incluindo cenários envolvendo incêndios – foco deste estudo.

A partir da análise proposta na Norma é possível caracterizar o risco imposto pelo empreendimento à população externa, seja na forma de “risco individual” ou “risco social”. O órgão ambiental visa, a partir da análise, avaliar se o risco é tolerável ou não, e assim otimizar a adoção de medidas de gerenciamento eventualmente necessárias.

5.1 A Norma

A Norma em questão é composta por quatro partes, onde a primeira prescreve o método de tomada de decisão quanto à necessidade ou não de apresentação de documentos como “estudo de análise de risco” e “programa de gerenciamento de risco”. As partes II e III apresentam os termos de referência para a elaboração das análises para empreendimentos pontuais e dutos, respectivamente. A Norma apresenta ainda critérios de tolerabilidade, com os quais o risco estimado será avaliado – possibilitando-se assim definir se o risco é ou não tolerável. Finalmente, a parte IV traz o termo de referência para a elaboração de programa de gerenciamento de risco.

A Norma aplica-se a empreendimentos que manipulem (produzam, armazenem ou transportem) substâncias inflamáveis e/ou tóxicas, nos estados líquidos ou gasosos, incluindo petróleo e seus derivados.

5.2 Desenvolvimento do método para empreendimentos pontuais

A Norma contempla o método para tomada de decisão quanto à necessidade de apresentação de “Estudo de Análise de Risco” (EAR) ou de “Programa de Gerenciamento de Risco” (PGR). A decisão é embasada na periculosidade das substâncias empregadas e na quantidade de inventário mantido. A CETESB considera ainda a vulnerabilidade do entorno do empreendimento objeto de estudo.

Define-se “Estudo de Análise de Risco” como sendo um estudo quantitativo de risco de uma instalação industrial, baseado em técnicas de identificação de perigos e estimativa de frequências e severidades. Conforme mencionado, considera ainda a vulnerabilidade da população próxima na estimativa do risco.

Por sua vez, define-se “Programa de Gerenciamento de Risco” como um documento que aponta políticas e diretrizes de um sistema de gestão, com vista à prevenção de acidentes em instalações ou atividades potencialmente perigosas.

Desse modo, o risco de um empreendimento para a comunidade, meio ambiente, circunvizinhos e externos aos limites da empresa, está diretamente associado às características das substâncias

químicas manipuladas, suas quantidades armazenadas (inventário) e à vulnerabilidade da região onde está ou será localizado.

5.2.1 Classificação das substâncias químicas quanto à periculosidade

A primeira etapa para a elaboração dos documentos pedidos na Norma consiste em selecionar as substâncias líquidas ou gasosas que, de acordo com a sua periculosidade intrínseca em relação à toxicidade e à inflamabilidade, apresentam potencial para causar danos ao ser humano e/ou ao meio ambiente.

A Tabela 5.1 apresenta a classificação das substâncias de acordo com seu ponto de fulgor, indicando sua classe de inflamabilidade.

Tabela 5.1: Nível de Inflamabilidade
Fonte: Manual de análise de risco da CETESB.

Nível de Inflamabilidade	Ponto de Fulgor (PF) ou Ponto de Ebulição (PE) °C
4 - Gás ou líquido altamente inflamável	PF ≤ 37,8 e PE ≤ 37,8
3 - Líquido facilmente inflamável	PF ≤ 37,8 e PE > 37,8
2 - Líquido inflamável	37,8 < PF ≤ 60
1 - Líquido pouco inflamável	PF > 60

Para efeito da Norma são substâncias de interesse aquelas do nível 4 (líquidas ou gasosas altamente inflamáveis) e do nível 3 (somente líquidas facilmente inflamáveis), consideradas substâncias inflamáveis perigosas. Também são consideradas aquelas substâncias que puderem apresentar estas características em função das condições de armazenamento ou de processo, tais como elevações de temperatura.

Aqui cabe ressaltar que a Norma não emprega a nomenclatura de “líquido combustível” e “líquido inflamável”, comum em normas internacionais.¹

Por outro lado, a classificação das substâncias em função da toxicidade leva em consideração a concentração letal para 50% da população de cobaias (CL₅₀), considerando exposição por via respiratória. Aplica-se para substâncias que possuem pressão de vapor (P_{vap}) igual ou superior a 10 mmHg a 25°C. A Tabela 5.2 ilustra essa classificação.

Tabela 5.2: Nível de Toxicidade
Fonte: Manual de análise de risco da CETESB.

Nível de Toxicidade	C (ppmv.h)
4 - Muito tóxica	C ≤ 500
3 - Tóxica	500 < C ≤ 5000
2 - Pouco tóxica	5000 < C ≤ 50000
1 - Praticamente não tóxica	50000 < C ≤ 150000

C = concentração letal 50 (CL₅₀) em ppmv multiplicada pelo tempo de exposição em horas.

¹ Define-se como "líquido combustível" como todo aquele que possua ponto de fulgor igual ou superior a 70°C (setenta graus centígrados) e inferior a 93,3°C (noventa e três graus e três décimos de graus centígrados). Define-se "líquido inflamável" como todo aquele que possua ponto de fulgor inferior a 70°C (setenta graus centígrados) e pressão de vapor que não exceda 2,8 kg/cm² absoluta a 37,7°C. (Fonte: NR 20, acessado em 9 de fevereiro de 2013)

Para efeito desta Norma, as substâncias de interesse são as classificadas nos níveis de toxicidade 3 e 4, consideradas como gases e líquidos tóxicos perigosos. Deve-se ressaltar que esta classificação se aplica às substâncias tóxicas que possuem pressão de vapor igual ou superior a 10 mmHg a 25 °C e 1 atm, e também àquelas cuja pressão de vapor puder se tornar igual ou superior a 10mmHg em função das condições de armazenamento ou processo.

5.2.2 Tomada de decisão quanto à necessidade de EAR ou PGR

A aplicação da metodologia descrita na Norma consiste em classificar as substâncias presentes no empreendimento em análise, relacionando ainda as capacidades dos recipientes de armazenamento. A partir destas informações e do uso de modelos fenomenológicos específicos, é possível calcular as “distâncias de referência” (d_r). Compreende-se como distância de referência a distância além da qual não se esperam danos significativos ao homem decorrentes de cenários acidentais associados as substâncias relacionadas.

Uma vez obtidas a distância de referência (d_r) descrita acima, e a distância à população de interesse (d_p), deve-se compará-las. Quando houver a presença de população de interesse dentro dos limites determinados pela distância de referência (d_r) e o número de pessoas (N_p) for maior que 26 pessoas, deve-se realizar “Estudo de Análise de Risco” (EAR) e “Programa de Gerenciamento de Risco” (PGR). Caso contrário, isto é, quando a distância à população de interesse (d_p) for maior que a distância de referência (d_r), o que corresponde à ausência de população nos limites determinados por d_r , ou $N_p \leq 25$ pessoas dentro do círculo de raio d_r , a firma fica dispensada da elaboração do EAR, devendo apresentar o PGR.

A Tabela 5.3 apresenta resumidamente os critérios para determinação de elaboração dos documentos:

Tabela 5.3: Critério para decisão de elaboração da documentação

Fonte: Manual de análise de risco da CETESB.

Distâncias	Número de Pessoas	Documentos
$d_p \leq d_r$	$N_p \geq 26$	EAR e PGR
$d_p \leq d_r$	$N_p \leq 25$	PGR
$d_p > d_r$	-	PGR

5.3 Termo de Referência para a Elaboração de Estudo de Análise de Risco para Empreendimentos Pontuais

Esta parte da Norma tem como objetivo fornecer as diretrizes básicas para a elaboração do “Estudo de Análise de Risco” (EAR) em atividades industriais, e apresentar a visão da CETESB no tocante à interpretação e avaliação do cenário encontrando.

É importante ressaltar que a Norma se aplica à avaliação do risco à população externa ao empreendimento. Pessoas ou agrupamento de pessoas presentes em residências, escolas, hospitais,

estabelecimentos comerciais ou industriais, vias com circulação de veículos como rodovias, avenidas e ruas movimentadas, entre outros, localizados no entorno do empreendimento. A Norma não contempla o risco à saúde e segurança dos trabalhadores da própria empresa, ou danos aos bens patrimoniais das instalações analisadas. A lógica para a estruturação do EAR é descrita nos itens a seguir.

5.3.1 Caracterização do empreendimento e do seu entorno

Apresenta os dados relacionados ao empreendimento. Deve conter, no mínimo, as seguintes informações.

a) Identificação do empreendimento:

b) Substâncias químicas:

Listagem de todas as substâncias, inclusive intermediários em reações, que apresentam potencial para causar danos ao ser humano e/ou ao meio ambiente quando consideradas as características relacionadas com inflamabilidade, reatividade, toxicidade e corrosividade, entre outros;

c) Instalações e processos:

Devem-se descrever as características físicas das instalações que processam, armazenam ou manuseiam substâncias perigosas. Descrever também as principais atividades e processos realizados no empreendimento. O armazenamento de insumos, matérias-primas, produtos intermediários e produtos finais também deve ser detalhado, incluindo operações de carga e descarga. Finalmente, devem ser detalhados os sistemas instrumentados de proteção presentes em cada área/setor/processo.

Os documentos devem conter informações gerais: diagramas de blocos, fluxogramas de processo, balanços de massa e de energia e os limites superiores e inferiores de temperatura, pressão, vazão, nível e composição, além dos quais as operações podem ser consideradas inseguras.

d) Caracterização do entorno:

Descrever o entorno do empreendimento de maneira completa e detalhada. Na elaboração do EAR, a descrição deve considerar a região determinada por uma faixa ao longo do perímetro do empreendimento, com extensão equivalente a maior abrangência da estimativa de efeitos físicos correspondente a 1% de probabilidade de fatalidade ou ao Limite Inferior de Inflamabilidade (LII). Quando se tratar apenas de PGR, a região de interesse é delimitada pela faixa com extensão de 100m ou da distância de referência (d_r), a que for maior.

e) Caracterizar a população ao redor do empreendimento a partir de levantamento de campo:

Pode ser feita com base em dados dos Setores Censitários do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE). Deve apresentar descrição em forma de quadro, indicando todas as atividades presentes no local, como, por exemplo, comércios, indústrias, entre outros. Maior enfoque deve ser dado para locais onde pode haver aglomeração de pessoas, tais como residências, creches, escolas, asilos, presídios, ambulatórios, casas de saúde, hospitais e afins. A CESTESB exige ainda a

identificação dos bens ambientais relevantes, tais como sistemas hídricos utilizados para abastecimento, áreas de preservação ambiental, entre outros.

Devem-se identificar as atividades presentes no local em foto aérea atualizada, com escala e resolução adequadas, que permita a visualização do entorno. Incluir na descrição características relevantes do entorno, tais como barreiras naturais, que possam influenciar o resultado do estudo e na análise dos efeitos físicos (explosão, radiação térmica, dispersão), entre outros.

5.3.2 Identificação de Perigo

Consiste na aplicação de técnicas para a identificação das possíveis sequências de eventos, visando à obtenção de diagnóstico do local e a definição de hipóteses acidentais. A CETESB orienta que a identificação de perigos seja realizada com a participação de representante da empresa, que possua conhecimento dos perigos e experiência na instalação que é objeto da análise. Ressalta-se que a identificação de perigos ² não pode ser genérica, e tem que demonstrar a situação atual e real do empreendimento.

A identificação de perigos pode ser precedida da elaboração de uma análise histórica de acidentes para subsidiar o estudo.

A Tabela 5.4 indica como deve ser feita esta análise, tratando-se basicamente da metodologia adotada na tradicional Análise Preliminar de Perigos (APP).

Tabela 5.4: Identificação de Perigos
Fonte: Manual de análise de risco da CETESB.

Documento ref.	Perigo	Causa	Consequência	Danos Externos?	Proteções Existentes	Recomendações	Hipótese Acidental
Relacionar segmentos de fluxograma, fluxogramas de tubulação e instrumentação, entre outros, que estão sendo avaliados.	Conter no mínimo a magnitude, estado físico, limites de bateria e sistemas de proteção, entre outros.	Causas que poderão ser desenvolvidas na etapa de estimativa de frequências.	Tipologias acidentais que serão estudadas na etapa de estimativa dos efeitos físicos.	Sim (não)	Indicar os Componentes existentes que atuarão para reduzir o perigo.	Indicar os componentes propostos que atuarão para reduzir o perigo.	Numerar os cenários levantados.

5.3.3 Consolidação das hipóteses acidentais

Na avaliação das hipóteses acidentais levantadas encontra-se definido pela Norma o limite de 1% de probabilidade de fatalidade. Assim, devem ser desenvolvidas as hipóteses caso os limites do empreendimento ultrapassem o valor de 1% ou até o limite inferior de inflamabilidade (LII). Quando se tratar apenas do Programa de Gerenciamento de Risco esta justificativa não é necessária. Neste

² Perigo: Uma ou mais condições físicas ou químicas com potencial para causar danos às pessoas, à propriedade e ao meio ambiente.

Risco: Medida de danos à vida humana, resultante da combinação entre frequência de ocorrência de um ou mais cenários acidentais e a magnitude dos efeitos físicos associados a esses cenários. (CETESB, 2011)

caso, devem-se consolidar as hipóteses acidentais para a elaboração do Plano de Ação de Emergência.

A Norma ressalta que se deve assegurar a formulação de hipóteses acidentais que contemplem a ruptura catastrófica dos equipamentos, a ruptura total de linha (100% diâmetro), a ruptura parcial de linha (por exemplo, 10% do diâmetro), furo em equipamentos (vasos e tanques), abertura de válvulas de alívio, ignição de fase vapor confinada em tanques, etc.

O órgão ambiental exige ainda o detalhamento das hipóteses levantadas, especificando sua severidade, estado físico dos compostos envolvidos, sistemas de proteção presentes, etc. É necessário ainda numerar e/ou referenciar as hipóteses de modo a permitir a sua rastreabilidade.

Como medida complementar e preventivista, para os casos em que for considerada a existência de sistema de proteção, a Norma estabelece que devam ser elaboradas duas hipóteses acidentais, sendo que a primeira (Hi) considera a falha destes sistemas, enquanto a segunda (Hi+1) considera a sua atuação.

5.3.4 Estimativa dos Efeitos Físicos e Avaliação de Vulnerabilidade

Após a definição das hipóteses acidentais, procede-se à estimativa dos seus efeitos físicos utilizando modelos matemáticos com a finalidade de obter as informações adequadas. Os modelos avaliam o comportamento do produto no meio, como sua dispersão na forma de nuvem tóxica e/ou inflamável. Os modelos devem ainda quantificar os efeitos em termos de radiações térmicas geradas por incêndios, sobrepressões produzidas por explosões, etc..

Em seguida procede-se à aplicação de modelos de vulnerabilidade ao homem e às estruturas, obtendo-se probabilidades de fatalidade decorrentes dos cenários criados. A partir desta etapa do estudo é possível estabelecer uma relação entre cada hipótese/cenário acidental e o número (*N*) de fatalidades.

5.3.4.1 Estimativa dos efeitos físicos

A CETESB não especifica os modelos a serem aplicados na simulação de cada cenário de risco, de modo que as estimativas devem ser efetuadas por meio da aplicação de modelos matemáticos que efetivamente representem os possíveis fenômenos descritos (vazamento de líquido, de gás ou bifásico) e tipologias acidentais (dispersões atmosféricas, incêndios e explosões) em estudo. O órgão ambiental considera fundamental especificar claramente, para cada cenário, o modelo matemático utilizado, apresentando estas informações na forma de tabela. Deve-se ainda informar a sequência acidental estudada e incluir as memórias de cálculos relativas aos dados estimados utilizados nas simulações. Deste modo, taxas de vazamento, áreas de poças e massas das substâncias envolvidas nas explosões devem estar detalhadas.

Em um estudo sobre cenários de risco algumas variáveis são especialmente difíceis de precisar. É o caso da estimativa do tempo necessário para que um determinado vazamento seja interrompido. O tempo de resposta diante de uma emergência pode variar fortemente, e vazamentos industriais podem demorar horas ou mesmo dias para serem interrompidos. De modo preventivista, a CESTEB recomenda estudar os vazamentos contínuos utilizando o tempo de detecção e intervenção nunca

inferior a dez minutos, independente dos recursos disponíveis. Essa hipótese só não deve ser adotada quando não existir inventário suficiente para atingir este tempo.

