

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

**DETERMINAÇÃO DOS EFEITOS TÉRMICOS CAUSADOS POR INCÊNDIO EM UM
TANQUE DE ARMAZENAMENTO DE LÍQUIDO INFLAMÁVEL DE GRANDES
PROPORÇÕES E SUAS RELAÇÕES COM O PLANO DE ATENDIMENTO DE
EMERGÊNCIA (PAE)**

Por
Narciso Ruzzarin

Orientador:
Pablo Ricardo Barrera

Porto Alegre, Julho de 2011.

**DETERMINAÇÃO DOS EFEITOS TÉRMICOS CAUSADOS POR INCÊNDIO EM UM
TANQUE DE ARMAZENAMENTO DE LÍQUIDO INFLAMÁVEL DE GRANDES
PROPORÇÕES E SUAS RELAÇÕES COM O PLANO DE ATENDIMENTO DE
EMERGÊNCIA (PAE)**

Por

Narciso Ruzzarin
Engenheiro Químico

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

Especialista

Orientador: Prof. Esp. Pablo Ricardo Barrera

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

Porto Alegre, Julho de 2011.

Agradecimentos:

À minha esposa Michelli, pela compreensão das noites perdidas no convívio familiar e a pequenina Júlia, pelos mais belos sorrisos.

RESUMO

Incêndios em reservatórios de líquidos inflamáveis produzem conseqüências danosas às instalações, pessoas e meio ambiente. Na Engenharia de Segurança de Processos se estudam estes cenários e as possíveis conseqüências destes riscos tecnológicos provenientes de um processo industrial. Vários métodos são utilizados para determinar os efeitos térmicos causados pelos elevados fluxos térmicos radioativos originados dos grandes incêndios. O principal objetivo da determinação quantitativa dos efeitos térmicos causados pelos incêndios é determinar as regiões de risco ao redor do tanque sinistrado, servindo de subsídio para a criação dos Planos de Atendimento a Emergência. Os Planos de Atendimento a Emergência (PAE) são importantes instrumentos que devem ser desenvolvidos pelas empresas para determinar as ações, responsabilidades e meios a serem aplicados para o controle adequado de situações críticas que podem por em risco a integridade das instalações, pessoas, meio ambiente e comunidade circunvizinha. O último nível de documentação que integra um PAE são as ações táticas que devem ser colocadas em prática numa emergência, baseadas em informações técnicas a respeito de cada cenário esperado e suas possíveis conseqüências. Este trabalho tem por objetivo determinar o efeito térmico causado nos equipamentos adjacentes e no pessoal envolvido no atendimento a uma emergência ocorrida pelo incêndio de um reservatório de armazenamento de líquido inflamável de grande proporção, assim como definir as zonas seguras de atuação para a equipe e as recomendações para minimizar os danos do efeito térmico.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1- Incêndio ocorrido na Orion Norco Oil Refinery em Junho de 2001.	10
Figura 2 - Características térmicas de incêndios para líquidos, sólidos e auto-oxidantes.	14
Figura 3 - Tempo de exposição necessário para atingir o limiar de dor	17
Figura 4 - Zonas de exposição para bombeiros devidamente protegidos.	19
Figura 5 - Imagem de satélite do tanque sinistrado e equipamentos adjacentes.	25
Figura 6 - Croqui do tanque sinistrado e principais distâncias.	26
Figura 7 - Processo de determinação de incêndio em poça	29
Figura 8 - Conversão de Probit para porcentagem.	39
Figura 9 - Relações trigonométricas para determinação de R e $\cos \theta$	42
Figura 10 - Distribuição de fluxos térmicos pelo modelo de Chama Sólida	45
Figura 11 - Tempos para sentir dor (t_p) e tempo para queimadura de segundo grau (t_{2b}).....	46
Figura 12 - Tempo necessário de exposição sem proteção para atingir 50% de letalidade numa amostra de pessoas envolvidas.	48
Figura 13 - Aproximação da Figura 11 para a região de máximo fluxo de calor	49
Figura 14 - Região de fluxo térmico máximo e fluxo crítico.	50
Figura 15 - Zonas de risco.....	52

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Grandes incêndios mundiais envolvendo estocagem de inflamáveis.....	9
Tabela 2 - Recomendação de níveis de radiação por zonas	18
Tabela 3 - Efeitos da Radiação Térmica (CCPS, 1999 por World Bank, 1985).....	18
Tabela 4 - Dimensões do equipamento envolvido	24
Tabela 5 - Propriedades físico-químicas importantes	27
Tabela 6 - Fração da energia total convertida em radiação para Hidrocarbonetos	34
Tabela 7 - Resultados do fluxo de calor para o modelo de Ponto de Origem	42
Tabela 8 - Resultados do fluxo de calor para o modelo de Chama Sólida	44
Tabela 9 - Comparação entre os fluxos de calor para os dois modelos	44
Tabela 10 - Fluxos térmicos para equipamentos vizinhos à mesma altura	46
Tabela 11 - Fluxo térmico, temperatura superfície e tempo necessário para 50% de probabilidade de morte (Y=5).....	48

LISTA DE SÍMBOLOS

g	aceleração da gravidade	(9,81m/s ²)
H_f	altura total da chama	(m)
θ	ângulo entre a horizontal e a distância R	(rad)
A_f	área da chama “vista” pelo alvo	(1m ²)
A_s	área de queima	(m ²)
Δh_c	calor de combustão	(kJ/kg)
σ	constante de Stefan-Boltzmann	(5,676x10 ⁻¹¹ kW/m ² K ⁴)
D	diâmetro do tanque	(m)
X_s	distância da perpendicular	(m)
R	distância entre o centro da altura da chama e o alvo	(m)
x	distância entre o costado do tanque e o alvo	(m)
t	duração da exposição	(s)
ε	emissividade atmosférica	(adimensional)
F_{12}	fator de vista para o modelo de chama sólida	(adimensional)
q''	fluxo de calor	(kW/m ²)
x_r	fração radiante	(adimensional)
I	intensidade da radiação térmica	(W/m ²)
ρ	massa específica	(kg/m ³)
ρ_0	massa específica do ar atmosférico	(kg/m ³)
P_w	pressão atmosférica	(Pa)
Q	taxa de calor	(W)
\dot{m}''	taxa de queima por unidade de área	(kg/m ² · s)
\dot{m}	taxa mássica	(kg/s)
T_0	temperatura atmosférica	(K)
T_f	temperatura do centro da chama	(K)
T_s	temperatura na superfície de um objeto	(K)
t_b	tempo de queima	(s)
t_p	tempo para início da sensação de dor	(s)
t_{2b}	tempo para ocorrer queimaduras de segundo grau	(s)
ζ	transmissividade atmosférica	(adimensional)
URA	umidade relativa do ar	(%)
Y	valor de Probit	(adimensional)
α	velocidade de queima	(m/s)
V	volume de produto que irá queimar	(m ³)

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	9
2.	ANÁLISE DE RISCO DE INCÊNDIO	12
2.1	EFEITOS TÉRMICOS	13
2.2	EFEITOS EM EQUIPAMENTOS E ESTRUTURAS	14
2.3	EFEITOS EM PESSOAS	15
2.4	CURVAS DE PROBIT	20
2.5	PLANOS DE ATENDIMENTO A EMERGÊNCIA (PAE)	21
3.	CASO ANALISADO	24
3.1	OBJETIVO DO ESTUDO	24
3.2	DESCRIÇÃO DO EQUIPAMENTO ENVOLVIDO NO SINISTRO	24
3.3	PROPRIEDADES TERMODINÂMICAS DO PRODUTO ARMAZENADO	26
4.	MODELO	28
4.1	ÁREA DE QUEIMA:	30
4.2	TAXA DE QUEIMA POR UNIDADE DE ÁREA:	30
4.3	TAXA DE CALOR:	31
4.4	ALTURA DAS CHAMAS:	31
4.5	TEMPO DE QUEIMA:	32
4.6	FLUXO DE CALOR:	32
4.6.1	<i>Modelo de ponto de origem</i>	33
4.6.2	<i>Modelo de chama sólida</i>	35
4.7	TEMPERATURA DE SUPERFÍCIE	37
4.8	TEMPO PARA SENTIR DOR E TEMPO PARA QUEIMADURA DE SEGUNDO GRAU	38
4.9	CURVAS DE PROBIT:	39
5.	RESULTADOS OBTIDOS	40
5.1	ÁREA DE QUEIMA:	40
5.2	TAXA DE QUEIMA POR UNIDADE DE ÁREA:	40
5.3	TAXA DE CALOR:	40
5.4	ALTURA DAS CHAMAS:	40
5.5	TEMPO DE QUEIMA:	41
5.6	FLUXO DE CALOR:	41
5.6.1	<i>Modelo de Ponto de Origem</i>	41
5.6.2	<i>Modelo de chama Sólida</i>	42
5.7	COMPARAÇÃO ENTRE OS DOIS MODELOS DE FLUXO DE CALOR	44
5.8	RESULTADOS APLICADOS NO PAE	49
6.	CONCLUSÃO	53

1. INTRODUÇÃO

A maioria das instalações industriais que operam com produtos químicos possuem grandes estoques de líquidos inflamáveis em suas dependências e sendo assim, possuem um elevado potencial de perdas econômicas devido aos incêndios. Muitos dos gestores destas empresas apresentam resistência em acreditar que incêndios ainda são prováveis de acontecer nos dias de hoje, porém estudos comprovam que o número de incêndios não se altera muito de ano para ano e isso confirma que Programas de Gestão de Segurança de Processo devem ser implementados em instalações deste tipo, independente do nível de conformidade destas empresas com a legislação vigente para o armazenamento e uso seguro dos líquidos inflamáveis.