Devido à grande variedade de compostos químicos atualmente empregados em plantas industriais, é possível que os dados necessários para avaliar a toxidez e/ou inflamabilidade de uma substância não estejam disponíveis. Assim, para substâncias cujos dados não estejam disponíveis, a Norma indica a adoção das propriedades de substâncias de comportamento similar.

Para os cenários cuja substância envolvida é composta por uma mistura, como no caso do gás liquefeito de petróleo (GLP), pode-se utilizar tal mistura para realização das simulações. Neste caso, deve-se apresentar a composição e as propriedades calculadas da mistura. Excepcionalmente, na impossibilidade de caracterizar adequadamente as propriedades da mistura, a Norma recomenda adotar o componente com maior grau de periculosidade.

Para os casos do petróleo e seus derivados, a Norma define que as simulações podem ser realizadas empregando “substâncias representativas”, conforme apresentado na Tabela 5.5.

Tabela 5.5: Substâncias a serem utilizadas nas simulações para petróleo e derivados

Fonte: Manual de análise de risco da CETESB.

Substância (mistura)	Substância representativa para a simulação
Gás liquefeito de petróleo (GLP)	Propano
Gás natural	Metano
Gasolina automotiva	n-Hexano
Nafta	n-Pentano
Óleo combustível	n-Decano
Óleo diesel	n-Nonano
Petróleo	n-Decano
Querosene	n-Nonano

Para as áreas contendo diversos produtos químicos como, por exemplo, áreas de armazenamento onde os tanques não são cativos, ou áreas de armazenamento de tambores, pode-se selecionar um deles para uso nas simulações de modo a representar os efeitos físicos dos demais produtos manipulados. Nesse caso, o estudo deve apresentar o critério utilizado para a seleção do produto de referência.

Outra variável de difícil estimativa é o diâmetro das poças de líquido formadas no caso de vazamentos. Nas áreas onde há sistema de contenção de vazamentos líquidos (diques), como no entorno de tanques de grande porte, existe especial tendência para formação de poças. Nestes cenários, a Norma recomenda adotar a superfície da poça como sendo equivalente à área delimitada pelo dispositivo de contenção, desde que a quantidade de substância envolvida no vazamento seja suficiente para ocupar toda aquela área. O projeto e dimensionamento de diques ultrapassa o escopo da Norma e deste estudo.

Finalmente, a Norma recomenda que nos locais onde não há sistema de contenção de vazamentos, deve-se estimar a área de espalhamento da substância considerando-se uma altura máxima da poça de 3 (três) centímetros.

5.3.4.2 Avaliação de vulnerabilidade

Os danos ao homem e às estruturas dependem dos efeitos físicos (tais como radiação térmica, sobrepressão e toxicidade) gerados a partir dos cenários acidentais, e da capacidade de resistência dos corpos expostos. Os modelos que permitem a estimativa desses danos são conhecidos como “modelos de vulnerabilidade”. Muitos se baseiam em uma função matemática do tipo *Probit* (*Pr*). Estes modelos permitem expressar a probabilidade do dano, por exemplo “fatalidade humana”, em função da magnitude dos efeitos físicos.

Assim, o número *N* de vítimas fatais de cada cenário acidental é determinado a partir do conhecimento da distribuição populacional na região de interesse e da probabilidade de fatalidade decorrente dos efeitos físicos do cenário avaliado.

a) Radiação Térmica

Para incêndios em poça, em tanques, jatos de fogo, bolas de fogo, entre outros, a Norma recomenda adotar a probabilidade de fatalidade igual a 100% (1,0) quando a radiação térmica for maior ou igual a 35 kW/m², independentemente do fato das pessoas estarem abrigadas.

Para valores de radiação térmica abaixo de 35kW/m² deve-se calcular a probabilidade de fatalidade para pessoas não abrigadas utilizando a Equação 5.1 de Tsao-Perry, até o contorno de 1% de fatalidade. Nesse caso a probabilidade de fatalidade para pessoas abrigadas é zero (0). O tempo de exposição a ser utilizado é de 20 segundos, exceto para bola de fogo, onde deverá ser utilizado seu tempo de duração, até o limite de 20s.

$$Pr = - 36,38 + 2,56 \ln [t \cdot I^{(4/3)}] \quad (\text{Eq. 5.1})$$

Onde:

t =Tempo (s)

I = Radiação Térmica (W/m²)

A Figura 5.1 correlaciona os valores de referência e os contornos de probabilidade de fatalidade.

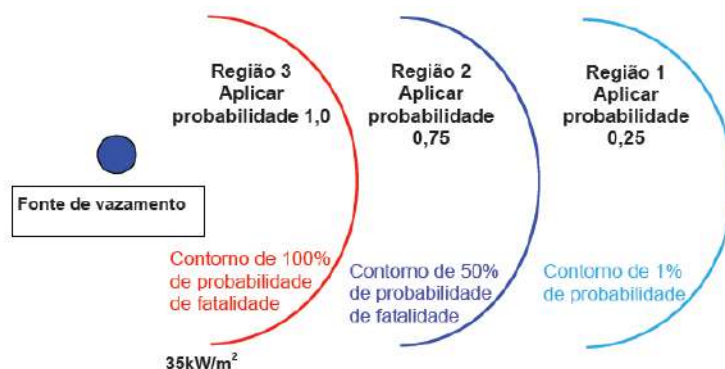


Figura 5.1: Representação das regiões de probabilidade de fatalidade associadas aos valores de referência para o efeito de radiação térmica

Fonte: Manual de análise de risco da CETESB.

A estimativa do número de vítimas fatais para cada um dos cenários acidentais deve ser feita conforme Equação 5.2.

$$N_i = f_v(0,25N_{e1} + 0,75N_{e2}) + 1 N_{e3} \quad (\text{Eq. 5.2})$$

Onde:

N_i = número de fatalidades resultante do cenário i ;

N_{e1} = número de pessoas presentes e expostas na região 1, delimitada pelas curvas correspondentes às probabilidades de fatalidade de 50% e 1%;

N_{e2} = número de pessoas presentes e expostas na região 2, delimitada pela curva de radiação térmica de 35 kW/m² e a curva de probabilidade de fatalidade de 50%;

N_{e3} = número de pessoas presentes e expostas na região 3, delimitada pela fonte do vazamento e a curva de radiação térmica de 35 kW/m²;

f_v = fator associado à vestimenta das pessoas não abrigadas, quando a radiação térmica é <35 kW/m². Destaca-se que para valores de radiação térmica inferiores a 35kW/m², a probabilidade de fatalidade para pessoas não abrigadas também é afetada pela proteção oferecida pela vestimenta. Recomenda-se utilizar o fator $f_v = 0,2$ para a baixa exposição, onde cerca de 25% do corpo está exposto; e utilizar $f_v = 0,8$ para a alta exposição, onde cerca de 70% do corpo está exposto.

Diferentemente do cenário de avaliação da radiação térmica emitida por um incêndio em poça, por exemplo, para incêndios em nuvem a CETESB recomenda adotar a probabilidade de fatalidade de 100% (1,0) para pessoas dentro da área da nuvem, independentemente do fato de estarem abrigadas. A probabilidade de fatalidade para pessoas fora da área da nuvem é admitida como sendo zero (0).

b) Sobrepressão

Para sobrepressões decorrentes de explosões, deve-se referenciar as distâncias em relação ao local da explosão. Deve-se ainda considerar a probabilidade de fatalidade de 75% (0,75) para pessoas abrigadas e a probabilidade de fatalidade de zero (0) para pessoas não abrigadas, sempre que a sobrepressão for superior a 0,3bar.

Já para a região de sobrepressão entre 0,1 e 0,3bar, a Norma recomenda adotar a probabilidade de fatalidade de 25% (0,25) para pessoas abrigadas, e a probabilidade de fatalidade de zero (0) para pessoas não abrigadas, como indicadas na Figura 5.2.

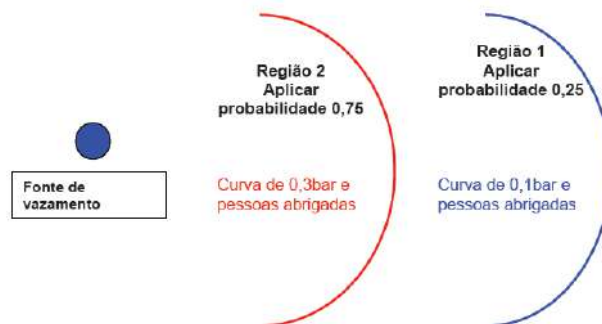


Figura 5.2: Representação das regiões de probabilidade de fatalidade associadas aos valores de referência para o efeito de sobrepressão

Fonte: Manual de análise de risco da CETESB.

Neste caso, a estimativa do número de vítimas fatais para cada um dos cenários acidentais ocorre conforme Equação 5.3.

$$Ni = 0,25Ne_1 + 0,75Ne_2 \quad (\text{Eq. 5.3})$$

Onde:

Ni = número de fatalidades resultante do cenário i ;

Ne_1 = número de pessoas abrigadas na região 1, delimitada pelas curvas correspondentes às sobrepressões de 0,3bar e 0,1bar;

Ne_2 = número de pessoas abrigadas na região 2, delimitada pela curva correspondente à sobrepressão de 0,3bar e a fonte do vazamento.

5.3.5 Estimativa de frequências

A partir da definição de risco como sendo o produto da severidade de um cenário pela sua probabilidade de ocorrência, a estimativa do mesmo deve considerar não apenas a severidade dos cenários, conforme detalhado no item anterior, mas também a frequência de ocorrência. A Norma pressupõe o emprego de técnicas adequadas, tais como Análise por Árvore de Eventos (AAE), para definição da probabilidade de ocorrência dos diferentes cenários levantados. O emprego destas técnicas ultrapassa o escopo deste estudo.

5.3.6 Estimativa e avaliação de risco

A CETESB avalia o risco do empreendimento por meio da comparação entre o risco, estimado nas formas de “risco individual” e “social”, e os respectivos critérios de tolerabilidade.

a) Risco individual

Quando expresso na forma de “risco individual” (RI), a Norma refere-se ao risco para uma pessoa decorrente de um ou mais cenários acidentais, no intervalo de um ano. Seu caráter é geográfico, razão pela qual sua expressão se dá pela determinação dos valores de RI em pontos espaciais (x,y) localizados no entorno do empreendimento.

A determinação do risco individual num ponto espacial qualquer no entorno do empreendimento pressupõe o conhecimento da frequência de ocorrência de cada cenário acidental e da probabilidade desse cenário acarretar fatalidades (severidade) nesse ponto.

Ressalta-se que o risco individual tem caráter cumulativo, o que significa que a resultante em um ponto de interesse advém da soma do RI de cada cenário acidental criado, conforme Equações 5.4 e 5.5.

$$RI_{x,y} = \sum_{i=1}^n RI_{x,y,i} \quad (\text{Eq. 5.4})$$

Onde:

$RI_{x,y}$ = risco individual total de fatalidade no ponto x,y (chance de fatalidade por ano ou ano⁻¹);

$RI_{x,y,i}$ = risco individual de fatalidade no ponto x,y devido ao cenário i (chance de fatalidade por ano ou ano⁻¹);

n = número total de cenários considerados na análise.

O risco individual de fatalidade no ponto x,y devido ao cenário i é, por sua vez, obtido a partir da Equação 5.5.

$$RI_{x,y,i} = F_i \cdot p_{f,i} \quad (\text{Eq. 5.5})$$

Onde:

$RI_{x,y,i}$ = risco individual de fatalidade no ponto x,y devido ao cenário i (chance de fatalidade por ano ou ano⁻¹);

F_i = frequência de ocorrência do cenário i;

$p_{f,i}$ = probabilidade que o cenário i resulte em fatalidade no ponto x,y, de acordo com os efeitos esperados.

É usual apresentar o risco individual por meio de contornos de mesmo risco (isorrisco), uma vez que estes possibilitam visualizar a sua distribuição geográfica no entorno da planta analisada, como representado na Figura 5.3.

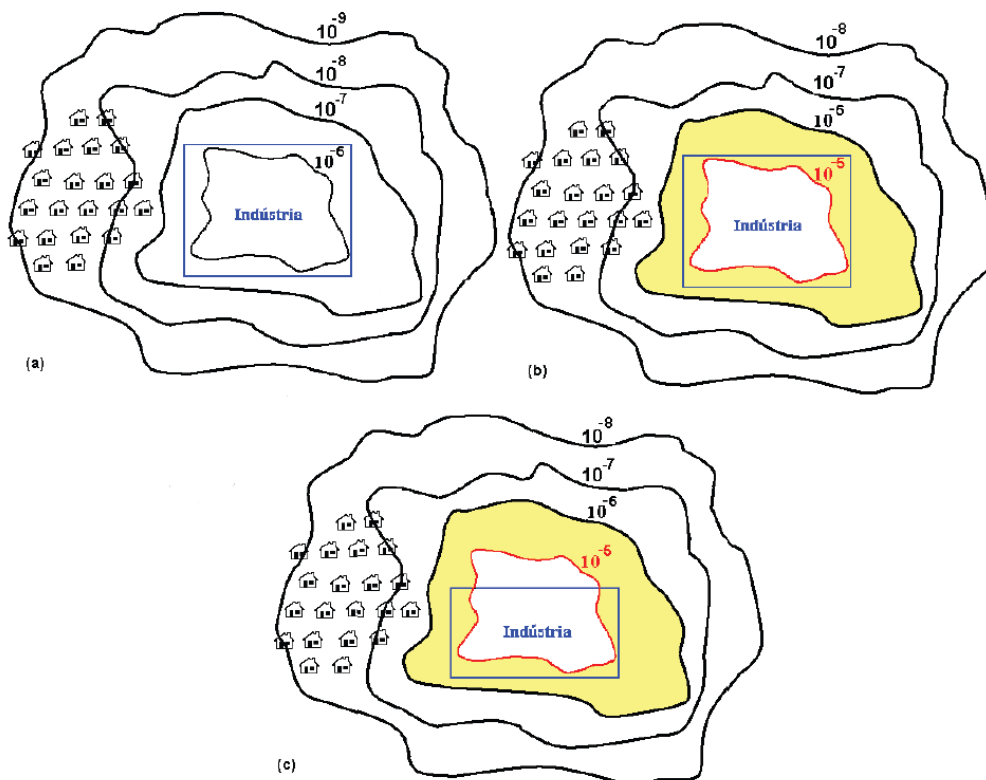


Figura 5.3: Representação do risco individual por meio dos contornos de isorrisco
Fonte: Manual de análise de risco da CETESB.

O critério proposto pela CETESB para a avaliação (tolerância) ao risco individual é dividido em três classificações:

- Risco tolerável: $RI < 1 \times 10^{-6} \text{ ano}^{-1}$;
- Risco a ser reduzido: $1 \times 10^{-6} \text{ ano}^{-1} \leq RI \leq 1 \times 10^{-5} \text{ ano}^{-1}$;
- Risco intolerável: $RI > 1 \times 10^{-5} \text{ ano}^{-1}$.

Os retângulos azuis na Figura 5.3 representam a indústria. Se o contorno de isorrisco de $1 \times 10^{-6} \text{ ano}^{-1}$ situa-se dentro dos limites do empreendimento, como na Figura 5.3 (a), ocorre a presença de risco residual em relação ao público externo. Embora baixo e considerado como “tolerável”, o risco deve sempre ser gerenciado.

Quando o empreendimento industrial que está sendo avaliado gera limites tais quais exibidos na Figura 5.3 (b), existe a formação de uma região externa a empresa cujo “risco deve ser reduzido”. Essa área situa-se entre os contornos de isorrisco de $1 \times 10^{-5} \text{ ano}^{-1}$ e de $1 \times 10^{-6} \text{ ano}^{-1}$, estando assinalada na Figura 5.3 (b). Esses limites requerem a implantação de medidas que resultem na redução do risco. É importante observar porém que a curva de risco de $1 \times 10^{-5} \text{ ano}^{-1}$ encontra-se no interior da empresa avaliada. Ou seja, o risco para a área externa a planta nunca é maior que este valor.

Finalmente, quando o contorno de isorrisco de $1 \times 10^{-5} \text{ ano}^{-1}$ encontra-se situado total ou em parte fora ao limite da planta industrial, como na Figura 5.3(c), indica a inviabilidade do projeto, tal como proposto. Isso ocorre pois existem regiões externas à planta com risco superior a $1 \times 10^{-5} \text{ ano}^{-1}$, o que, pelos padrões da CETESB, seria inaceitável.

b) Risco Social

O risco individual, apresentado acima, considera unicamente o fator geográfico. Ou seja, não avalia o número de pessoas presentes na região considerada. O risco social irá considerar este parâmetro.

O risco, quando expresso na forma de “risco social” (RS), refere-se ao risco para um determinado número ou agrupamento de pessoas externas à planta industrial, expostas aos efeitos decorrentes de um ou mais cenários acidentais avaliados.

Para avaliar o risco social é comum o emprego da denominada “curva F x N”. Essa curva relaciona a frequência de ocorrência e o número de fatalidades geradas, conforme exemplificado na Figura 5.4. A construção da curva F x N pressupõe o conhecimento dos pares ordenados F (frequência) e N (número de vítimas) para cada cenário acidental. A curva é obtida a partir da representação da frequência acumulada dos cenários acidentais com N ou mais vítimas (eixo y) e o número de vítimas fatais de cada cenário (eixo x).

A Figura 5.4 apresenta o critério estabelecido pela norma CETESB para a avaliação do risco social. É necessário então comparar os resultados encontrados no estudo contra o critério da norma. Verifica-se assim a tolerabilidade do risco. Novamente, o critério delimita três regiões de risco: tolerável, a ser reduzido e intolerável.

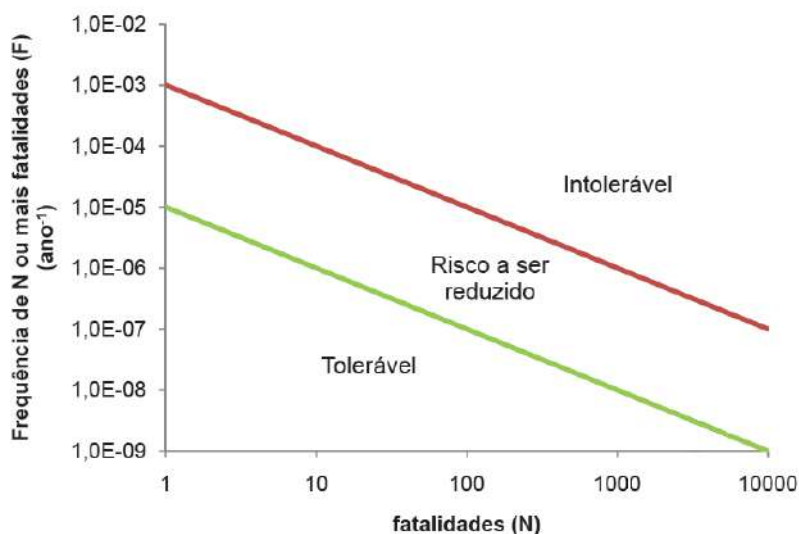


Figura 5.4: Critério de tolerabilidade para risco social
 Fonte: Manual de análise de risco da CETESB.

No caso do empreendimento situar-se na região de risco tolerável aponta-se a presença de risco residual que deve ser gerenciado por meio de um Programa de Gerenciamento de Risco. Porém, caso situe-se na região de risco a ser reduzido, deverão ser implantadas, sempre que viáveis, medidas que resultem na redução do risco. Por fim, se o resultado da análise situar-se na região de risco intolerável, isto indica a inviabilidade do projeto, tal como proposto.

5.3.7 Redução do risco

Além do simples resultado gerado ao final do estudo de risco proposto na Norma, espera-se que ao longo da avaliação surjam melhorias e alternativas visando a redução do risco. Deste modo, no transcorrer da análise os profissionais envolvidos devem se perguntar se é possível aplicar medidas que reduzem os efeitos físicos ou as frequências dos cenários acidentais, ou ainda medidas que eliminem alguns desses cenários. Caso se decida pela adoção dessas alternativas, deve-se incorporá-las ao projeto e ao EAR, demonstrando a redução dos efeitos físicos, das frequências e do risco.

São exemplos de medidas que podem ser adotadas: a redundância ou o aumento da confiabilidade de componentes, a substituição de compostos por outros de menor periculosidade, o afastamento dos inventários em relação à população, a redução de inventários, mudanças nas condições operacionais (temperatura, pressão), entre outras.

5.4 Termo de Referência para a Elaboração de Programa de Gerenciamento de Risco

O objetivo do Programa de Gerenciamento de Risco (PGR) é prover uma política voltada para o estabelecimento de requisitos contendo orientações gerais de gestão, com vistas à prevenção de acidentes.

O PGR deve refletir a realidade do empreendimento no tocante às suas características e condições operacionais, além de mencionar às ações pertinentes a cada um dos itens do Programa, tais como, procedimentos e sistemática para realização das tarefas. É um documento de gestão a ser utilizado

pela própria empresa, onde todos os itens constantes do Programa devem ser claramente definidos e documentados, aplicando-se às atividades desenvolvidas no empreendimento, tanto por funcionários como pelas empresas terceirizadas (empreiteiras e demais prestadores de serviço).

O PGR deve contemplar os seguintes itens:

- a) Caracterizações do empreendimento e do entorno
- b) Identificação de perigos;

O empreendedor deve possuir um procedimento contendo minimamente: quando realizar a identificação de perigos, os motivos da realização, as metodologias utilizadas, os nomes e cargos do responsável e componentes da equipe, ações sugeridas para redução ou eliminação dos riscos encontrados, prazos para cumprimento das ações e sistema de acompanhamento, etc.

- c) Revisão do Estudo de Análise de Risco ou da identificação de perigos;

Para os empreendimentos onde houve necessidade de elaborar um Estudo de Análise de Risco (EAR), a Norma define que sejam efetuadas revisões periódicas deste documento, de modo a identificar novas situações de risco e as respectivas medidas de redução. A Norma determina ainda a necessidade de realizar a revisão do EAR quando de eventuais modificações ao longo da vida útil do empreendimento ou aumento significativo da população de interesse.

Para os empreendimentos onde existe apenas a necessidade de elaborar um Programa de Gerenciamento de Risco (PGR) é necessário revisar periodicamente a identificação de perigos das instalações envolvidas. Essa revisão tem como objetivo identificar novos perigos e propor eventuais medidas mitigadoras.

- d) Procedimentos operacionais;

O empreendimento deve possuir um conjunto de procedimentos documentados, facilmente acessíveis, que descrevam, em detalhes e com clareza, como seus funcionários, terceirizados e contratados devem executar com segurança todas as tarefas.

- e) Gerenciamento de modificações;

Estabelecer uma sistemática adequada de gerenciamento dos perigos decorrentes de eventuais modificações nas instalações envolvidas. Tem como finalidade de identificar, avaliar e gerenciar tais perigos previamente.

- f) Manutenção e garantia de integridade;

O empreendimento deve possuir um programa de manutenção e garantia da integridade dos componentes considerados críticos, tais como vasos de pressão, tanques de armazenagem, linhas, sistemas de alívio, detectores, válvulas, bombas, sistemas de intertravamento e paradas (*shutdown*), sistema de combate a incêndios, malhas de aterramento e sistemas elétricos.

- g) Capacitação de recursos humanos;

O empreendimento deve possuir um programa de treinamento que coordene a capacitação dos funcionários, terceirizados e contratados envolvidos com as atividades realizadas na empresa. A

capacitação deve contemplar ainda o gerenciamento dos perigos pertinentes a cada uma destas atividades.

h) Investigação de incidentes e acidentes;

O empreendimento deve possuir um procedimento para investigação de incidentes e de acidentes envolvendo liberações de substâncias de interesse.

i) Plano de ação de emergência (PAE);

O empreendimento deve possuir um Plano de Ação de Emergência que proporcione ações rápidas e eficazes em caso de emergências. O PAE deve se basear na identificação de perigos e/ou nos resultados obtidos no Estudo de Análise de Risco, quando realizado, e na legislação vigente.

6. Introdução à Dinâmica de Incêndio

6.1 Tipos de chama

Embora muitas vezes tratado de modo intuitivo, o conceito de “chama” normalmente é pouco preciso. Chama é definida como “um corpo ou uma corrente de material gasoso em processo de combustão” (Hamins, 1995), a qual emite energia radiante em um comprimento de onda específico, sendo esta função do composto químico combustível. Por exemplo, utilizando metanol como combustível a coloração chama será azul, já utilizando gás hidrogênio a chama torna-se incolor (Hamins, 1995; Zalosh, 2003).

Entender o comportamento do fogo pode ser de grande valia na prevenção e combate de incêndios. Por essa razão, muitos autores propõem modelos matemáticos que descrevem as características mais relevantes do seu comportamento. Conforme mencionado anteriormente, há basicamente três tipos de incêndio em líquidos ou vapores (Nogueira, 2007):

- a) *Jet-Fire* ou incêndio em jato: Em caso de vazamento de um composto combustível líquido ou gasoso a partir de um recipiente pressurizado, ocorre a formação de jato. Quando este é inflamado, tem-se o *Jet-Fire* ou incêndio em jato. Este tipo de incêndio pode ser mais bem compreendido através da Figura 6.1.
- b) *Fireball* ou Bola de Fogo: Ocorre quando uma nuvem de combustível formada é inflamada. A *Fireball* se propaga verticalmente em forma de esferas crescentes e de curta duração. Este tipo de incêndio é retratado na Figura 6.2. Trata-se de um fenômeno extremamente perigoso, especialmente devido a enorme quantidade de energia térmica liberada pelas grandes bolas de fogo formadas nas explosões de reservatórios de gás combustível. A Bola de Fogo pode ser decorrente de um BLEVE, aumentando ainda mais a letalidade deste tipo de evento.
- c) *Pool Fire* ou Incêndio em Poça: Trata-se da formação de uma poça de líquido combustível devido ao vazamento sobre uma superfície sólida. Quando está sobre ignição, a queima ocorre apenas em sua superfície, conforme mostrado na Figura 6.3. Segundo Nogueira (2007), a maioria dos incêndios decorrentes de vazamentos de combustíveis líquidos ou em grandes tanques de armazenagem, são deste tipo.



Figura 6.1 Incêndio em Jato

Fonte: Chemical & Process Technology, acessado em 29 de julho de 2012.



Figura 6.2 Bola de fogo

Fonte: Boaler, acessado em 22 de julho de 2012.



Figura 6.3 Incêndio em poça

Fonte: Lopez, acessado em 29 de julho de 2012.

O estudo aqui desenvolvido concentra-se em incêndios do tipo *Pool Fire*, por serem, conforme citado, os mais comuns em tanques de armazenagem de combustíveis líquidos. Antes de descrever os modelos e características particulares deste tipo de incêndio é preciso entender a dinâmica de um incêndio.

6.2 A combustão e suas propriedades

A combustão é uma reação química entre um combustível e o comburente. Para que ela ocorra é necessário que existam três elementos básicos: o comburente, o combustível e uma fonte de calor. Estes formam a figura conhecida como o “triângulo do fogo”, ilustrada na Figura 6.4.

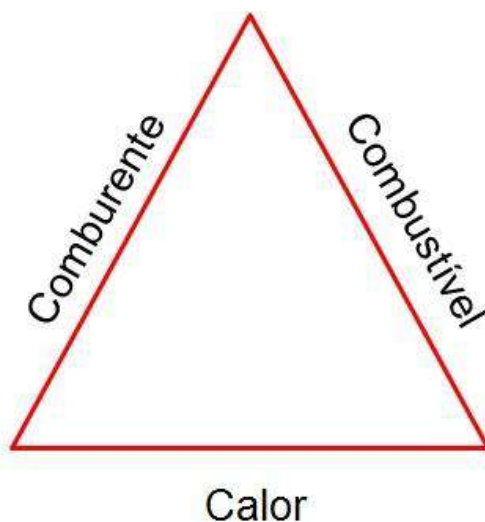


Figura 6.4 Triângulo do fogo

Comburente: Na maior parte dos casos é o oxigênio. 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. Diferentes substâncias necessitam de diferentes concentrações de oxigênio no ar para manter a combustão. Por exemplo, o metano necessita de 13% de concentração de oxigênio, enquanto o hidrogênio precisa de apenas 10% (Crowl, 2011).

Combustível: É o material que tem propriedade de queima (como, por exemplo, o álcool etílico), podendo ser sólido, líquido ou gasoso. Apesar de o combustível estar em qualquer uma destas fases, a chama ocorre sempre na fase vapor (Drysdale, 2011).

Calor: É uma forma de energia, sendo o elemento que dá início a chama e que ajuda a propagá-la. Essa forma de energia pode originar-se de várias fontes, como uma centelha elétrica ou uma superfície aquecida (Manual de Combate a Incêndios, Bombeiros, 2008).

Para compreender melhor a combustão é necessário conhecer três conceitos fundamentais (Crowl, 2011):

- a) Temperatura de Fulgor: É a menor temperatura em que o material combustível precisa estar para que haja uma liberação de vapores suficiente de forma a criar uma mistura viável de sofrer ignição. A ignição, porém, não irá gerar combustão sustentável.

- b) Temperatura de Combustão: É a menor temperatura em que o material combustível deve estar para que, ao sofrer ignição, a combustão se mantenha. A temperatura de combustão é sempre superior à de fulgor.

- c) Temperatura de Autoignição: É a menor temperatura que um combustível deve se encontrar para que a combustão ocorra mesmo na ausência de uma fonte de ignição. É um fenômeno muito frequente durante a propagação de incêndios, onde o calor emitido aquece materiais próximos até sua temperatura de autoignição. O fenômeno da autoignição é especialmente relevante na prevenção de incêndios industriais, especialmente quando o processo envolve reações exotérmicas ou compressões adiabáticas.

O conceito de triângulo do fogo, porém, encontra-se ultrapassado. Diversas pesquisas demonstram a existência de um quarto fator contribuinte: a reação em cadeia (Drysdale, 2011). Forma-se assim o “tetraedro do fogo” (Figura 6.5). Esta nova aresta baseia-se nas reações em cadeia presentes na combustão. Embora a combustão seja muitas vezes representada como a reação química que combina os reagentes “combustíveis” e “oxigênio”, e gera “gás carbônico” e “água”, quando na queima completa, sabe-se que a dinâmica real é bastante mais complexa (Drysdale, 2011). Uma série de compostos intermediários é formada em incêndios reais. Muitos dos compostos intermediários são extremamente letais, especialmente em incêndios envolvendo materiais plásticos, justificando o fato do maior número de mortes em incêndios ocorrerem por inalação de fumaça e intoxicação, e não por queimadura.

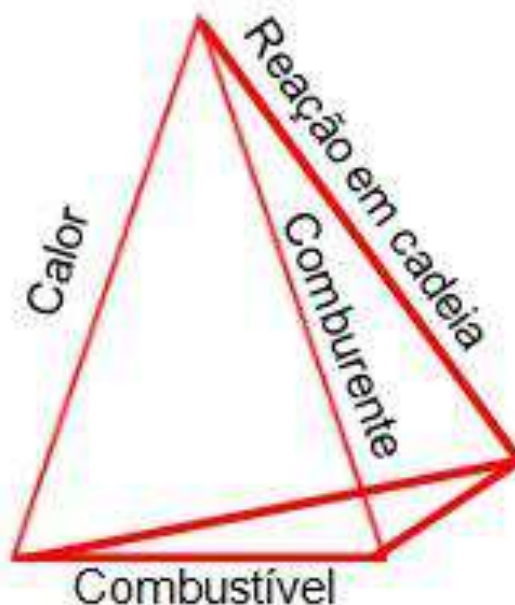


Figura 6.5: Tetraedro do fogo

Quando há combate a incêndios, o foco é tentar eliminar qualquer uma das “arestas do tetraedro”. A forma mais simples de se extinguir um incêndio é retirar o combustível. Isso é possível, por exemplo, retirando o material combustível que está próximo à área da queima, ou esperando que o

mesmo queime completamente. Em grandes incêndios em tanques de armazenagem, como o ocorrido em 2012 em uma refinaria na Venezuela, está é muitas vezes a única opção de ação.

O resfriamento é o método mais empregado e tradicional de combate a incêndios, especialmente os urbanos (estruturais). Ele se baseia na extinção do calor, reduzindo a temperatura da combustão até o ponto que a chama não mais se sustente. Normalmente a água é utilizada com agente de resfriamento, já que ela tem uma grande capacidade de absorver calor, mas caso o material combustível tenha um baixo ponto de combustão (abaixo de 20°C), outros agentes podem ser utilizados.