Incêndios em grandes reservatórios de armazenamento de líquidos inflamáveis continuam acontecendo. Sudheer e Prabhu (2010) mencionam um estudo em uma amostra de 6.099 acidentes que ocorreram em indústrias químicas, 53% envolviam líquidos e 41,4% envolveram incêndios. Na Tabela 1 estão apresentados alguns exemplos dos últimos grandes incêndios que envolveram estocagem de líquido inflamável.

Tabela 1 - Grandes incêndios mundiais envolvendo estocagem de inflamáveis

Companhia	Data	Local	Magnitude
Orion Norco Oil Refinery	Junho de 2001	Norco, Louisiana	Tanque com 80 metros de diâmetro.
Hertfordshire Oil Storage	Dezembro de 2005	Buncefield, Inglaterra	20 tanques simultâneos.
Caribbean Petroleum Corporation	Novembro de 2009	Porto Rico	12 tanques simultâneos.

Fontes: http://en.wikipedia.org/wiki/Buncefield_fire

<http://www.csb.gov/investigations/detail.aspx?SID=87>

API Storage Tank Conference September 2006, case: Orion Norco Oil Refinery

O primeiro exemplo apresentado na Tabela 1 (Orion Norco Oil Refinery) é considerado como sendo o maior incêndio ocorrido em um único equipamento de estocagem de líquido inflamável da história. A Figura 1 apresenta uma foto deste

incêndio com aplicação de resfriamento do costado do tanque através de equipamentos móveis de combate a incêndio.



Figura 1- Incêndio ocorrido na Orion Norco Oil Refinery em Junho de 2001.

Com o passar das décadas ocorreu um aumento na quantidade de informação disponível para definir padrões seguros de projeto de armazenamento e uso dos líquidos inflamáveis e atualmente existe uma vasta base de dados internacional que define condições mínimas de segurança e boas práticas no armazenamento de líquidos inflamáveis, muitas delas baseadas em ocorrências reais, que tiveram drásticas conseqüências e serviram para mostrar o que fazer e principalmente o que não fazer.

Alguns exemplos de códigos de proteção contra incêndios e boas práticas em grandes reservatórios, assim como normas seguidas internacionalmente são: NFPA (National Fire Protection Association), SPFE (Society of Fire Protection Engineers), FSSA (Fire Supression Systems Association) e a API (American Petroleum Institute) e no Brasil temos as normas NBR e Petrobras. Todas elas, de alguma forma, determinam condições adequadas de armazenamento e os requisitos básicos para se garantir a mínima segurança de uma instalação que contenha líquido inflamável estocado ou sendo utilizado.

Mas mesmo numa instalação que segue toda a normatização existente e as boas práticas, os incêndios podem acontecer e causar drásticas conseqüências para as instalações, pessoas e meio ambiente. Desta forma deve-se determinar preventivamente (qualitativamente e sempre que possível quantitativamente) as conseqüências dos possíveis cenários envolvendo incêndios de grandes estoques de

líquidos inflamáveis, de forma a minimizar o impacto as pessoas, instalações da empresa e áreas vizinhas e ao meio ambiente.

A minimização dos efeitos do incêndio deve ser alcançada através da adequada atuação na emergência e para isso, são necessárias informações antecipadas dos possíveis modos de falhas de cada cenário e conseqüentemente dos possíveis efeitos térmicos, de pressão e de concentração de contaminantes tóxicos para cada cenário identificado como de alto grau de risco.

Estas informações colhidas do levantamento e estudo detalhado dos possíveis cenários de incêndio irão embasar os Planos de Atendimento a Emergência (PAE) da instituição, que são sistemas gerenciais que necessitam de três grupos de elementos: recursos materiais, recursos humanos e procedimentos. Os PAE foram criados para definir claramente e formalmente responsabilidades, logísticas, táticas e outras informações que devem estar disponíveis previamente à ocorrência de um sinistro, de forma a sustentar as tomadas de decisões gerenciais e estratégicas da empresa, visando à minimização dos efeitos adversos do incêndio. Neste foco, a API RP 2021 (Prevention and Suppression of Fires in Large Atmospheric Petroleum Storage Tanks) apresenta boas práticas, que podem ser útil na criação dos PAE, a serem seguidas para a proteção e atendimento a emergências envolvendo reservatórios de líquidos inflamáveis.

Para este estudo será utilizado um método de cálculo baseado numa Análise Qualitativa de Risco desenvolvido por CCPS (Center for Chemical Process Safety) ligado ao Instituto Americano de Engenheiros Químicos (AIChE – American Institute of Chemical Engineers), tendo como resultado final esperado a determinação das zonas geográficas seguras para atuação da equipe de atendimento a emergência e a determinação das possíveis conseqüências nos equipamentos próximos ao reservatório sinistrado, fornecendo dados valiosos para compor o PAE da empresa.

2. ANÁLISE DE RISCO DE INCÊNDIO

Segundo Gre e Barrera (2011) um Programa de Gerenciamento de Risco de Processo, PGR, ou originalmente em inglês PSM (Process Safety Management) tem por objetivo, através de suas ações, o gerenciamento dos riscos tecnológicos, como incêndio, explosão e vazamento de produtos químicos nas instalações industriais.

Ainda segundo os mesmos autores, uma estrutura clássica de PSM é composta pelos seguintes elementos: 1) informação de segurança de processo, 2) análise de risco, 3) procedimentos operacionais, 4) participação dos empregados, 5) treinamento, 6) revisão de segurança de pré-partida, 7) integridade mecânica, 8) permissão de trabalho, 9) gerenciamento de mudança, 10) investigação de incidentes e acidentes, 11) plano de atendimento de emergência e finalmente fechando o ciclo, 12) auditoria.

A análise de risco é definida como sendo a sistemática de identificar, analisar, avaliar e controlar os riscos tecnológicos e perdas associadas aos processos e sistemas. Dos diversos métodos qualitativos e quantitativos disponíveis de análises de risco, existe o método de análise de vulnerabilidade, que é definido como sendo o estudo realizado através de modelos matemáticos baseados em dados experimentais para a determinação dos diversos efeitos causados por incêndios, vazamentos e explosões nas pessoas expostas, equipamentos vizinhos e instalações.

Vários modelos matemáticos são propostos para a execução de uma análise quantitativa de risco, em CCPS (2003) é utilizado um método chamado de Fire Hazard Analysis (FHA), que é uma ferramenta utilizada para quantificar e compreender os riscos de incêndio. A análise de vulnerabilidade fornece as características para identificar os possíveis cenários de incêndio e a FHA fornece ferramentas para quantizar os riscos e avaliar as possíveis conseqüências.

A ferramenta de FHA é utilizada para determinar a magnitude potencial do incêndio e determinar o impacto provável do incêndio sobre pessoas, equipamentos, comunidade e meio ambiente e com isso é possível determinar as regiões seguras para o pessoal envolvido no controle do incêndio. Em projetos é possível determinar os riscos potenciais de inventários de líquido inflamável e assim definir distâncias seguras

para outros equipamentos e instalações críticas, de forma a garantir uma mínima segurança em cenários prováveis.

Segundo CCPS (2003) para se determinar os efeitos danosos às pessoas e instalações através de uma análise de risco de incêndio são necessárias três etapas:

- Primeiro determinam-se quais são os inventários envolvidos em cada cenário para se estimar a duração provável deste cenário.

- Segundo definem-se os possíveis cenários de incêndio, desde aqueles cenários de menor complexidade até aqueles que necessitam de alto envolvimento material e pessoal para seu controle, que criam enormes perdas. Sendo que estes devem sempre ser priorizados em relação aqueles. Uma análise dos principais riscos do processo pode fornecer uma lista de cenários de incêndio.

- Por último deve-se calcular quantitativamente o risco potencial de incêndio. Esta etapa pode envolver sistemas complexos computacionais baseados em modelos matemáticos de vários parâmetros com alta aproximação das condições reais até modelos simples que fornecem uma boa estimativa inicial das conseqüências esperadas para um cenário específico. O método de FHA utilizado neste trabalho é considerado uma abordagem simples, com várias simplificações e considerações, porem é um método prático e válido para determinar o principal efeito esperado de um incêndio de grandes proporções: o fluxo térmico incidente sobre alvos próximos expostos as chamas.

2.1 Efeitos Térmicos

Uma vez que as características físicas do incêndio tenham sido calculadas, uma avaliação do impacto do incêndio sobre as estruturas e pessoas deve ser determinada. As principais conseqüências diretas de um incêndio são a liberação de gases, chamas, calor e fumaça. Os materiais envolvidos no incêndio irão definir a proporção com que estas conseqüências irão ocorrer, para materiais com cadeias de hidrocarbonetos pesadas, ocorrerá uma grande emissão de fumaça, escura e espessa, já para materiais leves será um chama clara com pouca ou nenhuma fumaça e uma temperatura maior da chama.

Estas conseqüências diretas podem criar efeitos diferentes em pessoas equipamentos e estruturas. Sendo que a pior conseqüência de um incêndio é o seu alto fluxo térmico, devido às altíssimas temperaturas atingidas no centro de um incêndio de líquido inflamável, que podem chegar a valores próximos de 1.000°C para incêndios sem limitação de oxigênio disponível para a combustão (CCPS, 2003) e por meio de processos de transferência de calor convectivo e radiativo produzem fluxos térmicos incidentes altíssimos sobre alvos próximos. A Figura 2 apresenta este conceito, a temperatura é considerada constante depois de atingido o estado estacionário, em que toda superfície exposta do líquido está em combustão. Outros estudos sugerem valores superiores para incêndios em líquidos inflamáveis, Sudheer e Prabhu (2010) sugerem valores de até 1.200°C para um incêndio de óleo diesel em diversos diâmetros de poças.