O método de abafamento tem como princípio eliminar o comburente do tetraedro. Utilizando agentes que atuam por abafamento, como o gás carbônico ou o nitrogênio, a concentração de comburente diminui impedindo que a combustão se mantenha. É interessante ressaltar que a ação da água no combate a incêndios, além de resfriamento, é também por abafamento. A vaporização da água aumenta significativamente seu volume, ocupando o espaço originalmente disponível para o oxigênio.

Por fim, para inibir a reação em cadeia, certos tipos de agentes extintores são lançados sobre a área da chama, agindo sobre os intermediários da reação. Esta é a forma mais moderna de combate a incêndios, sendo o princípio de ação de inúmeros líquidos geradores de espuma (LGEs), do gás halon e “FM200” (Kidde), etc. Este mecanismo é atualmente empregado nos extintores do tipo “ABC”, usados em automóveis de passeio.

6.3 Perfil de Temperatura

Incêndios gerados por combustíveis distintos apresentam diferentes perfis dinâmicos de temperatura, conforme ilustrado na Figura 6.6. Esta propriedade é especialmente relevante em incêndios na indústria química e petroquímica, já que diversos produtos queimam com temperaturas muito superiores aquelas observadas em madeira e papel, combustíveis típicos de incêndios domésticos.

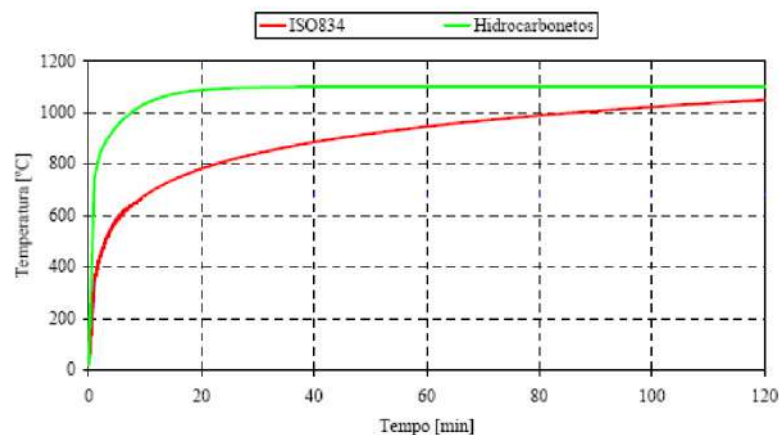


Figura 6.6 Curva Padrão e curva para queima de hidrocarbonetos
Fonte: Nogueira, 2007.

A Figura 6.6 apresenta duas curvas padrão. A curva de hidrocarboneto é normalmente utilizada na indústria química e petroquímica como elemento comparativo. Foi observado que incêndios com hidrocarbonetos alcançam, rapidamente, altas temperaturas, graças ao elevado poder caloríficos

destes compostos. Já a curva em vermelho (ISO834, 2002) baseia-se em modelos matemáticos obtidos a partir de incêndios em condições padrões. Embora muito útil, a modelagem teórica de incêndios acaba, muitas vezes, por não ser capaz de representar um incêndio real em todas as suas variações. Os modelos têm por base condições controladas de ensaio e a presença de um único combustível, o que normalmente não ocorre em um caso real. A concentração de oxigênio durante um incêndio real, e em particular sua restrição, também afeta o comportamento da temperatura ao longo do tempo.

6.4 Modelagem de Incêndio em Poça

Conforme mencionado anteriormente, incêndio em poça é o cenário no qual uma grande área superficial de combustível líquido entra em combustão. Uma característica da dinâmica de incêndios em poça é que, uma vez que o combustível tenha sido inflamado, o fogo se espalha rapidamente (instantaneamente) por toda a sua superfície (FDT, 2004; Hamins,1995). A velocidade de propagação da chama neste caso é diferente da observada em incêndios de sólidos, cuja a propagação é mais lenta.

Para estudar incêndios em poça é preciso conhecer algumas de suas características, como por exemplo: “taxa de emissão de calor”, “taxa mássica de queima”, “temperatura de queima”, “altura de chama”, entre outras. Devido à complexidade das variáveis envolvidas não há modelos puramente teóricos, sendo as correlações baseadas em modelos experimentais (Nogueira, 2007).

6.4.1 Taxa de emissão de calor

A taxa de emissão de calor (Q ou HRR – Heat Release Rate) é um dos termos mais importantes para análises dinâmicas de incêndio. Infelizmente, esta não pode ser facilmente determinada. A forma mais precisa de determinação se dá através da realização de experimentos, e a Tabela 6.1 apresenta algumas taxas de emissão conhecidas.

Na falta de dados tabelados, é possível estimar o valor da taxa de emissão de calor pela Equação 6.1 (FTD, 2004):

$$Q = m'' \Delta H_{c,eff} A_f (1 - e^{-k\beta D}) \quad (\text{Eq. 6.1})$$

Onde:

Q = calor liberado (kW);

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

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

A_f = área horizontal de combustível (m^2);

k, β = constantes empíricas (m^{-1});

D = diâmetro da área de queima(m);

Tabela 6.1 Taxa de emissão de calor de diversos materiais

Fonte: FTD, 2004.

Combustível	Taxa de emissão de calor (Q)
Cigarro	5 W
Lâmpada	60 W
Humano	100 W
Poça de gasolina (1m ²)	2.5 MW
Poliestireno (caixa com 2m ² e 4.9m de altura)	30 a 40 MW

Nota: 1MW = 10⁶ W

É importante ressaltar que o valor encontrado a partir da equação, ou nas tabelas disponíveis, representa o valor máximo de queima. Isto ocorre pois a quantidade de calor liberado não é constante ao longo do tempo, conforme representado na curva da Figura 6.7. Observa-se a divisão do incêndio em três fases: “de crescimento”, “estacionária” e “de decaimento”. A maior taxa de emissão de calor ocorre na fase estacionária, servindo de referência para os cálculos.

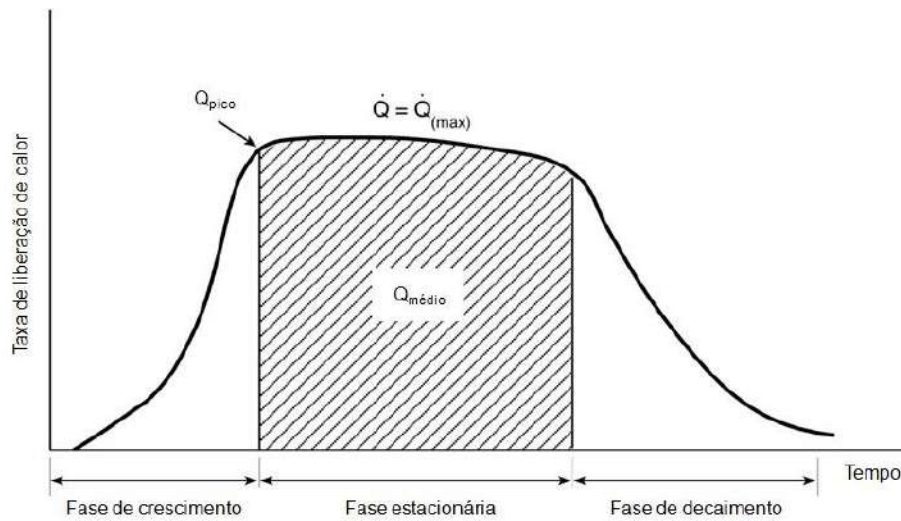


Figura 6.7 Relação entre a taxa de emissão de calor e as fases da queima

Fonte: FTD, 2004

As constantes k e β do modelo são determinadas experimentalmente, sendo muitas vezes apresentadas na forma de produto, como na Tabela 6.2 (FDT, 2004). A tabela apresenta ainda valores de referência para taxa de queima e calor efetivo de combustão para alguns combustíveis.

Tabela 6.2 Taxa de emissão de calor de diversos materiais

Fonte: FTD, 2004.

Combustível	Taxa de queima (kg/m ² .s)	Calor efetivo de combustão (kJ/kg)	Densidade (kg/m ³)	K.β (m ⁻¹)
H ₂ líquido	0,017	12.000	70	6,1
Etanol	0,017	20.000	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.

6.4.2 Altura da chama

A altura da chama é um dos indicadores de quão perigoso um incêndio pode ser, especialmente pela possibilidade de propagação através do contato direto da chama com outros materiais combustíveis. A Figura 6.3, empregada para ilustrar um incêndio em poça, revela que a altura das chamas geradas pode ser suficiente para envolver um tanque ou outros equipamentos. A exposição prolongada de um tanque as chamas revelou-se um dos cenários mais críticos para incêndios industriais, podendo induzir a formação de BLEVES.

A Figura 6.8 ilustra o comportamento do parâmetro “altura da chama”. Sua característica flutuante é devida, em grande parte, a mistura do combustível com o ar e as diferenças de temperaturas presentes. Este comportamento oscilatório não permite que exista uma altura única ou exata para a chama, sendo representada por uma altura média. Desta forma, define-se a altura como sendo “aquela que a chama possui em 50% do tempo de queima” (FDT, 2004). Ressalta-se ainda que, no caso de incêndio em poça, a combustão gera uma flutuação de altura periódica (FDT, 2004).

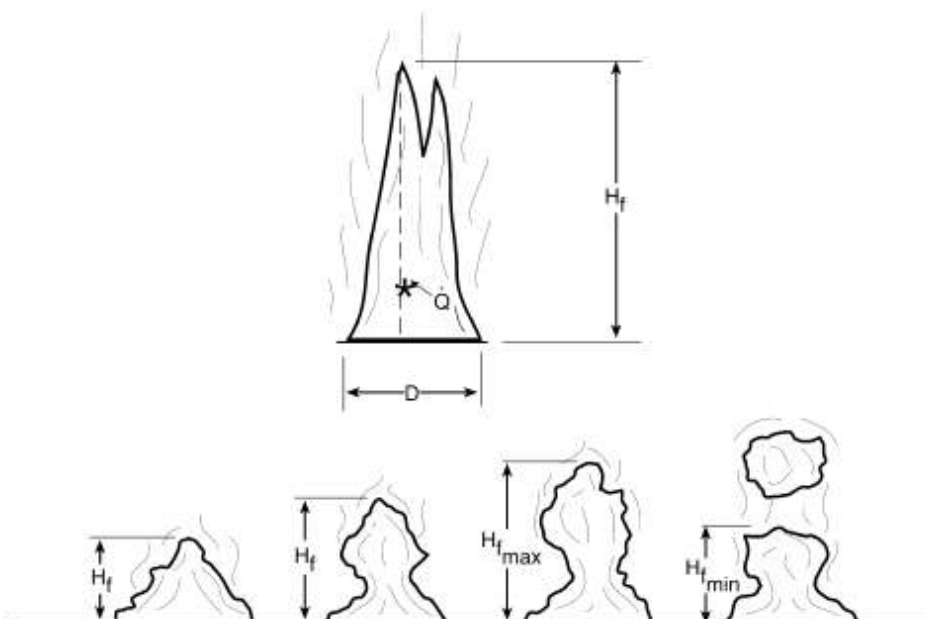


Figura 6.8: Flutuações na altura da chama

Fonte: FTD, 2004

O tamanho da chama pode influenciar no regime de queima. A combustão em regime laminar ocorre para alturas de chama reduzidas, por consequência, em um diâmetro de poça pequeno – poucos centímetros.

O regime turbulento é mais frequente para alturas de chamas maiores, geradas por diâmetros de poças também mais amplos (diâmetro maior que 1 m), sendo este o cenário de maior interesse industrial.

Para diâmetros pouco menores que 1 metro há uma região de transição, onde há um comportamento misto entre os dois regimes.

Diversas correlações foram propostas e podem ser empregadas com maior ou menor exatidão em diferentes cenários. A seguir são apresentadas duas correlações de amplo uso na determinação da altura de chamas para incêndios em poça:

Heskestad (1995):

$$H_f = 0,235Q^{2/5} - 1,05D \quad (\text{Eq. 6.2})$$

Thomas (1962):

$$H_f = 42D \left(\frac{m}{\rho_a \sqrt{gD}} \right)^{0,61} \quad (\text{Eq. 6.3})$$

Onde :

H_f = altura da chama (m)

Q = taxa de emissão de calor (kW)

D = diâmetro da poça (m)

m = taxa de queima ou perda de massa ($\text{kg}/\text{m}^2 \cdot \text{s}$)

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

g = aceleração da gravidade (m/s^2)

A Equação 6.2 foi desenvolvida baseando-se 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 6.3, os experimentos foram realizados somente em estruturas de madeira com lados variando de 10 a 200cm (Chernovsky, Kytomaa, 2008).

6.4.3 Taxa de queima

A taxa de queima, também definida como taxa de perda de massa, pode ser determinada experimentalmente. Valores de referência para alguns combustíveis são encontrados na Tabela 6.3.

Esta propriedade pode ainda ser calculada empiricamente. Para o caso de interesse deste estudo, ou seja, incêndios em poças com diâmetro superior a 2 metros, alguns autores descrevem correlação da taxa de queima com o diâmetro:

Drysdale (2011):

$$\dot{m}'' = \dot{m}''_{\infty}(1 - e^{-k\beta D}) \quad (\text{Eq. 6.4})$$

Onde:

\dot{m}'' = taxa de queima ou perda de massa (kg/m².s)

\dot{m}''_{∞} = taxa de queima assintótica para poças largas (kg/m.s) (Tabela 6.3);

k, β = constantes (m⁻¹);

D = diâmetro da poça (m);

Tabela 6.3 Dados para estimativa de taxa de queima para incêndio em poça
Fonte: Drysdale, 2011

Combustível	\dot{m}''_{∞} (kg/m ² .s)
Metano Líquido	0,078
Etanol	0,015
Gasolina	0,055
Benzeno	0,085

Se a \dot{m}''_{∞} não estiver tabelado, é possível estimá-lo empiricamente através da Equação 6.5:

$$\dot{m}''_{\infty} = \frac{\Delta H_c 10^{-3}}{\Delta H_g} \quad (\text{Eq. 6.5})$$

Onde:

\dot{m}''_{∞} = taxa de queima assintótica para poças largas (kg/m.s);

ΔH_c = calor de combustão (kJ/kg);

ΔH_g = calor de gaseificação (kJ/kg).

6.4.4 Tempo de queima

O tempo de queima de qualquer combustível é influenciado pela sua taxa de queima e a forma geométrica na qual o combustível se encontra.

No caso do incêndio em poça, a forma de distribuição do líquido é função da geometria do entorno. Com isso pode haver uma queima rápida, se a poça formada tiver uma grande área superficial, ou uma queima mais demorada, para uma área superficial reduzida.

Para uma massa ou volume de combustível líquido conhecido, tem-se que a duração de queima (t_b) é dada por:

FTD (2004):

$$t_b = \frac{4V}{\pi D^2 v} \quad (\text{Eq. 6.6})$$

Onde:

t_b = tempo de queima (s);
 V = volume do líquido (m^3);
 D = diâmetro da poça (m);
 v = taxa de regressão (m/s).

A taxa de regressão corresponde à taxa com que a espessura do líquido se reduz, sendo definida pela Equação 6.7 (FTD, 2004):

$$v = \frac{m''}{\rho} \quad (\text{Eq. 6.7})$$

Onde :

m'' = taxa de queima ou perda de massa ($\text{kg}/\text{m}^2.\text{s}$);
 ρ = densidade do combustível líquido (kg/m^3).

6.4.5 Radiação térmica

Há três formas de transmissão de calor entre dois ou mais corpos: condução, radiação e convecção.

A condução é a forma de transmissão de molécula a molécula. Para que o calor passe do corpo mais quente para o mais frio é necessário que eles estejam em contato. Este tipo de transmissão está ligado à vibração ou movimento das moléculas. Normalmente a condução é realizada entre corpos sólidos.

No caso da convecção, a troca de calor ocorre entre um gás ou líquido com um sólido. Assim como na condução, as moléculas transmitem energia umas às outras através de colisões.

“O modo de transferência de calor por convecção abrange dois mecanismos. Além da transferência de energia devido ao movimento molecular aleatório (difusão), a energia também é transferida através do movimento global, ou macroscópico, do fluido. [...] É comum usar o termo convecção para fazer referencia a esse transporte cumulativo e o termo advecção para fazer referencia ao transporte devido ao movimento global do fluido. (Incropera, 2008)”

Finalmente, todo corpo que apresenta uma temperatura maior que 0K é capaz de transmitir calor por radiação. Isso ocorre porque as moléculas, ao se movimentarem, são capazes de emitir ondas eletromagnéticas que, ao incidirem sobre uma superfície, transmitem energia para as moléculas da superfície, aquecendo-a.

A princípio a radiação pode parecer semelhante à convecção, entretanto, a radiação não requer um meio material para propagar-se. Sabe-se, inclusive, que a radiação propaga-se de forma mais eficiente no vácuo, como, por exemplo, entre o Sol e a Terra (Figura 6.9).

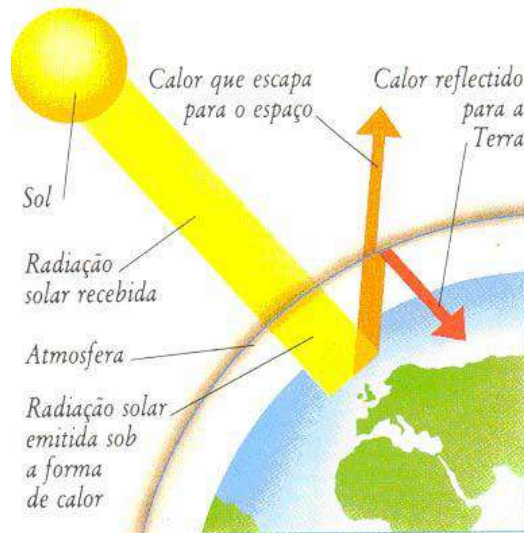


Figura 6.9 – Transmissão de calor – Radiação
Fonte: Kaizen Quality Management, acessado em 29 de julho de 2012

Embora as três formas de transmissão de calor ocorram durante um incêndio, a radiação tende a prevalecer em grandes incêndios reais (Del Carlo).

Devido aos diversos formatos que a chama pode assumir, torna-se complexa a determinação do fluxo de radiação térmica. Para facilitar os cálculos, uma série de simplificações são adotadas, removendo-se a maioria dos parâmetros geométricos do cálculo. Tal método é conhecido como o modelo de "Ponto de Origem" de radiação (McGrattan *et al*, 2000).

Na análise de incêndio de combustível líquido na forma de poça, o modelo de fonte pontual pode ser substituído por modelos específicos de maior precisão (McGrattan *et al*, 2000). Isto é possível, pois tal tipo de incêndio é relativamente mais previsível, além de existirem grandes quantidades de dados experimentais disponíveis na literatura.

Assim, o modelo utilizado para estimar a radiação em incêndios em poça é o de radiação de "chama sólida" (McGrattan *et al*, 2000). Neste modelo, o fogo é idealizado como um cilindro sólido paralelo ao chão, e a emissão de radiação térmica está associada à lateral do sólido, conforme detalhado na Figura 6.10. Tal modelo é relativamente simples, porém requer valores de diâmetro e a altura do cilindro, além da energia emitida. A Figura 6.10 permite compreender a diferença entre os modelos de "ponto de origem" e de "chama sólida".

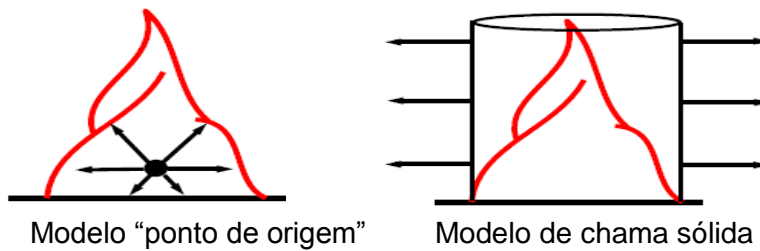


Figura 6.10 – Modelos de incêndio
Fonte: McGrattan, 2000

No modelo de radiação de “chama sólida” o fluxo de radiação térmica (q'') é obtido pela Equação 6.8 (McGrattan, et al., 2000):

$$q'' = F\tau\varepsilon_f E_f \quad (\text{Eq. 6.8})$$

Onde:

q'' = fluxo de radiação térmica (kW/m²)

F = fator de forma (ou “view fator” ou “configuration factor”); (adimensional)

τ = transmissividade atmosférica para a radiação térmica; (adimensional)

ε_f = emissividade efetiva da chama; (adimensional)

E_f = poder emissivo total do fogo na sua superfície. (kW/m²)

Muitos autores adotam, para incêndios maiores do que alguns metros, E_f e τ como sendo aproximadamente 1.

O poder emissivo (E_f) pode ser calculado utilizando a lei de Stefan-Boltzmann (Almeida, 2007):

$$E_f = \varepsilon_f \sigma_{SB} T_f^4 \quad (\text{Eq. 6.9})$$

Onde:

T_f = temperatura média da chama (K)

ε_f = emissividade do corpo sólido que aproxima a geometria da chama

σ_{SB} = constante de Stefan-Boltzmann (5,67 x10⁻⁸ W/m²K⁴)

Outras metodologias correlacionam o diâmetro do incêndio com os valores de poder emissivo (E_f), como se pode observar na Figura 6.11.

McGrattan et al (2000) sugerem a adoção do poder emissivo como sendo 100 kW/m², o que, segundo os autores, seria o valor do poder emissivo para incêndios com querosene e gasolina. Note que este valor é bastante conservativo de acordo com a Figura 6.11, especialmente para diâmetros maiores que 20 metros. Como tanques de armazenagem aqui analisados normalmente contêm esses tipos de combustível, por questão de simplicidade e garantindo uma margem de segurança, foi escolhido este valor para a realização dos cálculos.

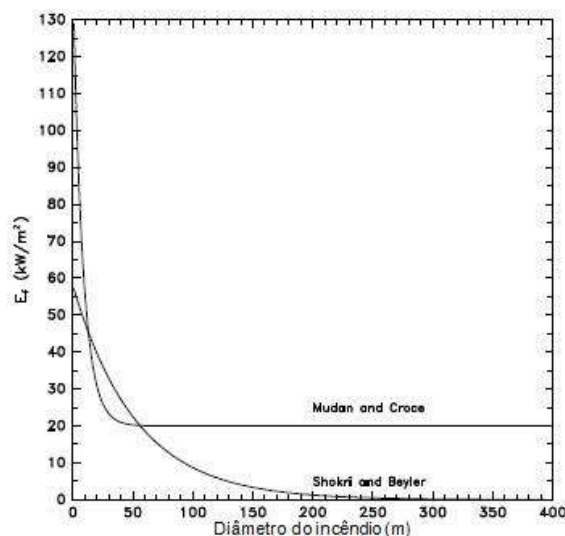


Figura 6.11 Poder emissivo em função do diâmetro do incêndio para um incêndio em poça de gasolina
 Fonte: McGrattan, et al., 2000.

6.4.6 Fator de Forma

Fator de Forma é um parâmetro de grande relevância para o cálculo da transmissão de calor por radiação. O seu emprego 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 criados em um cenário fictício tende a não justificar um maior detalhamento no cálculo do fator de forma. A seguir são apresentadas duas metodologias de cálculo.

a) Método de Tabela:

O método de tabela é o modo mais simples de determinação do fator de forma. A determinação pode ser feita através de dois modelos esquemáticos: o modelo cilíndrico ou de placa plana (Figura 6.12). De modo geral, os modelos esquemáticos tentam englobar a área do incêndio através de figuras geométricas (Figura 6.13). É possível obter o valor do fator de forma através da sua respectiva tabela (Tabela 6.4, para o cilíndrico, e a 6.5, para o de placa plana). A altura do incêndio deve ser admitida como sendo a altura em que “ainda é possível ver suas chamas”, denominada como “altura efetiva”. Este conceito será melhor explicado posteriormente (McGrattan, et al., 2000).

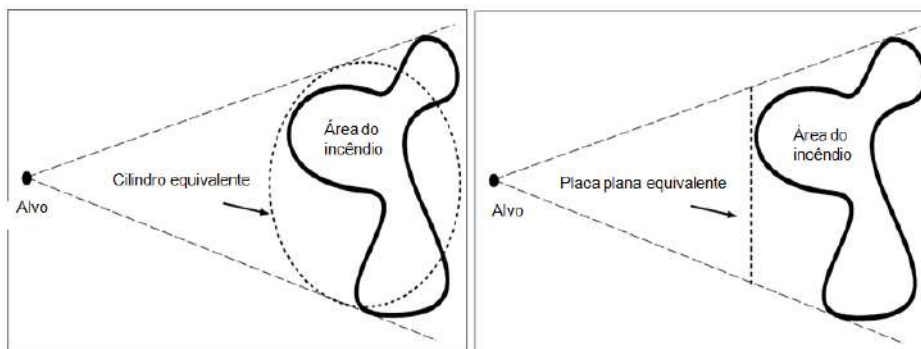


Figura 6.12 Modelos esquemáticos de cilindro e placa plana para cálculo do fator de forma.
 Fonte: McGrattan, et al., 2000.

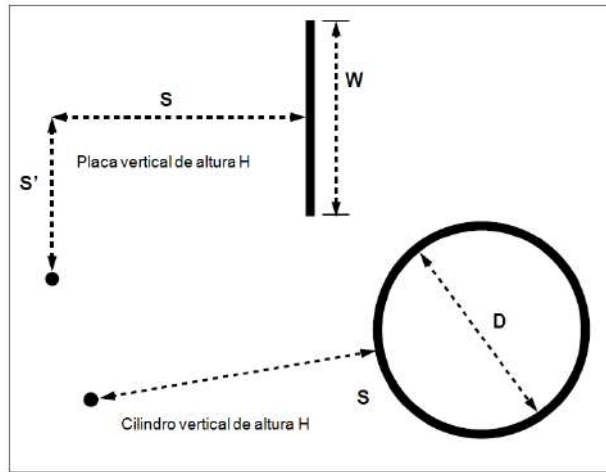


Figura 6.13 Notações usadas para o cálculo do fator F.

Fonte: McGrattan, et al., 2000.

Tabela 6.4: 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 cilindro³

Fonte: McGrattan, et al., 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	0.002	0.002	0.003	0.004	0.004	0.005	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	0.003	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	0.002	0.003	0.003

Tabela 6.5: 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 placa⁴

Fonte: McGrattan, et al., 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	0.001	0.001	0.001	0.001	0.002	0.003	0.003	0.004	0.005	0.005	0.006	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	0.002	0.003	0.003	0.003

³ Ver Anexo

⁴ Ver Anexo

b) Método por equação:

Para formas que não sejam bem representadas pelos modelos cilíndricos e de placa plana é possível adotar a Equação 6.10.

$$F = \int_0^{A_1} \frac{\cos\theta_1 \cos\theta_2}{\pi r^2} dA_1 \quad (\text{Eq. 6.10})$$

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 6.14.

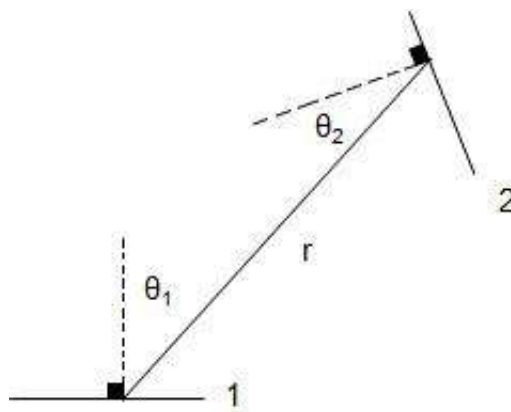


Figura 6.14: Notações usadas para o cálculo do fator F para um elemento pontual (2) exposto a uma radiação de uma superfície (1)
Fonte: Drysdale, 2011.

Devido à complexidade do uso prático da Equação 6.10, a literatura apresenta uma série de equações já deduzidas para as geometrias de maior interesse. Estas equações são específicas, portanto, dependendo da geometria do problema, deve-se procurar a equação mais adequada. A Equação 6.11, por exemplo, trata da geometria apresentada na Figura 6.15. As Equações 6.12 à 6.15, e suas respectivas Figuras 6.16 a 6.19, exemplificam outras geometrias.

$$F_{d1-2} = \frac{1}{2\pi} \left\{ \frac{a}{c(1+(\frac{a}{c})^2)^{1/2}} \tan^{-1} \left[\frac{b}{c(1+(\frac{a}{c})^2)^{1/2}} \right] + \frac{b}{c(1+(\frac{b}{c})^2)^{1/2}} \tan^{-1} \left[\frac{a}{c(1+(\frac{b}{c})^2)^{1/2}} \right] \right\} \quad (\text{Eq. 6.11})$$

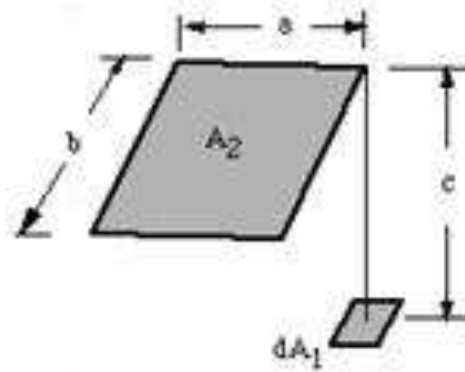


Figura 6.15: Elemento diferencial planar para retângulo paralelo finito.
 A normal ao elemento passa através do canto retângulo
 Fonte: (Howell, acessado em 26 de setembro de 2012)

$$F_{d1-2} = \frac{1}{2\pi} \left\{ \tan^{-1} \left(\frac{b}{c} \right) - \frac{c}{b \left[\left(\frac{a}{b} \right)^2 + \left(\frac{c}{b} \right)^2 \right]^{1/2}} \tan^{-1} \left[\frac{1}{\left[\left(\frac{a}{b} \right)^2 + \left(\frac{c}{b} \right)^2 \right]^{1/2}} \right] \right\} \quad (\text{Eq. 6.12})$$

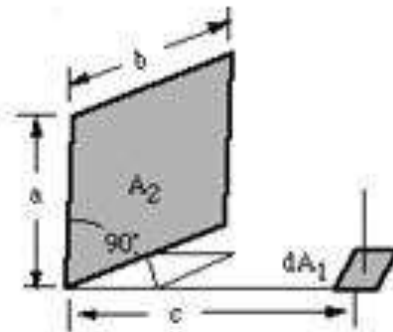


Figura 6.16: Elemento diferencial planar para retângulo em 90° ao plano do elemento e perpendicular a borda do plano
 Fonte: Howell, acessado em 26 de setembro de 2012.

$$F_{d1-2} = \frac{1}{2\pi} \left[\tan^{-1} \left(\frac{b}{c} \right) \cos \theta_i + \tan^{-1} \left(\frac{a}{c} \right) \cos \theta_j + \frac{a \cos \theta_k - \cos \theta_i}{\left[1 + \left(\frac{a}{c} \right)^2 \right]^{1/2}} \tan^{-1} \frac{b}{c \left[1 + \left(\frac{a}{c} \right)^2 \right]^{1/2}} + \frac{b \cos \theta_k - \cos \theta_j}{\left[1 + \left(\frac{b}{c} \right)^2 \right]^{1/2}} \tan^{-1} \frac{a}{c \left[1 + \left(\frac{b}{c} \right)^2 \right]^{1/2}} \right] \quad (\text{Eq. 6.13})$$

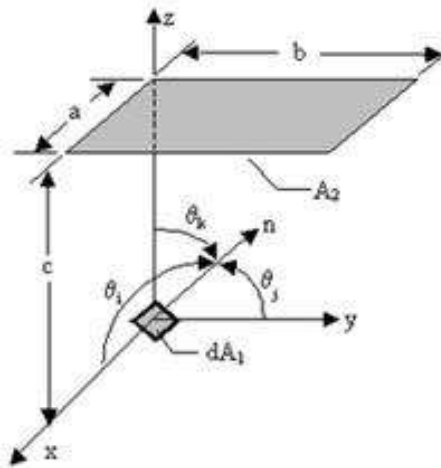


Figura 6.17: A partir do elemento diferencial inclinado em um ângulo arbitrário a um retângulo finito.
 (A₂ não deve passar através do plano de dA₁)
 Fonte: Howell, acessado em 26 de setembro de 2012.