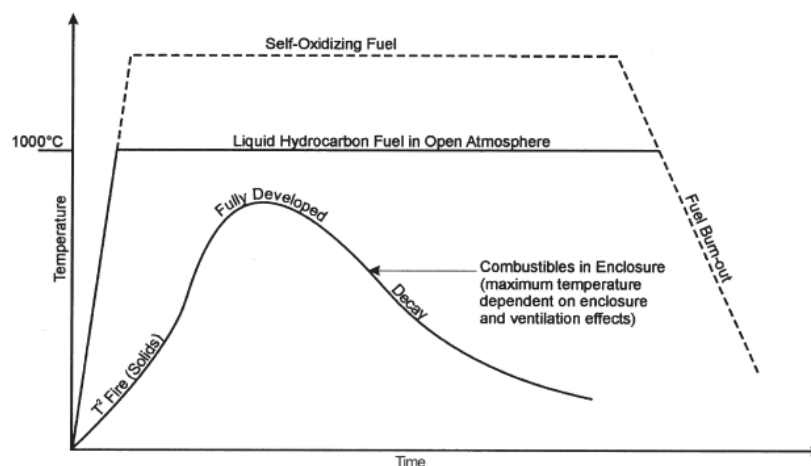


Figura 2 - Características térmicas de incêndios para líquidos, sólidos e auto-oxidantes.
Fonte: CCPS, 2003.

2.2 Efeitos em Equipamentos e Estruturas

O principal efeito danoso às estruturas e equipamentos são as falhas estruturais causadas por excesso de temperatura. Concreto, aço, alumínio, plástico e outros materiais possuem temperaturas máximas as quais resistem antes de perderem suas propriedades de resistência mecânica. O aço exposto sem proteção do concreto é particularmente suscetível a temperatura elevada.

O efeito da radiação térmica em estruturas depende se eles são combustíveis ou não, a natureza e a duração da exposição. Assim, materiais de madeira irão falhar

devido à combustão, enquanto o aço irá falhar devido à redução térmica da tensão de escoamento. Muitas estruturas de aço sob carga normal falharão rapidamente quando elevado a uma temperatura na faixa de 500 a 550 °C, enquanto que estruturas de concreto irão resistir por muito mais tempo. É importante lembrar que chamas diretas sobre uma estrutura são mais graves do que a radiação térmica.

Em CCPS, 2003 encontram-se uma relação de temperaturas de interesse para o início de falha para alguns materiais:

- Pintura começa a amolecer em 204°C;
- Falha em estruturas de PVC em 250°C;
- Tintas normais começam a amolecer em 310°C;
- Óleo lubrificante sofre auto-ignição em 421°C;
- Aço inoxidável começa a descolorir entre 427 e 482°C;
- Compensado de madeira sofre auto-ignição em 482°C;
- Mangueiras de borracha sofrem auto-ignição em 510°C;
- Aço carbono enfraquece em aproximadamente 575°C;
- Ligas de alumínio derretem entre 610 e 660°C;
- Vidro derrete entre 750 e 850°C.

Considera-se seguro um projeto em que o aço seja calculado para resistir a 60% do valor de escoamento, e isto ocorreria numa faixa de temperatura de 500 a 550°C.

Considera-se que falhas em estruturas que contenham aço e concreto só irão ocorrer se expostas a um fluxo de calor de no mínimo 45 kW/m² (CCPS, 2003).

2.3 Efeitos em Pessoas

O principal impacto dos incêndios em líquidos inflamáveis para as pessoas expostas é a radiação térmica, principalmente quando não existem obstáculos entre as chamas e as pessoas, neste caso, as pessoas estão diretamente expostas à radiação produzida pelas chamas.

Vários autores através de dados experimentais ou através de modelos matemáticos (Wieczorek, 2001; CCPS, 2003; CCPS, 1999; Crocker e Napier, 1997) demonstram que grandes incêndios geram fluxos térmicos radioativos muito acima dos limites seguros para o tecido humano e podem causar vários efeitos indesejados.

Entre estes efeitos estão: a) queimaduras de primeiro grau (vermelhidão superficial e pele ressecada), b) queimaduras de segundo grau (queima a pele a mais de 0,1 mm de profundidade, forma bolhas), c) queimaduras de terceiro grau (atinge mais de 2 mm de espessura da pele e atinge terminações nervosas) d) morte, dependendo das dimensões do incêndio, do produto envolvido, da distância entre o indivíduo exposto e as chamas, das condições meteorológicas, da proteção utilizada pela pessoa exposta e ainda do tempo de exposição, segundo CCPS (2003) o impacto causado pela temperatura à pele humana aumenta logarithmicamente com o tempo de exposição da pele. Para Stoll e Chianta (1968) a razão em que os danos ocorrem aumenta logarithmicamente com o aumento linear da temperatura, de modo que as lesões em 50°C são 100 vezes maiores que aquelas sentidas em 45°C.

Ainda em Stoll e Chianta (1968) é mostrado que se for extrapolada a curva de taxa de calor versus temperatura tem-se uma curva com o início dos danos em 44°C e uma completa destruição epidérmica que ocorre instantaneamente em 72°C.

Wieczorek (2001) elaborou um modelo simplificado para a predição do tempo necessário para o início da sensação de dor em relação ao fluxo térmico recebido (t_p) e o tempo necessário para ocorrer queimadura de segundo grau (t_{2b}), ambos em segundos, baseados no modelo completo encontrado em SFPE (2000). Este modelo simplificado demonstrou um erro menor que 30% em relação às equações completas, sendo que os valores de tempo foram sempre inferiores aos encontrados com o modelo completo, o que demonstra que o modelo simplificado é mais conservativo. Para ambos os modelos pressupõe-se corpo sem proteção alguma e com a pele numa condição ideal, tendo propriedades padrões de referencia.

Para CCPS (1999) a modelagem de efeito térmico na pele humana é mais simples do que a modelagem de efeito tóxico. Pois uma grande quantidade de dados experimentais está disponível e constitui a base para a estimativa do efeito térmico em humanos. Duas metodologias são utilizadas para isso:

- a partir de tabulações simples ou gráficos baseados em resultados experimentais;
- modelos matemáticos teóricos com base na fisiologia e no tempo de resposta necessário para queimar a pele;

Normalmente, os modelos existentes pressupõem exposição da pele completamente nua. Alguns autores sugerem que vestimentas leves já são suficientes para interferir no resultado.

CCPS (1999) fornece os dados do tempo necessário para o limiar de dor, eles estão apresentados na Figura 3. Os valores na Figura 3 podem ser comparados à intensidade da radiação solar em um dia claro de verão, com sol muito intenso, que é de cerca de 1 kW/m².

Radiation intensity (Btu/hr/ft²)	kW/m²	Time to pain threshold (s)
500	1.74	60
740	2.33	40
920	2.90	30
1500	4.73	16
2200	6.94	9
3000	9.46	6
3700	11.67	4
6300	19.87	2

Figura 3 - Tempo de exposição necessário para atingir o limiar de dor

Fonte: CCPS, 1999.

Com base nesses dados, o autor sugere critérios térmicos (Tabela 2), excluindo a radiação solar, para estabelecer zonas de exclusão ou determinar níveis de proteção para a exposição pessoal. Critérios de outra fonte para os danos da radiação térmica são apresentados na Tabela 3.

Tabela 2 - Recomendação de níveis de radiação por zonas

q'' (kW/m²)	Zonas sugeridas de atuação
15,77	Intensidade de calor em zonas onde o pessoal que atua na emergência não pode exercer funções e onde é necessário abrigo do calor radiante, por exemplo, atrás de equipamentos.
9,46	Local onde a exposição deve ser limitada a alguns segundos, por exemplo o suficiente para escapar de situações de risco de vida.
6,31	Intensidade de calor em áreas onde as ações de emergência com duração de até 1 minuto podem ser executada por pessoal com roupa apropriada.
4,73	Intensidade de calor em áreas onde as ações de emergência com duração de alguns minutos podem ser executadas por pessoal treinado e com roupa apropriada.
1,58	Local onde o pessoal de atuação em emergência está normalmente exposto.

Fonte: CCPS, 1999.

Tabela 3 - Efeitos da Radiação Térmica (CCPS, 1999 por World Bank, 1985)

Radiação (kW/m²)	Efeito
37,5	Suficiente para causar danos imediatos aos equipamentos de processo.
25,0	Energia mínima necessária para inflamar a madeira indefinidamente.
12,5	Energia mínima necessária para ocorrer a fusão de alguns plásticos.
9,5	Limiar de dor alcançado após 8 segundos; Queimaduras de segundo grau depois de 20 segundos.
4,0	Suficientes para causar dor em 20 segundos; São prováveis bolhas na pele devido a queimaduras de segundo grau.
1,6	Mesmo por longa exposição não causará desconforto.

Fonte: CCPS, 1999, pág 265.

Foster e Roberts (1995) realizaram uma série de testes em uma escola de bombeiros na Inglaterra para determinar quais as temperaturas e fluxos de calor que estes bombeiros estariam expostos em um exercício de combate a incêndio que simula uma condição real do dia-a-dia de atuação dos mesmos.

Um pacote de instrumentos foi atrelado sob a vestimenta de combate a incêndio para coletar os dados. Determinou-se a temperatura em diversos pontos sobre a roupa, o fluxo de ar passando no bombeiro, a radiação térmica e a umidade.

Os resultados levaram a criação de quatro zonas de atuação, conforme a temperatura e o fluxo térmico, cada zona possui um tempo máximo recomendado para permanência segura do bombeiro devidamente equipado.

As zonas são: a) condições de rotina, que suporta fluxo radiativo de 1kW/m^2 ou 100°C por 25 minutos; b) condição perigosa, o limite proposto é de 1 minuto exposto a 4kW/m^2 ou 160°C ; c) condição extrema, exposição de até 235°C ou 10kW/m^2 , porém não recomendada permanência, apenas para situações de resgate imediato e por fim d) condição crítica, para temperaturas maiores que 235°C ou fluxos superiores a 10kW/m^2 , esta zona não é aconselhada para pessoas. A Figura 4 apresenta estas regiões, percebe-se a indicação de uma região intermediária onde seria tolerável uma exposição de 10 minutos a 120°C ou 3kW/m^2 .