$$F_{d1-2} = \frac{S}{B} - \frac{S}{2B\pi} \left\{ \cos^{-1} \left(\frac{Y^2 - B + 1}{A - 1} \right) + \cos^{-1} \left(\frac{C - B + 1}{C + B - 1} \right) - Y \left[\frac{A + 1}{\sqrt{(A - 1)^2 + 4Y^2}} \cos^{-1} \left(\frac{Y^2 - B + 1}{B^{1/2}(A - 1)} \right) \right] - C^{1/2} \frac{C + B + 1}{\sqrt{(C + B - 1)^2 + 4C}} \cos^{-1} \left(\frac{C - B + 1}{B^{1/2}(C + B - 1)} \right) + H \cos^{-1} \left(\frac{1}{B^{1/2}} \right) \right\} \quad (\text{Eq. 6.14})$$

Onde:

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

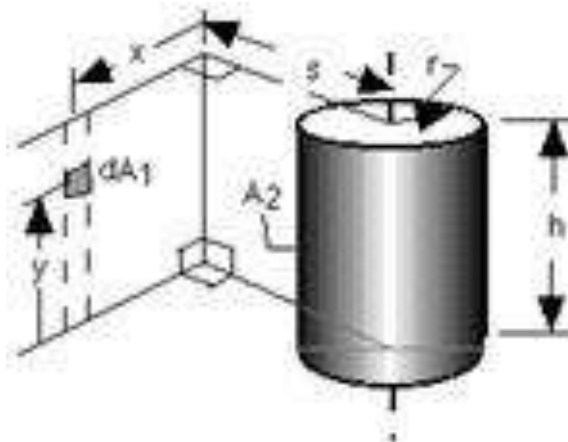


Figura 6.18: Elemento no plano ao exterior do cilindro circular de comprimento finito. O plano não intercepta o cilindro.
 Fonte: (Howell, acessado em 26 de setembro de 2012)

$$F_{d1-2} = \frac{1}{2\pi} \cos^{-1} R + \frac{1}{\pi} \left\{ \tan^{-1} \left[\frac{R}{(1 - R^2)^{1/2}} \right] - \frac{(1 + L^2 - R^2)}{X} \tan^{-1} \left[\frac{X \tan(0,5 \cos^{-1} R)}{1 + L^2 + R^2 - 2R} \right] \right\} \quad (\text{Eq. 6.15})$$

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

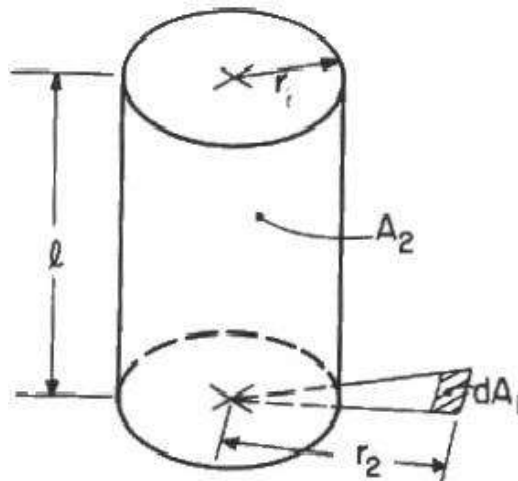


Figura 6.19: Elemento na forma de anel planar ou coaxial em um plano perpendicular ao plano do cilindro de altura finita.
 Fonte: (Howell, acessado em 26 de setembro de 2012)

Deste modo, para estimar o fluxo de calor radiante em um elemento infinitesimal a 6,1 m de uma placa emissora de calor com dimensões 5,1m de altura por 7,6 m de largura, basta aplicar a equação de fator de forma adequada. A Figura 6.19 ilustra este cenário.

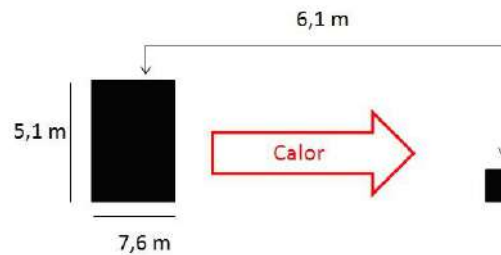


Figura 6.20: Figura ilustrativa do exemplo

Admitindo que o alvo, de tamanho infinitesimal, está paralelo à placa e posicionado em um dos cantos, opta-se pela Equação 6.11 para o cálculo do fator de forma.

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

Onde:

a = 7,6 m

b = 5,1m

c = 6,1 m

Deste modo,

$$F_{d1-2} = \frac{1}{2\pi} \left\{ \frac{7,6}{6,1(1 + (\frac{7,6}{6,1})^2)^{1/2}} \tan^{-1} \left[\frac{5,1}{6,1(1 + (\frac{7,6}{6,1})^2)^{1/2}} \right] + \frac{5,1}{6,1(1 + (\frac{5,1}{6,1})^2)^{1/2}} \tan^{-1} \left[\frac{7,6}{6,1(1 + (\frac{5,1}{6,1})^2)^{1/2}} \right] \right\}$$

Dessa forma, F_{d1-2} é igual a 0,138. Para o cálculo do calor irradiado precisa-se obter as demais variáveis da Equação 6.8. A transmissividade atmosférica (τ) e a emissividade efetiva da chama (ϵ_f) são adotadas como sendo 1, e o poder emissivo total do fogo (E_f) como sendo 100kW/m^2 . Assim,

$$q'' = 0,138 \times 1 \times 100 = 13,8\text{kW/m}^2$$

6.4.7 Altura “efetiva” da chama

Anteriormente foi apresentado como determinar a altura de uma chama. Em virtude da grande quantidade de fumaça gerada durante a combustão, parte da luminosidade da chama é perdida, e por consequência parte de seu potencial radiante. Neste caso, a fumaça age como um corpo negro, como pode ser observado na Figura 6.21 (cilindro preto). Por esta razão, para analisar o comportamento de um incêndio calcula-se a altura da zona luminosa (cilindro branco da Figura 6.21). Esta altura é utilizada para realização dos cálculos de radiação térmica.

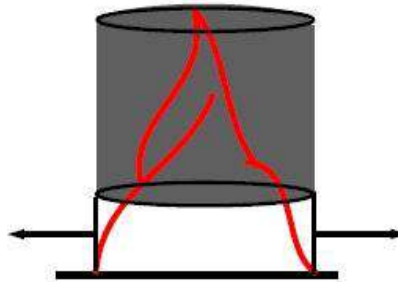


Figura 6.21: Emissão de radiação da zona luminosa.
Fonte: McGrattan, 2000

A altura da região luminosa – ou altura “efetiva” – pode ser determinada utilizando a Equação 6.16.

McGrattan, et al., (2000):

$$H = \frac{X_{rmax} e^{-kD} D q_f''}{4E_f} \quad (\text{Eq. 6.16})$$

Onde:

H = altura da região luminosa (m)

X_{rmax} = fator de ajuste, sendo seu valor máximo de 0,35.

k = constante (m^{-1}) (McGrattan, et al., 2000)

D = diâmetro do incêndio (m)

q_f'' = taxa de emissão de calor por unidade de área (kW/m^2)

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

O valor de X_{rmax} foi estimado a partir de estudos com diferentes combustíveis. A Figura 6.22 ilustra o comportamento de X_r para heptano, óleo cru e querosene (McGrattan et al, 2000). Embora a fração de radiação esteja diretamente relacionada com o diâmetro, o valor máximo de X_r é aproximadamente 0,35, conforme demonstrado por McGrattan et al (2000) (Figura 6.22).

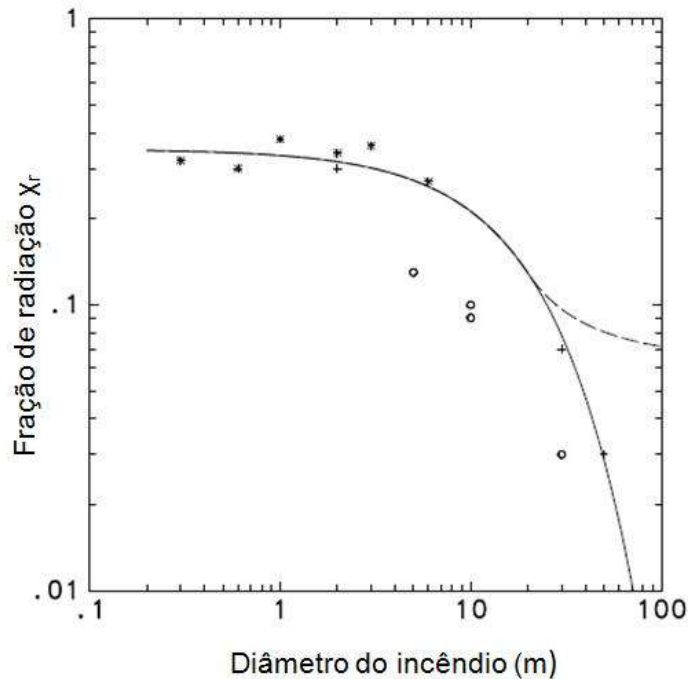


Figura 6.22: Fração de radiação (X_r), em função do diâmetro para heptano (*), óleo cru (o) e querosene (+).
 Fonte: McGrattan, et al., 2000.

A partir dos dados experimentais apresentados na Figura 6.22, é possível deduzir uma correlação empírica que permita quantificar a constante k . Foi proposto o seguinte de X_r em função do diâmetro (D):

McGrattan, et al. (2000):

$$X_r = X_{rmax} e^{-kD} \quad (\text{Eq. 6.17})$$

Ajustando esse modelo aos dados da Figura 6.22 (linha sólida), e assumindo X_{rmax} como sendo 0,35, obtém-se um valor de 0,05 para k .

Entretanto, a Equação 6.17 não é capaz de estimar corretamente a altura da região luminosa para diâmetros maiores que 20m, como é demonstrado na Figura 6.23. Os autores propõem a utilização da Equação 6.18 para abranger esses casos.

McGrattan et al (2000):

$$H = \frac{0,35 e^{-120 q_f''}}{4 \times 100} = 6,4 \times 10^{-3} q_f'' \quad (\text{Eq. 6.16})$$

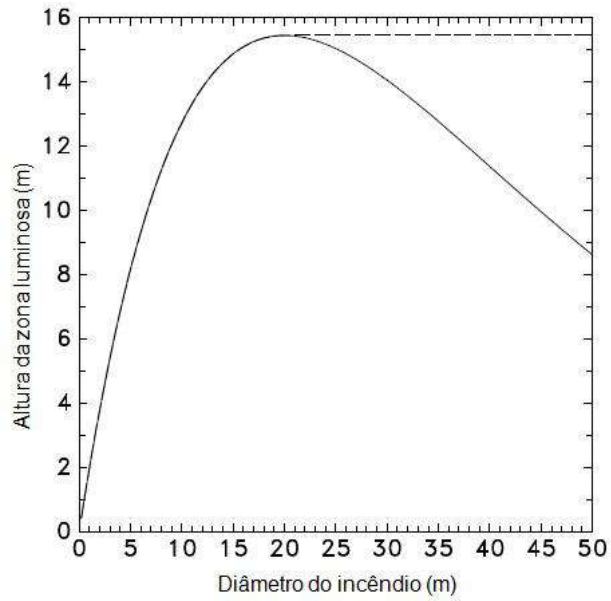


Figura 6.23: Altura da zona luminosa para incêndio a gasolina, onde $X_{r_{max}} = 0,35$, $q_f'' = 2400 \text{ kW/m}^2$, $k = 0,05 \text{ m}^{-1}$ e $E_f = 100 \text{ kW/m}^2$.

Fonte: McGrattan, et al., 2000.

O valor de q_f'' foi determinado pelos autores através da Equação 6.19 (McGrattan et al, 2000):

$$Q = q_f'' A \quad (\text{Eq. 6.19})$$

Onde:

Q = taxa de liberação de calor (kW)

q_f'' = taxa de liberação de calor por unidade de área (kW/m²)

A = área horizontal da poça (m²)

7. Estudo de Caso

O objetivo deste estudo foi determinar a influência que um eventual incêndio nos tanques do TECAM apresentaria sobre a população vizinha ao terminal. Conforme detalhado anteriormente, para um estudo como este é necessário definir os limites considerados seguros para a população em geral. Para tanto se adotou a norma da P4.261 da CETESB de Dezembro de 2011 (2ªed.), anteriormente apresentada. Especificamente, definiu-se como potencialmente letal para seres humanos uma exposição à radiação térmica maior que 35kW/m^2 , esteja a vítima abrigada ou não. Ou seja, a probabilidade de morte em uma zona atingida por uma radiação maior que 35kW/m^2 é virtualmente 100%, conforme norma utilizada.

Todas as equações empregadas neste Capítulo foram apresentadas previamente no texto.

7.1 Letalidade

A norma define que, para exposições a radiações térmicas superiores a 35kW/m^2 , o índice de letalidade humana deve ser considerado como 100%. Para radiações menores, estabelece que, caso a pessoa esteja abrigada, não há risco de vida. Entretanto, para população não abrigada a probabilidade de morte pode ser calculada a partir da Equação 7.1.

$$Pr = -36,38 + 2,56 \ln \left(t \cdot I^{\left(\frac{4}{3}\right)} \right) \quad (\text{Eq. 7.1})$$

Onde:

Pr = probabilidade de fatalidade;

t = tempo de exposição ao incêndio (s);

I = valor do fluxo de radiação térmica (W/m^2).

A Norma CETESB estabelece como tempo de exposição à radiação térmica 20 segundos. No caso particular de formação de bola de fogo, deverá ser utilizado tempo de duração do evento, até o máximo de 20s.

Calcula-se, então, a região de probabilidade de fatalidade de 50% e de 1%.

7.2 Radiação térmica

O valor da radiação térmica foi estimado com base na Equação 7.2:

$$q'' = F\tau\varepsilon_f E_f \quad (\text{Eq.7.2})$$

Onde:

q'' = fluxo de radiação térmica (ou taxa de emissão de calor por unidade de área) (kW/m^2);

F = fator de forma (ou “view fator” ou “configuration factor”) (adimensional);

τ = transmissividade atmosférica para a radiação térmica (adimensional);

ε_f = emissividade efetiva da chama (adimensional);

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

O produto entre a transmissividade atmosférica e a emissividade efetiva da chama pode ser assumido como 1. O poder emissivo total foi assumido como 100kW/m². Como citado no capítulo 6, este valor foi proposto por McGrattan, Baum e Hamins (2000) afim de simplificar os cálculos, uma vez que seria o valor do poder emissivo para incêndios com querosene e gasolina. Caso houvesse interesse em calcular de E_f, o mesmo poderia ser encontrado pela lei de Stefan-Boltzmann (Almeida, 2007):

$$E_f = \epsilon_f \sigma_{SB} T_f^4 \quad (\text{Eq. 7.3})$$

Onde:

T_f = temperatura média da chama (K);

ε_f = emissividade do corpo solido que aproxima a geometria da chama;

σ_{SB} = constante de Stefan-Boltzmann (5,67 x10⁻⁸ W/m²K⁴).

Para as simulações de incêndio em poça foi escolhido o fator de forma representado na Figura 7.1 e descrito na Equação 7.4. Considerou-se como sendo este o que melhor representa a situação de incêndio aqui estudada.

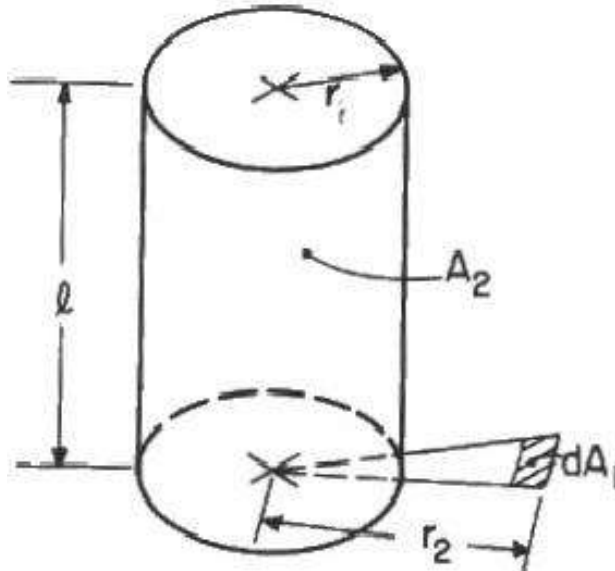


Figura 7.1: Elemento na forma de anel planar ou coaxial em um plano perpendicular ao plano do cilindro de altura finita. Fonte: Howell, 2012.

$$F_{d1-2} = \frac{1}{2\pi} \cos^{-1} R + \frac{1}{\pi} \left\{ \tan^{-1} \left[\frac{R}{(1-R^2)^{1/2}} \right] - \frac{(1+L^2-R^2)}{X} \tan^{-1} \left[\frac{X \tan(0,5 \cos^{-1} R)}{1+L^2+R^2-2R} \right] \right\} \quad (\text{Eq. 7.4})$$

$$\text{Sendo: } R=r1/r2; L= l/r2; X=[(1+L^2+R^2)^2-4R^2]^{1/2}$$

Conforme figura, foi adotado que:

r1 = diâmetro do incêndio em poça;

r2 = distância entre a poça e o elemento;

l = altura do incêndio, que no caso a altura efetiva.