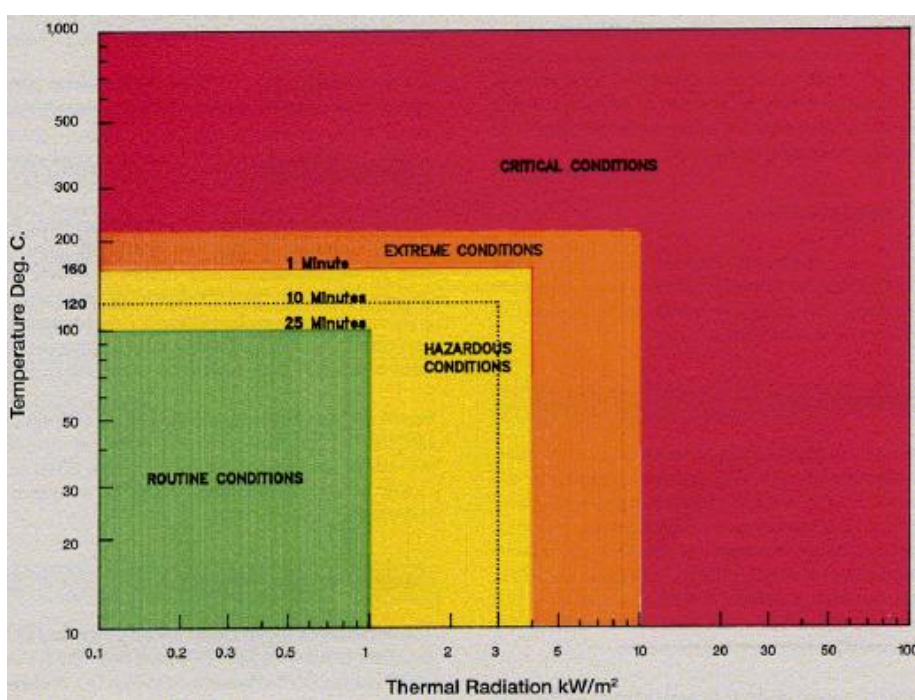


Figura 4 - Zonas de exposição para bombeiros devidamente protegidos

Fonte: Foster e Roberts (1995).

Crocker e Napier (1997) determinaram distâncias seguras entre pessoas e incêndios em poça e chegaram a valores entre 3 a 5 diâmetros da poça para uma radiação segura para impacto a pessoas de $4,7\text{kW/m}^2$. Já para incêndios em tanques, chegou a valores de separação menores, devido a influencia da “sombra” provocada pelo costado do reservatório, o que leva a uma menor radiação térmica próxima do tanque, que aumenta conforme a distância até um ponto de máxima radiação, vindo novamente a reduzir de forma exponencial conforme aumenta a distância entre o objeto e o tanque.

Para incêndio em um tanque de benzeno de 50m de diâmetro chegou-se a valores que variam entre 172 e 215 m para um fluxo de $4,7\text{kW/m}^2$, dependendo do modelo utilizado, ou seja, uma variação de aproximadamente 2 a 4 diâmetros.

Desta forma, mostrou-se que este modelo baseado em incêndios em tanques é mais apropriado para o estudo deste trabalho.

2.4 Curvas de Probit

Calculados os fluxos térmicos causados pelo incêndio no reservatório de líquido inflamável, deve-se determinar os possíveis efeitos as pessoas em relação à probabilidade de ocorrência de danos, esta abordagem é bastante utilizada para determinar a probabilidade de dano em curvas de concentrações de contaminantes causadas por vazamento e dispersão. Porém pode ser utilizada para estudos de sobrepressões causadas por explosões ou por radiação térmicas causadas por incêndios, como será analisado neste trabalho.

Um método para avaliar a consequência de um resultado de um acidente é o modelo de efeito direto, no qual se prevê efeitos em pessoas e estruturas com base em critérios pré-definidos, como por exemplo: morte em um indivíduo se exposto a uma concentração x de um contaminante por um tempo y . Na realidade, as consequências não podem assumir a forma de funções discretas, porém, podem estar de acordo com funções de distribuição de probabilidade. Este tipo de método estatístico de dose-resposta é chamado de função Probit ou curva Probit, pois define curvas em que uma probabilidade x de dano é esperada quando exposto em um tempo y a uma concentração ou fluxo térmico ou sobre-pressão z .

Eisenberg et al. apud CCPS (1999) desenvolveram um modelo de equação de Probit para estimar os níveis de mortalidade para uma dada dose térmica causada por incêndios em líquidos inflamáveis. Esta equação determina o número de Probit tendo como base a intensidade do fluxo térmico no alvo e o tempo de exposição a este fluxo térmico.

Lees apud CCPS (1999) resume os dados a partir do qual essa relação foi derivada. O método de Probit tem encontrado menor uso para efeitos de lesão térmica do que para efeitos tóxicos. Modelos matemáticos de lesões térmicas podem ser

baseados em uma descrição detalhada do modelo de pele e suas propriedades de transferência de calor. Experimentos mostraram que o limiar de dor ocorre quando a temperatura da pele a uma profundidade de 0,1 mm atinge os 45°C. Que normalmente ocorre quando a superfície da pele atinge 55°C.

Schubach apud CCPS (1999) fornece uma revisão de dados de radiação térmica para a análise de risco. Ele conclui que: 1) o modelo de assumir uma intensidade fixa de 12,6 kW/m² para representar a fatalidade é inapropriada devido a uma incompatibilidade com as funções Probit e (2) uma intensidade de radiação térmica de 4,7 kW/m² é um valor mais aceito para representar a probabilidade de lesão. Este valor é considerado alto o suficiente para desencadear a possibilidade de prejuízo para as pessoas que são incapazes de ser evacuadas ou de buscar abrigo seguro.

Esta referencia também sugere que os dados de mortalidade de Probit de Eisenberg et al. se aplicam a indivíduos levemente vestido, e que o tipo de roupa teria um efeito significativo sobre os resultados.

2.5 Planos de Atendimento a Emergência (PAE)

Após a determinação dos cenários mais prováveis, da quantização do risco de incêndio, da estimativa de fluxos térmicos e dos efeitos prováveis em pessoas e instalações a elaboração de um Plano de Atendimento à Emergência (PAE) é a síntese de todo estudo realizado até este momento e tem por objetivo determinar as ações e meios de controle para garantir a minimização das conseqüências do incêndio, através da otimização dos recursos humanos e materiais.

Segundo Gre e Barrera (2011) os planos e procedimentos de atendimento à emergência constituem-se num dos pilares que sustenta os sistemas de controle de emergência, pois a partir destes se definem os recursos humanos e materiais adequados para compor o sistema. Várias referências normativas nacionais tratam em algum nível de detalhamento estes planos, entre elas: resolução CONAMA 293, convenção 174 da OIT e regulamentos de órgãos ambientais estaduais e a nível internacional a API RP 2021 apresenta boas práticas específicas para controle de incêndios em parques de tancagem de líquidos inflamáveis e combustíveis. Até mesmo

as normas ISO 14001 e a OSHAS 18001 possuem capítulos específicos que tratam do tema PAE.

Com a estruturação adequada dos PAE, o seu resultado esperado é uma coordenada atuação tática sobre os acidentes já planejados. Segundo CCPS (1995) as táticas são as ações tomadas para atingir os objetivos desejados. Elas podem ser defensivas (contendo o problema para que ele não se espalhe) ou ofensivas (atacando o problema na sua origem), ou ainda uma combinação de ambas (como por exemplo, contendo o problema no início até que existam recursos adequados e então seja possível iniciar uma ação ofensiva).

Ainda segundo Gre e Barrera (2011) os PAE podem ser divididos em até três níveis hierárquicos, nível institucional: normas ou documentos de gestão, nível estratégico: aprovados pela gerencia intermediária e nível tático ou operacional: que são os pré-planos, que demonstram de forma simples, direta e rápida o que fazer, ou qual tática adotar para cada tipo de emergência de forma que a equipe de atendimento a emergência possa usá-lo como referência rápida para a tomada de decisões operacionais durante a emergência, sendo assim devem apresentar resumidamente e através de croquis e fluxogramas o que fazer, como fazer exatamente e em que momento.

Os pré-planos podem ter muitas formas e devem ser parte do PAE como planos de resposta a emergências. Eles podem ser desenvolvidos para diferentes tipos de riscos, desde incêndio, acidentes químicos, emergências médicas e ambientais (CCPS, 1995).

Alguns itens obrigatórios que devem constar nos pré-planos são:

- Descrição do Equipamento;
- Dados físico-químicos do produto armazenado;
- Recursos necessários disponíveis (humanos e materiais);
- Informações de direção de vento e localização do comando;
- Croquis com delimitações de áreas seguras para pessoal envolvido;
- Tipos de proteções (vestimentas) necessárias;
- Seqüência de ações para o controle de emergência ou minimização das conseqüências (depende da tática definida);

Uma relação mais completa de itens importantes que podem constar nos pré-planos está apresentada no Anexo 1 (CCPS, 1995), o Anexo 2 apresenta um modelo

de pré-plano, disponível em CCPS, 2003. Já o Anexo 3 dispõe de um outro modelo de pré-plano, utilizado em uma empresa nacional do ramo de refino / petroquímico.

Um dos requisitos de um pré-plano é determinar razoavelmente quais as zonas são seguras para permanência humana, seja por concentrações elevadas de contaminantes, seja por risco de explosão ou por radiação térmica causada pelo incêndio.

De posse desta informação definem-se também os níveis de proteção (roupas e equipamentos de proteção) para cada área definida como de risco, diante disto é comum delimitar as zonas de atuação em três regiões. 1) zona quente: aquela em que o acesso deve ser o mais restrito possível e só deve ser executado para casos extremos, como resgate de vítimas, atuações rápidas em equipamentos expostos ou ação decisiva para debelar o acidente, 2) zona morna: área intermediária, normalmente de acesso a zona quente, deve ter acesso controlado, porém apresenta um menor risco a segurança da equipe, e 3) zona fria: considerada a região com condições seguras de concentrações de contaminantes ou fluxos térmicos, é nesta região que se encontra o comando tático da ocorrência.