Para calcular a altura efetiva do incêndio foram utilizadas as relações expressas pelas Equações 7.5 e 7.6. A primeira destina-se a diâmetros de poça menores que 20 metros, enquanto a segunda aplica-se para diâmetros maiores.

$$H = \frac{X_{rmax} e^{-kD} D q_f''}{4E_f} \quad (\text{Eq.7.5})$$

$$H = \frac{0,35e^{-120} q_f''}{4 \times 100} = 6,4 \times 10^{-3} q_f'' \quad (\text{Eq.7.6})$$

Onde:

H = altura efetiva;(m);

X_{rmax} = fator de ajustes, sendo seu valor máximo de 0,35;

k = constante (0,05 m⁻¹);

D = diâmetro de poça (m);

q_f'' = taxa de emissão de calor por unidade de área (kW/m²);

E_f = poder emissivo total do fogo na sua superfície (kW/m²).

Por sua vez a taxa de emissão de calor foi obtida a partir da Equação 7.7:

$$Q = q_f'' A \quad (\text{Eq 7.7})$$

Onde:

Q = taxa de liberação total de calor (kW);

q_f'' = taxa de liberação de calor por unidade de área(kW/m²);

A = área horizontal da poça (m²).

Por fim, a taxa de liberação de total calor foi obtida pela Equação 7.8:

$$Q = m'' \Delta H_{c,eff} A_f (1 - e^{-k\beta D}) \quad (\text{Eq. 7.8})$$

Onde:

Q = taxa de liberação total de calor (kW);

m'' = taxa de queima (kg/m². s);

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

A_f = área horizontal de combustível (m²);

$k.\beta$ = constantes empíricas (m⁻¹);

D = diâmetro da área de queima(m).

A taxa de liberação total é uma estimativa do valor total de calor emitido pelo incêndio em poça simulado. A taxa de queima, o calor efetivo e as constantes foram obtidos a partir de dados tabelados, conforme descrito no Capítulo 6. Foram utilizados os combustíveis mais comumente armazenados no TECAM (óleo cru, ou petróleo; e gasolina).

7.3 Cenários avaliados

Para um estudo inicial sobre a influência de um incêndio em tanque sobre as populações vizinhas ao terminal, dois cenários foram aqui avaliados:

7.3.1 Incêndio externo aos tanques

Neste cenário se supõe que, em um evento de rompimento catastrófico de um dos tanques, ocorre liberação de todo o seu conteúdo. Por falta de informação mais detalhada sobre o layout do parque de tancagem do TECAM, assumiu-se que os diques de contenção do derramamento não estão posicionados ao redor de cada tanque, mas sim ao redor da área total do parque de tancagem. Essa hipótese promove uma área superficial de queima maior que aquela obtida para diques individuais, sendo assim, um cenário considerado mais grave. Diante da ausência de informações exatas optou-se pela adoção do cenário mais severo.

A hipótese acima encontra respaldo na descrição apresentada pela norma CETESB:

“Nas áreas onde há sistema de contenção de vazamentos, adotar a superfície da poça como sendo equivalente à área delimitada pela contenção, desde que a quantidade de substância envolvida no vazamento seja suficiente para ocupar toda aquela área.

Nos locais onde não há sistema de contenção de vazamentos, estimar a área de espalhamento da substância considerando-se uma altura máxima da poça de 3 (três) cm.”

Como é muito pouco provável que haja vazamento de mais de um tanque simultaneamente, todas as simulações de vazamento de tanque foram feitas para o derramamento de um único vaso. Adotando-se o pior cenário, empregou-se o tanque com maior volume de operação, que, no caso, é o tanque 1008 (Tabela 7.1).

7.3.2 Incêndio interno ao tanque

Este é o cenário mais comum de ser observado em incêndios industriais envolvendo tanques com líquidos inflamáveis ou combustíveis, onde o incêndio ocorre no interior de um dos tanques. Toda a superfície do líquido estará em chamas, de modo que o diâmetro da poça formada é, deste modo, igual ao diâmetro do tanque.

No caso de incêndio interno ao tanque, o vaso de referência foi aquele com maior diâmetro, ou seja, tanque 1009 (Tabela 7.1).

Tabela 7.1: Informações técnicas dos tanques do TECAM

Fonte: Adaptado de Lemmers, P.H., 2011

TQ	Volume Operacional (m ³)	Altura Operacional (m)	Altura máxima de operação(m)	Altura Mínima de operação (m)	Diâmetro (m)
1001	22 714	11,50	12,80	1,70	54,86
1002	25 789	12,80	12,80	1,80	55,86
1003	25 800	12,80	12,80	1,80	56,86
1004	25 779	12,80	12,80	1,90	54,85
1005	25 779	12,80	12,80	1,90	54,87
1006	25 779	12,80	12,80	1,90	54,87
1007	65 288	12,80	12,80	1,70	54,88
1008	65 357	12,80	12,80	1,70	86,52
1009	64 702	12,80	12,80	1,80	86,54
1010	65 335	12,80	12,80	1,70	86,53

É interessante notar que em cenários reais de incêndio em grandes tanques, ocorre a formação de mais de uma chama, fazendo com que a mesma não seja uniforme e única. Formam-se assim um “aglomerado de chamas”, com diâmetros e alturas diferentes e altamente variantes. Este cenário complexo não foi adotado, assumindo aqui o modelo de chama sólida, ilustrado na Figura 6.10 do capítulo anterior. Desta forma, através desta simplificação, haverá somente uma chama em toda a superfície da poça, independente do seu diâmetro.

Por fim, quando a poça não possui formato circular, como é o caso do cenário de incêndio externo ao tanque, é necessário obter o seu “diâmetro efetivo”, dado pela Equação 7.9.

$$D = 2\sqrt{\frac{A_{sp}}{\pi}} \quad (\text{Eq. 7.9})$$

Onde :

A_{sp} = área superficial (m^2);

D = diâmetro da poça formada (m).

A área superficial foi estimada a partir das imagens aéreas do terminal de tancagem.

As simulações foram realizadas em planilha eletrônica, seguindo a metodologia descrita ao longo do texto. Os resultados obtidos são apresentados e discutidos abaixo.

7.4 Resultados

7.4.1 Incêndio externo aos tanques

Para o cenário de vazamento seguido de incêndio é necessário conhecer a área total onde a poça será formada. A partir desta área total pode ser estimado o diâmetro efetivo da poça. Este parâmetro é, obviamente, fundamental, pois, como visto na seção anterior, os cálculos são baseados no diâmetro da poça. Neste estudo foi admitindo que todo o espaço físico do parque de tancagem foi tomado pela gasolina.

Os modelos apresentados foram implementados em planilha eletrônica, e os dados obtidos exportados para tabelas, permitindo melhor compreensão dos resultados.

Na Tabela 7.2, a coluna “Q” é a taxa de calor total liberada pelo incêndio, enquanto a coluna “h” representa a altura efetiva da chama. Como o diâmetro da poça é maior que 20m, utilizou-se a Equação 7.6.

As últimas três colunas da tabela fazem referência às distâncias entre o foco do incêndio e regiões com diferentes probabilidades de fatalidade por radiação. Na primeira apresenta-se a distância para que haja 100% de fatalidades, na segunda para uma probabilidade de fatalidade de 50% e, na última, de 1%.

As distâncias do foco ao alvo foram sempre calculadas do centro do incêndio (centro da poça) até o objeto (Figura 7.1).

Tabela 7.2 Dados obtidos para incêndio em piscina contido no TECAM

	Q (kW)	h (m)	Distância do foco ao alvo (m)		
			q" 35kW/m ²	50% de morte	1% de morte
Gasolina	708.296.740,60	15,4	363	978	1045
Petróleo	566.254.290,40	12,3	368	979	1045

A partir dos parâmetros calculados é possível construir figuras que ilustram, de modo mais claro, a região afetada. Na Figura 7.2, a curva azul representa a área da poça, enquanto a curva em vermelho demarca a região na qual, segundo norma CETESB, haverá 100% de fatalidade. Observa-se que a distância entre a curva azul e a curva vermelha é muito pequena, logo, pouca ou nenhuma população externa a empresa será afetada por esta consequência.

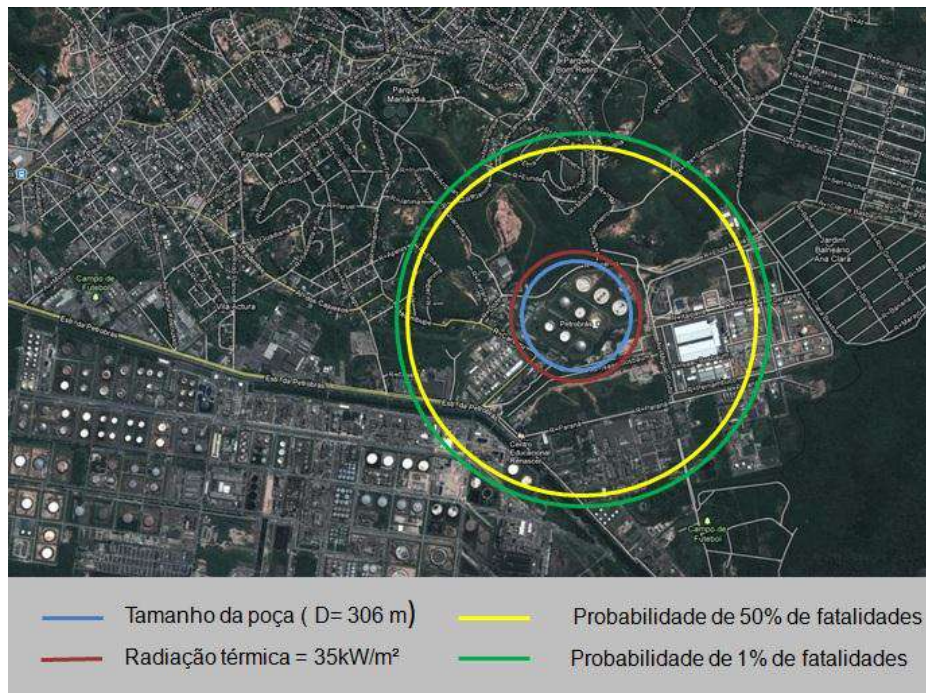


Figura 7.2 Zonas de risco para vazamento com contenção (escala 1,75 cm : 500 m)

Por outro lado, a curva amarela representa 50% de chance de fatalidade para pessoas desabrigadas. Como é possível observar na figura 7.2, a área demarcada pela curva engloba regiões possivelmente habitadas, podendo ocasionar vítimas externas a empresa. Por fim, a curva verde representa 1% de chance de fatalidades, sendo apenas levemente maior que aquela demarcada em amarelo.

Embora os tamanhos das regiões demarcadas pelas curvas vermelhas e amarelas a princípio pareçam muito discrepantes, isto pode ser explicado através do modo de cálculo da probabilidade de fatalidade adotado pela norma. É considerado como 100% o valor de radiação igual ou superior a 35 kW/m², entretanto, aplicando este valor no modelo matemático obtém-se valor que excede em 700% o valor de 100% de fatalidade.

Finalmente, é importante ressaltar que os valores encontrados para vazamentos de gasolina e de petróleo são muito próximos. Isto ocorre, pois os valores de $k\beta$, m'' e $\Delta H_{c,eff}$ são similares, como

pode-se ver na Tabela 7.3. Dessa forma, para as simulações de incêndio envolvendo estes dois combustíveis, o diâmetro de poça acaba tendo um peso maior sobre os cálculos do que a substância usada.

Tabela 7.3 Valores das constantes para Gasolina e Petróleo

Fonte: FTD, 2004

Combustível	Taxa de queima (kg/m ² .s)m ³	Calor efetivo de combustão (kJ/kg) ΔH _{c,eff}	k.β(m ⁻¹)
Petróleo	0,022 a 0,045	42.500 a 42.700	2,8
Gasolina	0,055	43.700	2,1

7.4.2 Incêndio interno ao tanque

Conforme mencionado, incêndios no interior de tanques são os cenários que ocorrem com mais frequência em parques de tancagem reais. O fogo, neste caso, fica contido no tanque, sem que o inventário se disperse pelo parque. Neste caso, o diâmetro da poça formada será o do próprio tanque.

Os resultados são apresentados nas tabelas 7.4 e 7.5. A coluna “Tanque” se refere ao código do tanque no TECAM (Tabela 7.1); o “Volume de operação” é o volume contido no tanque quando este encontra-se cheio; a terceira coluna é o diâmetro interno do tanque (D), que será também o diâmetro da poça formada; a quarta coluna é a área superficial da poça; e, por sua vez, “H” é a altura da chama e “Q” a taxa de emissão de calor.

Como na Tabela 7.2, as últimas três colunas fazem referência às distâncias entre o centro do incêndio e regiões com diferentes probabilidades de fatalidade. A Tabela 7.4 foi construída supondo que os tanques contenham somente petróleo, enquanto a Tabela 7.5 supõe o armazenamento de gasolina.

Como pode-se observar em ambas as tabelas, os valores das distâncias de foco ao alvo, e a taxa de calor liberado (Q), variam conforme o tamanho da poça (D). Deste modo, o tanque que forma a maior poça (Tanque 1009) apresenta maiores valores para estes parâmetros. É importante observar ainda que neste caso, diferente do cenário anterior, a maior poça não é formada pelo tanque que contém o maior volume de combustível, mas sim o de maior diâmetro.

Tabela 7.4 Dados obtidos para incêndio em piscina com petróleo – incêndio no tanque.

Petróleo								
Tanque	Volume de operação (m ³)	D (m)	Área superficial da poça (10 ³ x m ²)	H(m)	Q(kW)	Distância do foco ao alvo (m)		
						q" 35kW/m ²	50% de probabilidade de morte	1% de probabilidade de morte
1001	22.714	54,86	2,364	12,3	4.541.945,06	31,71	88,07	94,11
1002	25.789	55,86	2,451	12,3	4.709.037,33	32,31	89,66	95,81
1003	25.800	56,86	2,539	12,3	4.879.147,88	32,91	91,25	97,50
1004	25.779	54,85	2,363	12,3	4.540.289,38	31,71	88,08	94,13
1005	25.779	54,87	2,365	12,3	4.543.601,04	31,71	88,08	94,13
1006	25.779	54,87	2,365	12,3	4.543.601,04	31,71	88,08	94,13
1007	65.288	54,88	2,366	12,3	4.545.257,33	31,72	88,10	94,16
1008	65.357	86,52	5,879	12,3	11.297.004,24	50,75	138,48	147,93
1009	64.702	86,54	5,882	12,3	11.902.227,68	50,76	138,51	147,96
1010	65.335	86,53	5,881	12,3	112.99.615,81	50,75	138,48	147,93

Tabela 7.5 Dados obtidos para incêndio em piscina com gasolina – incêndio no tanque

Gasolina								
Tanque	Volume de operação (m ³)	D (m)	Área superficial da poça (10 ³ x m ²)	H(m)	Q(kW)	Distância do foco ao alvo (m)		
						q" 35kW/m ²	50% de probabilidade de morte	1% de probabilidade de morte
1001	22.714	54,86	2,364	15,4	5.681.272,42	31,39	88,31	94,11
1002	25.789	55,86	2,451	15,4	5.890.279,06	32,31	89,66	95,81
1003	25.800	56,86	2,539	15,4	6.103.061,11	32,54	91,48	97,79
1004	25.779	54,85	2,363	15,4	5.679.201,42	31,37	88,30	94,43
1005	25.779	54,87	2,365	15,4	5.683.343,80	31,37	88,21	94,43
1006	25.779	54,87	2,365	15,4	5.683.343,80	31,37	88,21	94,43
1007	65.288	54,88	2,366	15,4	5.685.415,55	31,36	88,34	94,44
1008	65.357	86,52	5,879	15,4	14.130.809,10	50,45	138,65	148,13
1009	64.702	86,54	5,882	15,4	14.137.342,82	50,46	138,67	148,15
1010	65.335	86,53	5,881	15,4	14.134.075,77	50,45	138,65	148,13

Devido à menor área superficial das poças formadas, as regiões afetadas pelo o incêndio também se tornam menores. Deste modo, a redução do diâmetro de poça em relação ao cenário anterior, teve efeito significativo sobre as regiões marcadas na Figura 7.3. A Figura baseia-se nos valores encontrados para o tanque de maior diâmetro.



Figura 7.3 Zonas de risco para vazamento com contenção (escala 2,1 cm : 100 m)

Conforme observado, no caso anterior o risco se estendia não apenas aos funcionários do TECAM, mas também para a população dos arredores e trabalhadores de empresas vizinhas (Figura 7.2). Porém, no cenário de incêndio dentro de tanque, a região afetada se limita ao interior do Terminal, conforme ilustrado na Figura 7.3. Deste modo, não afeta a população externa. Ressalta-se que o tanque assinalado na Figura 7.3 apresenta-se em área mais isolada do terminal.

Na Figura 7.3 o tanque de maior diâmetro foi marcado em sua posição real no TECAM, de modo a obter um resultado crível. Todavia, no caso do tanque não estar localizado na posição indicada na Figura 7.3, mas sim naquela marcada na Figura 7.4, os efeitos do incêndio sobre os funcionários do TECAM seriam muito mais significativos – embora a população externa permaneça segura. Ou seja, o posicionamento dos tanques afeta a região afetada pelo incêndio, e suas consequências sobre os trabalhadores do TECAM.

8. CONCLUSÃO

A partir da aplicação das equações notou-se que os valores obtidos para as taxas de radiação dos dois diferentes combustíveis empregados (óleo cru e gasolina) eram muito próximos. Ou seja, o combustível armazenado nos tanques apresentou pouca influência na análise da severidade dos cenários e maior impacto no cálculo da altura efetiva da chama. O diâmetro de poça, por outro lado, mostrou ser o fator de maior relevância no cálculo da radiação emitida e dessa forma, para os limites sugeridos pela Norma técnica CETESB (Dez/2011). A princípio os próprios operários do TECAM estariam sujeitos aos maiores riscos nos cenários acidentais avaliados, devido a sua proximidade com o incêndio, entretanto, a Norma somente se preocupa com a parte externa ao parque.

A população externa vizinha ao TECAM apenas seria afetada no caso de vazamento do combustível contido em um dos tanques. Observa-se que vazamentos de material líquido seguidos de incêndio são ainda menos prováveis que incêndios no interior de tanques. Deste modo, o cenário cuja severidade afeta a população é altamente improvável. Dessa forma, é possível admitir que o entorno do parque não sofrerá impactos relacionados aos acidentes, já que o caso mais provável, incêndio interno ao tanque, não causa danos ao exterior do TECAM, em se tratando de incêndio em poça. O cálculo da probabilidade de cada cenário ultrapassa o escopo deste estudo.

Este estudo avaliou apenas o incêndio no interior de um único tanque, não prevendo cenário onde mais de um vaso seja atingido simultaneamente. Neste caso, a severidade poderia aumentar de forma significativa. A avaliação da propagação das chamas entre tanques, e a severidade do cenário envolvendo incêndio simultâneo em vários tanques fica como proposta para trabalhos futuros. Adicionalmente, ressalta-se que o tamanho adotado para a poça formada no caso de vazamento envolveu todo o terminal, excluindo a possibilidade de haver diques englobando um ou mais tanques. O emprego de diques de contenção menores, em volta de poucos ou apenas um único tanque reduziria fortemente a severidade deste cenário. O uso de dados reais para os diques instalados no TECAM, vazamento de mais de um tanque em diques distintos, propagação de incêndio entre tanques, avaliação da radiação emitida pelos mesmos e avaliação do mesmo modelo para outros parques, como a Refinaria de Manguinhos, são sugestões de futuros estudos.

Referências Bibliográficas

ABNT BR 17505-1 “Armazenamento de líquidos inflamáveis e combustíveis”, 2006.

ABNT BR 7821, “Tanques soldados para armazenamento de petróleo e Derivados”, 1983.

ALMEIDA, R.M. “Modelo de Propagação do fogo em Incêndios de Superfícies Baseado no Método Nodal”, Dissertação (Mestrado em Computação Aplicada), Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. 2007.

ANP - Agencia Nacional de Petróleo, Gás e Biocombustíveis - Produção Nacional de Derivados de Petróleo, 2011.

ARAUJO, A.J.S. “Paradoxos da modernização: terceirização e segurança em uma refinaria de petróleo”, Araújo Anísio José da Silva, [Doutorado] Fundação Oswaldo Cruz, Escola Nacional de Saúde Pública; 2001.

ARXO, Disponível em:< <http://www.arxo.com/web/>>, Acessado em: agosto e 2012.

ASCA, Catálogo de Produtos, Minas Gerais, 2012,
<<http://www.asca.com.br/produtos/index.asp>> Acessado em setembro de 2012.

BLAGOJEVIC, M.D; PESIC, D.J, “A new curve for temperature-time relationship in compartment fire”. In: *Thermal Science International Scientific Journal*, v. 15, n. 2, p. 339-352. Ano, 2011.

BOALER, G. “Protecting Steel in Fire”; Disponível em:< <http://www.leighspaints.com/en/techHydrocarbonFire.aspx>>; Acesso em: 22 jul.2012.

BOMBEIROS, Empresa de Engenharia, Catálogo de Produtos, 2012.

BRABAUSKA, V. “(b) Pools”, Disponível em:
<<http://fire.nist.gov/bfrlpubs/fire92/PDF/f92029.pdf>>; Acesso em: 7 ago.2012.

CETESB, Norma Técnica P4.261 “Risco de Acidente de Origem Tecnológica - Método para decisão e termos de referência”, 2ª Edição, 2011.

CHEMGUARD, Catálogo de Produtos, Câmaras de Espuma, 2012.
< <http://www.chemguard.com/index.htm>> Acessado em setembro de 2012.

CHERNOVSKY, F. G. M. K; KYTOMAA, H. K. “Modelling Pool Fire Hazards from Large-scale Liquefied Natural Gas Spills”. In: *Exploration & Production – Oil & Gas Review 2008*. v. 6 n. 2 Londres: Touch Briefings, 2008

CORPO DE BOMBEIROS MILITAR DO ESTADO DO RIO DE JANEIRO, “Apostila de prevenção e combate a incêndio”, Rio de Janeiro. 2008.

CROWL, D.A; LOUVAR, J.H, “Chemical Process Safety, Fundamentals with Applications”, 3. ed. Nova Jersey: Prentice Hall PTR, 2011.

CORREIO BRAZILIENSE, Disponível em:<<http://www.correiobraziliense.com.br/>>, Acessado em: outubro de 2012.

COSTA, P. "A evolução da atividade de refino no Brasil e a presença do estado: a criação do Conselho Nacional do Petróleo e da Petrobras", Pierre Costa e Sandra L. Videira, Universidade Federal Fluminense, S/D.

COSTA, P. "O maior acidente da Refinaria de Duque de Caxias (RJ)-Brasil: Um estudo geográfico-histórico", Pierre Costa, Revista Geográfica de América Central, 2011.

DIRECTIVA SEVESO 82/501/CEE "Los riesgos de accidentes graves em determinadas actividades industriales", 1982.

DEL CARLO, U. "O Fogo como Ciência Engenharia de Segurança Contra Incêndio".

DREAMSTIME, Disponível em:<<http://www.dreamstime.com/>>, Acessado em: setembro de 2012.

DRYSDALE, D. "An Introduction to Fire Dynamic's", 3.ed. Nova Jersey: John Wiley & Sons, 2011.

DYNAMIC AIR, Disponível em:<<http://www.dynamicair.com/pdf/20037-br.pdf>> Acessado em: setembro de 2012.

EMCOIKE Petroleum, "Película flutuante", Disponível em: setembro de 2012.

<http://www.emcoike.com.br/Produtos_PeliculaFlutuante.asp>, Acessado em: setembro de 2012.

EXAME, "Incêndio em refinaria se propaga para terceiro tanque", Disponível em:<<http://exame.abril.com.br/mundo/noticias/incendio-em-refinaria-se-propaga-para-terceiro-tanque>>, Acessado em: setembro de 2012.

E.W BRASIL,"Selo flutuante", Disponível em:<http://www.ewbrasil.com/selo_flutuante.htm>, Acessado em : setembro de 2012.

FACTOTUM, Disponível em: <<http://www.factotumcomercial.com.br/site/>>, Acessado em: setembro de 2012.

FLORIDO, J.A.A. "Prevention of Major Accidents in the Oil & Gas Industry", 2011.

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.

HOWELL, J.R. "B-3: Differential planar element to finite parallel rectangle. Normal to element passes through corner of rectangle".

Disponível em:< <http://www.me.utexas.edu/~Howell/sectionb/B-3.html>>; Acessado em: 26 set. 2012.

HOWELL, J.R. "B-4: Differential planar element to rectangle in plane 90° to plane of element and perpendicular to corner of plane".

Disponível em:<<http://www.me.utexas.edu/~Howell/sectionb/B-4.html>> ; Acesso em: 26 set. 2012.

HOWELL, J.R. "B-5: From differential element tilted at arbitrary angle to a finite rectangle. (A2 must not pass through plane of dA1)".

Disponível em: < <http://www.me.utexas.edu/~Howell/sectionb/B-5.html>>; Acesso em: 26 set. 2012.

HOWELL, J.R. "B-32: Element on plane to exterior of right circular cylinder of finite length. Plane does not intersect cylinder".

Disponível em: <<http://www.me.utexas.edu/~Howell/sectionb/B-32.html>>; Acesso em: 26 set. 2012.

J. DE LONGE FLOWSYSTEMS, "Drenos para teto flutuante",

Disponível em: <<http://www.jdejonge.nl/tecnologia-de-carga/drenos-para-teto-flutuante/?L=5>>, Acessado em: setembro de 2012.

Kaizen Quality Management, "Piso Cimentício atérmico, verdade ou mito?"

Disponível em: <<http://www.kqm.com.br/blog.php?post=221>>, Acessado em : 29 jul. 2012.

LEHANE,P LEYDON, C;. "Performance of Intumescent Fire Protection Coatings in Non-Standard Heating Scenarios" Disponível em <http://playingwithfires.weebly.com/standard-iso-834.html>>; Acesso em: 2 ago. 2012.

LEMMERS, P.H. " Avaliação Da Estrutura De Prevenção E Combate A Incêndios Da Tancagem De Líquidos Inflamáveis Do Tecam – Terminal De Campos Elíseos – Transpetro" , Pedro Henrique Lemmers, Monografia em Engenharia de Segurança do Trabalho, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2012.

LIONE, D.S. "Investigação por simulação dinâmica para automação da drenagem de esfera de GLP", Diego da Silva Lione, João Márcio Almeida Villaça e Leonardo Salim Damian Aguiar, Graduação em Engenharia Química, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2011.

LOPEZ, C. "Thermal Testing", Disponível em <http://www.sandia.gov/tp/thermtest.htm>>; Acesso em: 29 jul.2012.

MAIA, C. "Tanques de Armazenamento", Cristiane Maia e Ricardo Aurélio, Instituto Federal da Bahia, 2012.

MARTINS, D.O. "Estudo do controle de emissões de compostos orgânicos voláteis em tanques de armazenamento de produtos químicos", Dirceu de Oliveira Martins, Mestrado Profissional em Gerenciamento e Tecnologias Ambientais no Processo Produtivo, Universidade Federal da Bahia, 2004.

MCGRATTAN, K.B; HAMINS, A; BAUM,H.R; "Thermal Radiation for Large Pool Fires", 35 f. National Institute of Standards and Technology. 2000.

NOGUEIRA, L. "Análise da resistência de membros estruturais de plataformas offshore durante incêndios". 66 f. Projeto de fim de curso (Graduação em Engenharia Naval). Universidade Federal do Rio de Janeiro. 2007.

NR 20, "Líquidos Combustíveis e inflamáveis", Disponível em: < http://portal.mte.gov.br/data/files/FF8080812BE914E6012BF2CE145146B7/nr_20.pdf>, Acessado em: 9 de fev. 2013.

NUREG, "Fire Dynamics Tools (FDTs) Quantitative Fire Hazard Analysis Methods for the U.S, Nuclear Regulatory Commission Fire Protection Inspection Program (1805, Final Report), 2004–Disponível em

:<<http://www.nrc.gov/reading-rm/doc-collections/nuregs/staff/sr1805/final-report/>>, Acesso em: 10 de jul. 2012.

PETROBRAS, Normas N-270 “Projeto de Armazenamento de Tanques Atmosféricos”, 2010.

PONTES, R.O. “Modelo matemático para explosões em transformadores”, 83 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção), Universidade Federal de Pernambuco.2001

PROTEGO®, “Equipamento de Segurança e Meio Ambiente, Catálogo de Produtos”, 2012. , Disponível em: <<http://www.protego.com/pt/produtos/>>, Acessado em: setembro de 2012.

PUIATTI, R. “Acidentes Ampliados – OIT 174”, Roque Puatti, in: 7a COTEQ - Conferência sobre Tecnologia de Equipamentos, MTE/DRT/RS, 2011.

RAMOS, A.L.D. “Refino do petróleo e indústria petroquímica” André Luis Dantas Ramos e Alexandre Ferreira Santos, 36f., (Mestrado em Engenharia de Processos), PEP/NDTR/UNIT.

RAULINO, S. F. “Construções sociais da vizinhança: temor e consentimento nas representações dos efeitos de proximidade entre grandes empreendimentos industriais e populações”, Sebastião Fernandes Raulino, Tese de doutorado, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2009.

SIMAO, L.M. “Otimização da programação da produção de refinarias de petróleo utilizando algoritmos genéticos e co-evolução cooperativa”, Leonardo Mendes Simão, 2005.

Disponível em :

<http://www.maxwell.lambda.ele.puc-rio.br/Busca_etds.php?strSecao=resultado&nrSeq=5969@1>
Acessado em: 20 agosto de 2012.

STEINMACHER,F.R. “Dimensionamento e instalação de válvulas de controle, de segurança e de alívio na Refinaria REPAR”, Fernanda R. Steinmacher, 150f., Universidade Federal de Santa Catarina (Graduação em Engenharia Química),2007.

TECMESUL, Disponível em: <<http://www.tecmesul.com.br/site/>>, Acessado em: setembro de 2012.

VALEQ,"Produtos",

Disponível em :<<http://www.valeq.com.br/scr/produtos.asp>>, Acessado em: setembro de 2012.

VEJA,"Explosão em refinaria choca Venezuela com 39 mortes", Disponível em:<<http://veja.abril.com.br/noticia/internacional/explosao-em-refinaria-choca-venezuela-com-39-mortes%2001/09/12>>, Acessado em: setembro de 2012.

VEJA, "Após três dias, bombeiros controlam incêndio em refinaria", Disponível em:<<http://veja.abril.com.br/noticia/internacional/venezuela-controla-incendio-apos-acidente-fatal-em-refinaria>>, Acessado em: setembro de 2012.

ZALOSH, R. G.; *Industrial Fire Protection Engineering*, Nova Jersey: John Wiley & Sons, 2003.

ZILIO, E.L. “Identificação e distribuição dos principais grupos de compostos presentes nos petróleos brasileiros”, Evaldo López Zílio e Ulysses Brandão Pinto, Boletim Técnico da Petrobras, 2002.

ZONNO, I.V. “A situação atual da análise de risco na atuação da ANP”, Isabella do Valle Zonno, Valdir Pessoa, Hubmaier Andrade, Universidade Federal do Rio de Janeiro.

ANEXO

Tabela 6.4: 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: McGrattan. et al.. 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	0.001	0.002	0.002	0.003	0.003	0.003	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	0.002	0.003	0.003

Tabela 6.5: 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: McGrattan, et al., 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	0.006	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