A norma NFPA 1971 (2007) recomenda que os testes em roupas de proteção devem suportar fluxos térmicos de até 10kW/m^2 em condições normais de exposição e para curtos períodos de tempo (resgate e atuação de emergência) devem suportar até 84kW/m^2 , define também que para o capacete ser aprovado deve suportar até 14kW/m^2 de fluxo radiativo.

3. CASO ANALISADO

3.1 Objetivo do estudo

Este estudo tem por objetivo determinar os efeitos térmicos e as conseqüências geradas por um incêndio em um tanque de armazenamento, de grandes proporções, com pressão atmosférica, que armazena nafta no seu interior. A nafta é um líquido altamente inflamável largamente utilizada na indústria petroquímica, nesta condição estudada ela se encontra armazenada na temperatura atmosférica.

3.2 Descrição do equipamento envolvido no sinistro

Este tanque de armazenamento possui as propriedades apresentadas na Tabela 4, estes dados são importantes para os cálculos apresentados no capítulo 4 e realizados no capítulo 5.

A localização deste tanque na área de estocagem, assim como as respectivas distâncias com os tanques adjacentes são apresentadas na Figura 5, extraída do programa GoogleEarth® e Figura 6, que apresenta um croqui do local mostrando as distâncias aproximadas.

Tabela 4 - Dimensões do equipamento envolvido

Parâmetro	Unidade	Símbolo	Valor
Diâmetro	m	D_{TQ}	54,86
Altura operacional	m	H_{TQ}	14,63
Área Superficial ($A_{TQ} = \pi D_{TQ}^2$)	m^2	A_{TQ}	2.363,75
Volume de produto ($V = A_{TQ} H_{TQ}$)	m^3	V	34.581,66



Figura 5 - Imagem de satélite do tanque sinistrado e equipamentos adjacentes.

Fonte: GoogleEarth®

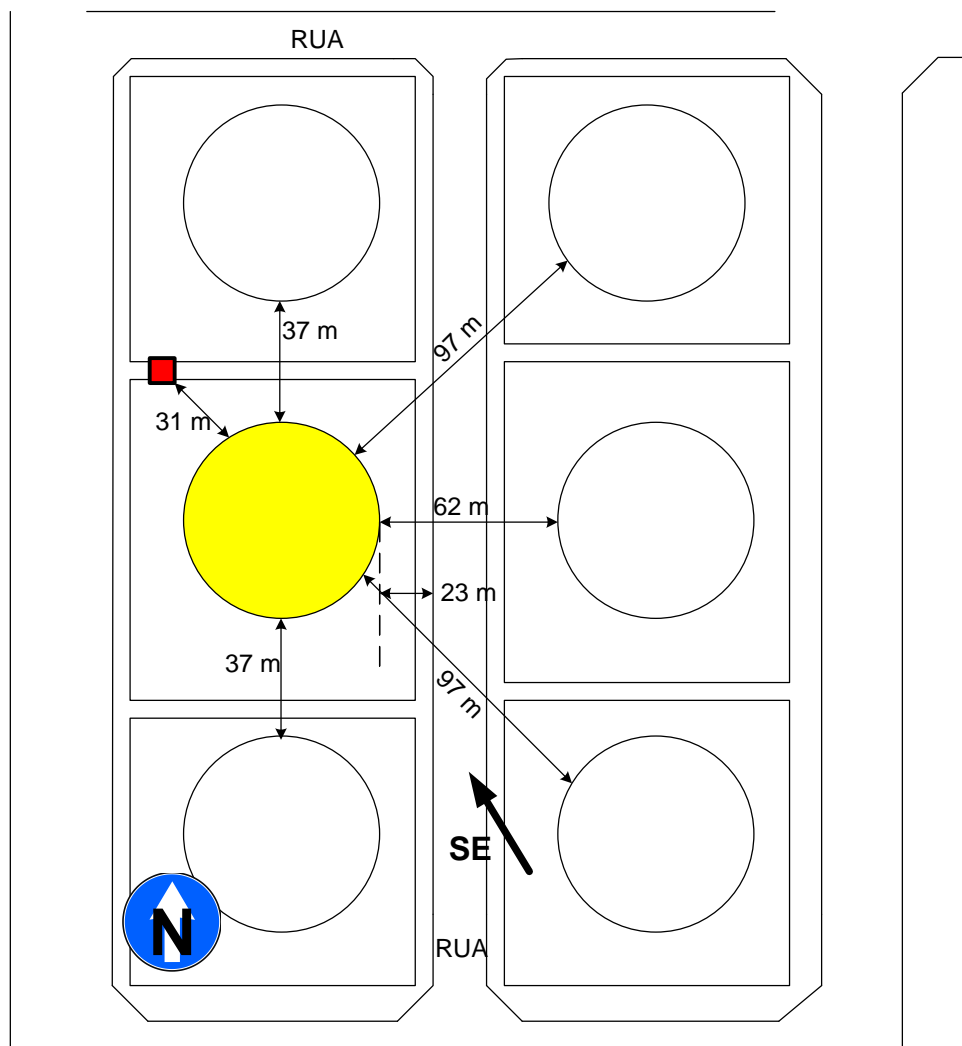


Figura 6 - Croqui do tanque sinistrado e principais distâncias.

3.3 Propriedades termodinâmicas do produto armazenado

As principais propriedades físico-químicas necessárias para o cálculo do fluxo de calor sobre objetos através da radiação térmica causada por um incêndio em líquido inflamável são o tipo de material armazenado, a taxa com que este líquido é queimado, chamada de taxa de queima, a temperatura de armazenamento do líquido, o calor de combustão deste líquido, que é a energia liberada devido à queima de um mol desta substância e a massa específica da substância. Estas propriedades estão apresentadas na Tabela 5.

Tabela 5 - Propriedades físico-químicas importantes

Parâmetro	Unidade	Símbolo	Valor
Produto Armazenado	-	-	Nafta
Temperatura de Armazenamento	°C	T	25
Temperatura do ar	°C	T ₀	25
Taxa de Queima	(mm/min)	α	4,00
Calor de Combustão	cal/g	Δh _c	10.100
Massa Especifica da nafta líquida	kg/m ³	ρ	763
Massa Especifica do ar	kg/m ³	ρ ₀	1,184
Umidade Relativa do Ar	%	URA	85
Constante de Stefan-Boltzmann	kW/(m ² K ⁴)	σ	5,67e ⁻¹¹

4. MODELO

O modelo matemático apresentado a seguir para o cálculo das consequências térmicas do incêndio no caso em estudo (fluxo de calor radiante sobre objetos adjacentes e pessoas envolvidas no atendimento a emergência) foi desenvolvido pelo Center for Chemical Process Safety of the American Institute of Chemical Engineers (CCPS) apresentado em: Guidelines for Fire Protection in Chemical, Petrochemical, and Hydrocarbon Processing Facilities.

Este método é chamado de análise de risco de incêndio (FHA – Fire Hazard Analysis) e é constituído de uma seqüência de etapas que quando aplicadas a um cenário específico levam a determinação quantitativa das possíveis conseqüências deste sinistro, ou seja, os prováveis impactos do incêndio ou explosão sobre as pessoas, os equipamentos, as comunidade e ao meio ambiente.

Uma análise de risco de incêndio pode ser utilizada ainda para documentar o inventário de material inflamável ou combustível de um projeto e com isso calcular a magnitude potencial de um possível incêndio neste inventário para desta forma definir os equipamentos de controle de emergência necessários para este processo.

Para o cenário estudado de incêndio em um tanque de armazenamento de líquido inflamável, com perda total do teto do tanque (perda de contenção) e incêndio em toda a superfície exposta do líquido inflamável, será utilizado o modelo de fogo em líquido ou em poça (Liquid or Pool Fire), e os fatores de vista para incêndio em reservatórios, em que a dimensão da poça será a própria delimitação física do equipamento, ou seja, a superfície exposta do teto.

Este cenário pressuposto inicia na perda de contenção de um material inflamável que em contato com uma fonte de ignição irá inflamar-se. A seqüência de cálculo necessário para se determinar as conseqüências térmicas do sinistro são apresentadas na Figura 7.

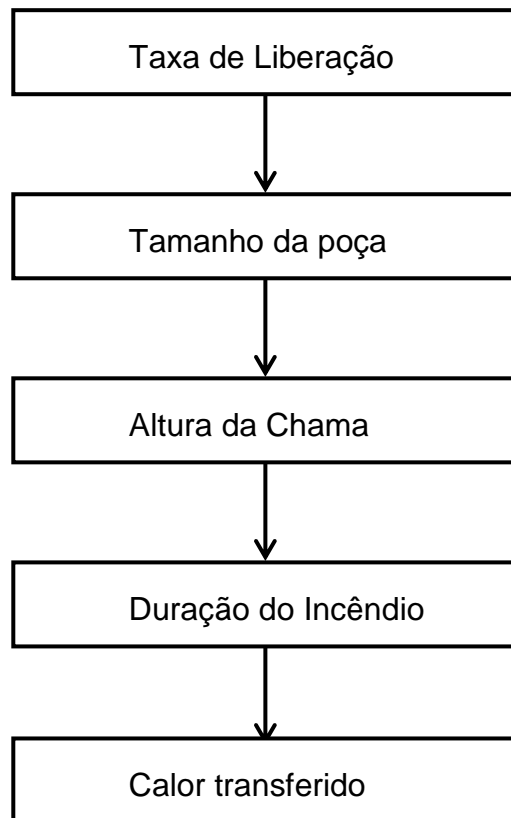


Figura 7 - Processo de determinação de incêndio em poça

Fonte: Traduzido de CCPS (2003).

O modelo é iniciado pela determinação da taxa de calor liberada pela combustão e este valor irá fornecer o fluxo de calor radiante sobre um ponto alvo específico ao qual se quer conhecer a incidência de calor.

Abaixo são apresentados os passos do cálculo para se chegar ao valor final de fluxo de calor radiante e temperatura específica de superfície que se quer conhecer:

A taxa de liberação do material é necessária para se determinar o tamanho da poça e conseqüentemente a duração do fogo. Para o caso em estudo a taxa de liberação não é aplicada, pois será toda a superfície do teto do tanque que estará desprovida de proteção e estará em contato com a superfície, ocasionado um sinistro de “diâmetro total”.

Para o caso em estudo, o primeiro passo aplicável é o cálculo do tamanho da poça, ou seja, a área de queima, que neste caso será a própria área superficial do tanque.

4.1 Área de queima:

A área de queima é definida como sendo a superfície envolta pelas chamas. No caso de incêndio em tanque de armazenamento, com perda total do teto, onde toda a superfície do tanque está envolta em chamas, define-se a área de queima ou área de derramamento de líquido como sendo toda a área superficial do tanque.

Desta forma calcula-se a área de queima pela Equação 1:

$$A_s = \pi D^2 / 4 \quad (1)$$

Onde:

A_s é a área de queima (m^2)

D diâmetro do tanque (m)

4.2 Taxa de queima por unidade de área:

A definição da taxa mássica de queima por unidade de área é obtida a partir da equação de taxa mássica, e pode ser obtida a partir da taxa mássica dividida pela área. Ou então pela multiplicação da taxa de queima, redução do nível por unidade de tempo, pela massa específica da substância em que se quer determinar a taxa mássica, através da Equação 2 ou 3.

$$\dot{m}'' = \dot{m} / A_s \quad (2)$$

$$\dot{m}'' = \alpha \rho \quad (3)$$

Onde:

\dot{m} é a taxa mássica (kg/s)

\dot{m}''	taxa de queima por unidade de área ($\text{kg}/\text{m}^2 \cdot \text{s}$)
α	velocidade de queima (m/s)
ρ	massa específica (kg/m^3)

4.3 Taxa de calor:

A taxa de liberação de calor em Watts (W) é definida como sendo a taxa de energia térmica liberada devido aos gases provenientes da superfície de líquido inflamável que estão sofrendo a combustão. A taxa de calor é definida pela Equação 4, que calcula o a quantidade de calor latente envolvido na reação de combustão, nesta expressão é utilizando o valor do calor de combustão, que é definido como a variação de entalpia, ou seja, quantidade de calor liberada na combustão total de 1 mol de determinada substância, nas condições normais de temperatura e pressão.

$$Q = \dot{m}A_s\Delta h_c \quad (4)$$

Onde:

Q é a taxa de calor (W)

Δh_c calor de combustão (kJ/kg)

4.4 Altura das chamas:

Para o cálculo da altura da chama define-se a chama como sendo um cilindro reto ou inclinado, dependendo da incidência do vento, originado a partir da superfície do líquido. Para uma condição ideal sem incidência de vento o cálculo é realizado através da Equação 5. Pode-se ainda utilizar a Equação 5a, determinada por Crocker e Napier (1997).

Já para consideração da existência de vento sobre a chama, deve-se utilizar um fator de velocidade adimensional para o cálculo dos componentes vetoriais verticais e horizontais da chama, através das Equações 6, 7 e 8.

$$H_f = 0,23Q^{2/5} - 1,02D \quad (5)$$

$$H_f = 42D \left[\frac{\dot{m}}{\rho_0 \sqrt{gD}} \right]^{0,61} \quad (5a)$$

$$u^* = \frac{u_w}{(g\dot{m}D/\rho_v)^{2/3}} \quad (6)$$

$$\cos \theta = 1 \quad \text{for } u^* \leq 1 \quad (7)$$

$$\cos \theta = 1/\sqrt{u^*} \quad \text{for } u^* > 1 \quad (8)$$

Onde:

H_f é a altura total da chama (m)

ρ_0 massa específica do ar atmosférico (kg/m³)

g aceleração da gravidade (9,81m/s²)

4.5 Tempo de queima:

Num incêndio confinado na superfície de um reservatório as chamas se espalham rapidamente por toda a superfície, depois de atingido este período inicial transiente, o líquido inflamável passa a ser consumido a uma velocidade de combustão praticamente constante.

Uma vez atingido este estado estacionário pode-se determinar a taxa de queima mássica e desta forma a duração do fogo (tempo de queima) pode ser calculada aplicando-se a Equação 9.

$$t_b = V\rho/\dot{m}''A_s \quad (9)$$

Onde:

t_b é o tempo de queima (s)

V volume de produto que irá queimar (m³)

4.6 Fluxo de calor:

A fração do fluxo de calor radiativo que atinge um alvo específico é a etapa que apresenta mais aproximações no modelo de cálculo, pois é determinada através do uso de equações empíricas e relações trigonométricas aplicáveis somente para situações específicas, baseadas em levantamento histórico e dados atmosféricos.

Este trabalho irá utilizar dois modelos (ponto de origem e de radiação de pluma sólida) para estimar o fluxo de calor que atinge os alvos em estudo, cada modelo possui as suas particularidades, limites de aplicabilidade, considerações e desvantagens.

4.6.1 Modelo de ponto de origem

Para o cálculo do fluxo de transferência de calor sobre o ponto que se quer determinar é necessário definirmos qual é a fração de calor radiante proveniente das chamas que atinge o alvo, desta forma define-se o termo adimensional fração radiante.

Vários métodos têm sido descritos para a previsão de radiação de incêndios em poça e líquidos a temperatura atmosférica (SFPE, 1999). Os principais métodos são baseados em correlações desenvolvidas a partir de dados experimentais.

O primeiro método utilizado é baseado em um modelo de aproximação, a partir da determinação de um alvo, disponível em CCPS (1999) e define um ponto central de radiação no centro da altura total das chamas como sendo a fonte responsável pela emissão de toda a radiação recebida pela vizinhança. Para se usar o modelo de ponto de origem é necessário seguir os seguintes passos:

- Calcular a distância entre a fonte e o ponto de destino;
- Determinar a fração radiativa;
- Calcular o fluxo de calor incidente;

A Equação 10 é utilizada para a determinação da fração de calor radiante (x_r).

$$x_r = 0,21 - 0,0034D \quad (10)$$

Conforme apresentado na Tabela 6, a fração radiante (x_r) normalmente varia entre 0,2 e 0,4 e depende das propriedades do combustível, aceitam-se valores de 0,2 para combustíveis com um átomo de carbono até valores de 0,4 para os hidrocarbonetos com cinco ou mais átomos de carbono.

Tabela 6 - Fração da energia total convertida em radiação para Hidrocarbonetos

Combustível	Fração Radiante
Hidrogênio	0,20
Metano	0,20
Eteno	0,25
Propano	0,30
Butano	0,30
C ₅ e maiores	0,40

FONTE: CCPS, 1999.

Para incêndios em poças com diâmetros superiores a 50 m, a fração radiativa pode ser considerada a mesma para 50 m, pois à medida que aumenta o diâmetro do fogo, a fração de radiação diminui.

O fluxo de calor é definido como sendo a taxa de energia térmica (calor) transferida por unidade de área. A definição física de fluxo de calor se dá pela Lei de Fourier.

Para calcular o fluxo de calor radiante incidente sobre um alvo específico que esteja a uma distância R da fonte de origem do incêndio utilizando-se o modelo de ponto de origem, deve-se usar a Equação 11.

$$q'' = x_r Q \cos\theta / 4\pi R^2 \quad (11)$$

Onde:

q'' é o fluxo de calor (kW/m^2)

x_r fração da energia que é radiante

R distância entre o centro da altura da chama e o alvo (m)

θ ângulo entre a horizontal e a distância R (rad)

O modelo de ponto de origem possui um limite de aplicabilidade, pois é mais apropriado para cálculos onde o fluxo de calor incidente no alvo fica na faixa de 0 até 5 kW/m². Para valores acima de 5 kW/m² deverá ser utilizado outro modelo, como por exemplo, o Modelo de Chama Sólida.

4.6.2 Modelo de chama sólida

Este modelo para determinação do fluxo de calor radiativo foi extraído de Crocker e Napier (1997) e foi desenvolvido especialmente para incêndio em reservatórios, pois considera a região de baixa radiação devido à proteção (barreira) da lateral do tanque. O modelo é baseado na representação da chama como sendo formada por um cilindro sólido, com irradiação uniforme sendo emitida por toda a superfície da curva, a Equação 12 utiliza este conceito para determinar o fluxo térmico.

$$q'' = F_{12} A_f \zeta \varepsilon \sigma (T_f^4 - T_0^4) \quad (12)$$

Onde:

F_{12}	é o fator de vista, ou seja, a fração de radiação que sai da chama e chega no alvo, apresentado abaixo.
A_f	área da chama "vista" pelo alvo (definido como sendo 1m ²).
ζ	transmissividade atmosférica, a seguir.
ε	emissividade atmosférica (considerada como sendo igual a 1).
σ	constante de Stefan-Boltzmann (5,676x10 ⁻¹¹ kW/m ² K ⁴)
T_f	temperatura do centro da chama (1273K), (Crocker e Napier, 1997)
T_0	temperatura atmosférica (K)

A transmissividade atmosférica é um fator importante, pois a radiação térmica é absorvida e espalhada pela atmosférica. Isto causa a redução da radiação recebida em locais que se quer determinar. Alguns modelos de radiação térmica ignoram este efeito, assumindo ζ igual a 1 (um). Para distancias longas, esta aproximação pode resultar em uma radiação superestimada sobre o alvo. A Equação 13 determina a transmissividade atmosférica, pode-se notar que ela depende da pressão parcial de vapor, apresentada na Equação 14 e da umidade relativa do ar.

$$\zeta = 2,02(P_w X_s)^{-0,09} \quad (13)$$

Onde:

P_w é a pressão atmosférica (Pa)

X_s distância da perpendicular a partir da lateral do cilindro sólido até o alvo (m), na horizontal.

$$P_w = 1013,25(URA)\exp\left(14,4114 - \frac{5328}{T_0}\right) \quad (14)$$

Onde:

URA é a umidade relativa do ar (%)

A utilidade de uma previsão de radiação térmica depende em grande parte da aproximação com que o fator de vista descreve a geometria da chama e do receptor.

Considerando-se a radiação incidente nas pessoas (normalmente no chão) do sistema tanque / chama, a radiação do tanque pode ser ignorada de forma que o fluxo térmico no alvo será determinado pela Equação 15.

$$q'' = [F_{12}(x, H_f + H) - F_{12}(x, H)] \zeta \sigma (T_f^4 - T_0^4) \quad (15)$$

onde:

$F_{12}(x, H_f + H)$ é o valor do fator de vista considerando-se a altura do tanque mais a altura da chama, determinado abaixo.

$F_{12}(x, H)$ fator de vista considerando-se a altura do tanque.

O fator de vista será determinado pela Equação 16, nele é considerada uma condição sem vento. São obtidos valores de fatores de vista em relação ao ângulo sólido submetido em um ponto e o ângulo lateral do cilindro de chama.

$$F_{12} = \frac{2}{\pi} \arccos\left(\frac{D}{2x}\right) \sin\left[\arctan\left(\frac{H_f}{x - D/2}\right)\right] \quad (16)$$

Onde:

x é a distância entre o costado do tanque e o alvo que se quer determinar.

Para os tanques adjacentes em que se queira determinar pontos no topo do tanque a fim de se determinar os efeitos em estruturas, não se deve descontar o fator de vista para a altura do tanque ($F_{12}(x, H)$).

4.7 Temperatura de superfície

Com o valor do fluxo de calor radiante sobre o alvo determinado, é possível calcular a temperatura final que este alvo terá na sua superfície, depois de atingido o estado transiente de aumento de temperatura. Este valor é dito temperatura de superfície.

A principal importância de se conhecer esta temperatura é a possibilidade de determinação dos possíveis efeitos sobre estruturas próximas, equipamentos adjacentes, material utilizado para o controle do sinistro e até mesmo as vestimentas do pessoal envolvido no atendimento ao incêndio.

A determinação da temperatura de superfície é realizada utilizando-se uma equação de balanço de energia (Equação 15), como o termo da temperatura esta implícito, deve-se utilizar um método iterativo de cálculo, logo pode-se simplificar o balanço de energia explicitando-se o termo de temperatura, conforme Equação 16. Esta abordagem desconsidera a influência do resfriamento convectivo ao redor do alvo e desta forma a temperatura da superfície encontrada terá um valor maior (mais conservativo).

$$q'' = q''_{\text{rerad}} + q''_{\text{conv}} = \sigma(T_s^4 - T_0^4) + h(T_s - T_a) \quad (15)$$

Ainda é importante frisar que o balanço de energia proposto não considera gradientes de temperatura no interior do alvo, ou seja, deve-se considerar o alvo como um sólido a temperatura de superfície igual à temperatura no seu interior, o que não é verdade para equipamentos sob o efeito do fluxo térmico que possuam um inventário de líquido inflamável no seu interior, pois a presença deste líquido irá gerar um gradiente de temperatura reduzindo a temperatura da superfície até um valor mínimo que se encontra na borda oposta ao tanque sinistrado emissor da radiação.

$$T_s = \left[\frac{q''}{\sigma} + T_0^4 \right]^{1/4} \quad (16)$$

Onde:

T_s é a temperatura na superfície de um objeto(K)

4.8 Tempo para sentir dor e tempo para queimadura de segundo grau

As Equações 17 e 18 apresentam respectivamente os tempos para sentir dor e tempo para queimadura de segundo grau, que foram desenvolvidos por Wieczorek (2001) através de dados completos disponíveis em SFPE (2000). Estes cálculos são considerados para pessoas expostas sem proteção nenhuma, ou seja, contato direto da pele com os fluxos térmicos estabelecidos. Ambas equações são válidas para a região de fluxo térmico entre 1 e 20 kW/m².

$$t_p = 125(q'')^{-1,9} \quad (17)$$

$$t_{2b} = 260(q'')^{-1,56} \quad (18)$$

Onde:

t_p é o tempo para início da sensação de dor (s)

t_{2b} tempo para ocorrer queimaduras de segundo grau (s)

4.9 Curvas de Probit:

A Figura 8 apresenta uma tabela de conversão das funções Probit para porcentagem, a Equação 19 apresenta a função Probit para fluxo térmico, disponível em CCPS (1999).

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

Figura 8 - Conversão de Probit para porcentagem.

$$Y = -14,9 + 2,56 \ln \left(\frac{tI^{4/3}}{10^4} \right) \quad (19)$$

Onde:

- Y é o valor de Probit
- t duração da exposição (s)
- I intensidade da radiação térmica (W/m²).

5. RESULTADOS OBTIDOS

Com os dados apresentados nas Tabela 4 e Tabela 5 foram determinados os cálculos que seguem, conforme apresentados no capítulo Modelo:

5.1 Área de queima:

$$A_s = \pi D^2 / 4 = 3,1415 * \frac{54,86^2}{4} = 2.363,75 \text{ m}^2$$

5.2 Taxa de queima por unidade de área:

$$\dot{m}'' = \alpha \rho = 6,667e^{-5} * 763 = 0,050867 \text{ Kg/m}^2\text{s}$$

5.3 Taxa de calor:

A taxa de calor é calculada segundo a Equação 4:

$$Q = \dot{m} A_s \Delta h_c = 0,050867 * 2363,75 * 42.258 = 5.080.938,87 \text{ KW}$$

5.4 Altura das chamas:

Devido à baixa influencia de ventos moderados sobre a variação da altura da chama em incêndios de grande proporções, foi aproximado o cálculo para a condição de inexistência de vento. Sendo assim a altura da chama será de:

$$H_f = 0,23Q^{2/5} - 1,02D = 0,23 * 5.080.938,87^{2/5} - 1,02 * 54,86 = 54,73 \text{ m}$$

Ou através da Equação 5a:

$$H_f = 42D \left[\frac{\dot{m}}{\rho_0 \sqrt{gD}} \right]^{0,61} = 42 * 54,86 * \left(\frac{0,050867}{1,184 * \sqrt{9,81} * 54,86} \right)^{0,61} = 49,63 \text{ m}$$

5.5 Tempo de queima:

$$t_b = \frac{V\rho}{\dot{m}A_s} = \frac{(34.581,66 * 763)}{(0,050867 * 2.363,75)} = 219,45 \text{ s} \sim \mathbf{61 \text{ horas}}$$

Este valor deve ser considerado para uma tática defensiva (ver item 2.5), para uma situação de nível máximo e quando nenhuma ação é tomada sobre o sinistro, apenas é mantido o resfriamento dos tanques adjacentes.

5.6 Fluxo de Calor:

Calculado conforme os dois modelos apresentados no capítulo 4.

5.6.1 Modelo de Ponto de Origem

a) Fração radiante:

Como a nafta possui uma cadeia com mais de 5 carbonos, podemos considerar o valor da fração radiante para o modelo de ponto de origem (x_r) como sendo igual a 0,4, conforme foi apresentado na Tabela 6: Fração de energia total convertida em radiação para Hidrocarbonetos.

b) Fluxo de calor

Será apresentado o cálculo do fluxo de calor para o modelo de ponto de origem apenas para o primeiro ponto, ou seja, a borda do costado do tanque adjacente. Os valores dos outros pontos são apresentados na Tabela 7

Para a determinação do fluxo de calor, deve-se determinar o valor do cosseno do ângulo ($\cos \theta$) entre a distância do alvo até o centro do tanque ($d1$) e a distância do alvo até o meio da altura da chama (R). Conforme apresentado na Tabela 7.

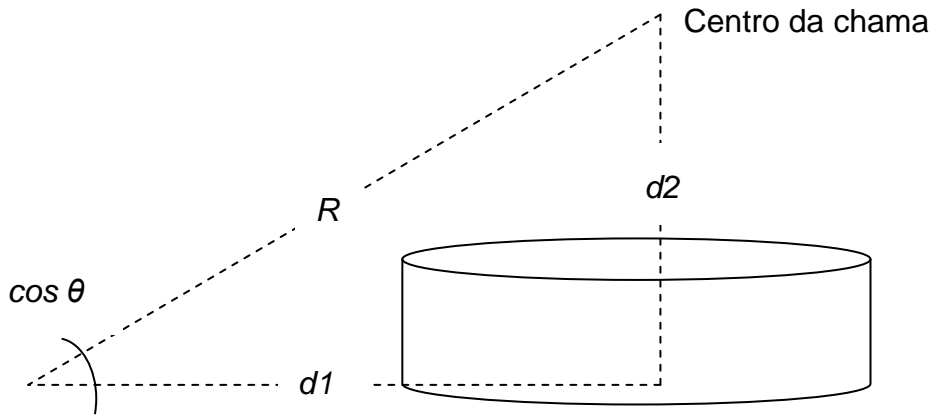


Figura 9 - Relações trigonométricas para determinação de R e cos θ

$$q'' = \frac{x_r Q \cos \theta}{4\pi R^2} = \frac{0,4 * 5.080.938,87 * \cos (64,43/70,00)}{4 * 3,1415 * 70^2} = 19,98 \text{ KW/m}^2$$

Tabela 7 - Resultados do fluxo de calor para o modelo de Ponto de Origem

Ponto de interesse:	d1	d1 ²	d2	d2 ²	R	cos θ	q'' KW/m ²
Início da rua	50,43	2.543,19	41,996	1.763,68	65,63	0,719	27,00
No equipamento fixo de combate a emergência	58,43	3.414,07			71,96	0,688	21,49
Topo do teto do tanque adjacente	64,43	4.151,22	27,366	748,91	70,00	0,605	19,98
Base do tanque adjacente	64,43	4.151,22	41,996	1.763,68	76,91	0,669	18,30
Lateral do tanque do outro lado da rua	89,43	7.997,72			98,80	0,618	10,23
Lateral dos tanques na transversal	124,43	15.482,83			131,33	0,584	5,47

Como discutido no capítulo 4, o modelo de ponto de origem possui um limite de aplicabilidade de 0 até 5 kW/m². Como todos os valores ficaram acima deste limite, deve-se utilizar outro método.

5.6.2 Modelo de chama Sólida

a) Transmissividade atmosférica (ζ):

Cálculo da pressão de vapor atmosférica:

$$P_w = 1013,25(URA) \exp\left(14,4114 - \frac{5328}{T_a}\right) = 1013,25 * 85 * e^{14,4114 - \frac{5328}{25+273}}$$

$$= \mathbf{2.685,91 Pa}$$

A transmissividade atmosférica depende da distância do alvo até a fonte emissora, assim, deve-se calcular para cada alvo. A seguir é apresentado para o primeiro ponto (37m) e na Tabela 8 para os outros pontos.

$$\zeta = 2,02(P_w X_s)^{-0,09} = 2,02 * (2.685,91 * 37)^{-0,09} = \mathbf{0,717}$$

b) Fator de Forma:

O valor do fator de forma para o primeiro ponto, considerando-se no nível do solo está representado na seqüência.

$$F_{12}(x, H_f + H) = \frac{2}{\pi} \arccos\left(\frac{D}{2x}\right) \operatorname{sen}\left[\arctan\left(\frac{H_f}{x - D/2}\right)\right]$$

$$= \frac{2}{3,1415} * \arccos\left(\frac{54,86}{2 * 37}\right) * \operatorname{sen}\left[\operatorname{arccot}\left(\frac{14,63 + 49,63}{37 - 54,86/2}\right)\right] = 0,5258$$

$$F_{12}(x, H) = \frac{2}{3,1415} * \arccos\left(\frac{54,86}{2 * 37}\right) * \operatorname{sen}\left[\operatorname{arccot}\left(\frac{14,63}{37 - 54,86/2}\right)\right] = 0,4449$$

Logo :

$$[F_{12}(x, H_f + H) - F_{12}(x, H)] = 0,5258 - 0,4449 = \mathbf{0,0809}$$

c) Fluxo de calor (kW/m^2):

Os valores finais para todos os pontos do fluxo de calor estão apresentados na Tabela 8, aqui mostramos o cálculo para o primeiro ponto:

$$q'' = F_{12} A_f \zeta \varepsilon \sigma (T_f^4 - T_0^4) = 0,0809 * 1 * 0,717 * 1 * 5,67 * 10^{-11} * (1273^4 - 298^4) = 8,616 \text{ kW/m}^2$$

Tabela 8 - Resultados do fluxo de calor para o modelo de Chama Sólida

Pto.	Ponto de interesse:	ζ	F_{12}	$q'' \text{ kW/m}^2$
1	Início da rua	0,748	-	1,00 **
2	No equipamento fixo de combate a emergência	0,729	0,019	2,20
3	Topo do teto do tanque adjacente	0,717	0,151	55,57
4	Base do tanque adjacente	0,717	0,081	8,62
5	Lateral do tanque do outro lado da rua	0,685	0,143	14,56
6	Lateral dos tanques na transversal	0,658	0,086	8,42

** este ponto apresenta um valor abaixo do valor mínimo (1 kW/m²) devido à sombra causada pelo costado.

5.7 Comparação entre os dois modelos de fluxo de calor

Conforme apresentado nas

Tabela 7 e Tabela 8 os modelos usados para a determinação do fluxo de calor radiativo incidente em cada ponto alvo apresentaram valores diferentes, conforme repetido na

Tabela 9 para fins de comparação.

Tabela 9 - Comparação entre os fluxos de calor para os dois modelos

Pto.	Ponto de interesse:	Modelo de Fluxo de Calor (kW/m ²):	
		Ponto de origem	Chama Sólida
1	Início da rua	27,00	1,00 **
2	No equipamento fixo de combate a emergência	21,49	2,02
3	Topo do teto do tanque adjacente	19,98	55,57
4	Base do tanque adjacente	18,30	8,62
5	Lateral do tanque do outro lado da rua	10,23	14,56
6	Lateral dos tanques na transversal	5,47	8,42

** este ponto apresenta um valor abaixo do valor mínimo (1 kW/m²) devido à sombra causada pelo costado.

O modelo de ponto de origem, conforme mencionado no capítulo 4, apresenta uma faixa de aplicabilidade de zero até 5 kW/m^2 , desta forma desconsidera-se o resultado encontrado com o uso deste modelo.

E assim, o modelo de chama sólida apresenta a melhor aproximação esperada para o gradiente de fluxo de calor ao redor do tanque sinistrado, tal gradiente pode ser avaliado pela Figura 10. Os valores para o fluxo de calor de todos os pontos calculados está disponível no Anexo 4.

Percebe-se, conforme mencionado no capítulo anterior que junto ao costado do tanque o fluxo de calor é nulo. A partir de aproximadamente 28 m da lateral do tanque é que inicia o aumento do fluxo de calor de forma exponencial, atingindo um valor máximo de aproximadamente $15,5 \text{ kW/m}^2$ a uma distância de aproximadamente 54 metros da lateral do tanque, vindo a diminuir exponencialmente até um valor de fluxo mínimo (fluxo de um dia ensolarado) de 1 kW/m^2 a uma distância de aproximadamente 285 m.

No gráfico estão marcados os fluxos térmicos de 1,7 e $4,73 \text{ kW/m}^2$, respectivamente: fluxo seguro para permanência de pessoas sem proteção e fluxo térmico máximo seguro para pessoas envolvidas no controle da emergência, com devida proteção.

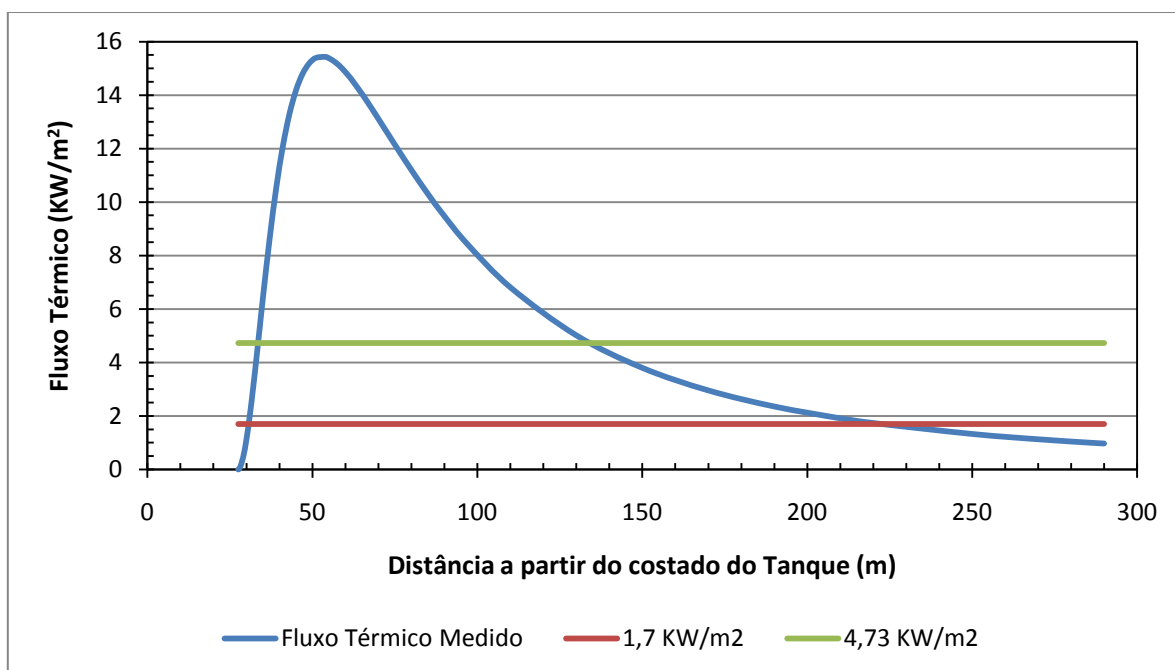


Figura 10 - Distribuição de fluxos térmicos pelo modelo de Chama Sólida

Pelo modelo de chama sólida, determinou-se ainda os fluxos térmicos no topo dos tanques vizinhos, ou seja, sem desconsiderar a “sombra” causada pelo costado do tanque sinistrado. Estes valores estão apresentados na Tabela 10.

Tabela 10 - Fluxos térmicos para equipamentos vizinhos à mesma altura

Tanques	Distância (m)	Fluxo Térmico (kW/m ²)	T _s (°C)
Adjacentes	37	55,57	723,99
Outro lado rua	62	24,33	449,57
Na transversal	97	10,35	333,04

5.8 Tempo para sentir dor e tempo para queimadura de segundo grau:

A Figura 11 apresenta os resultados do tempo para limiar do sentimento de dor e para o tempo de ocorrer queimadura de segundo grau, conforme apresentado na descrição do Modelo, capítulo 4, pelo uso das Equações 17 e 18.

Nota-se que bastam 10 segundos a 150m para o sentimento de dor devido à radiação térmica, e pouco mais de 30 segundos para ocorrência de queimaduras de segundo grau neste indivíduo exposto a 150 m sem proteção alguma.

Já para as regiões próximas ao fluxo máximo basta 1 segundo para ocorrência de dor e menos de 5 segundos para início das queimaduras de segundo grau.

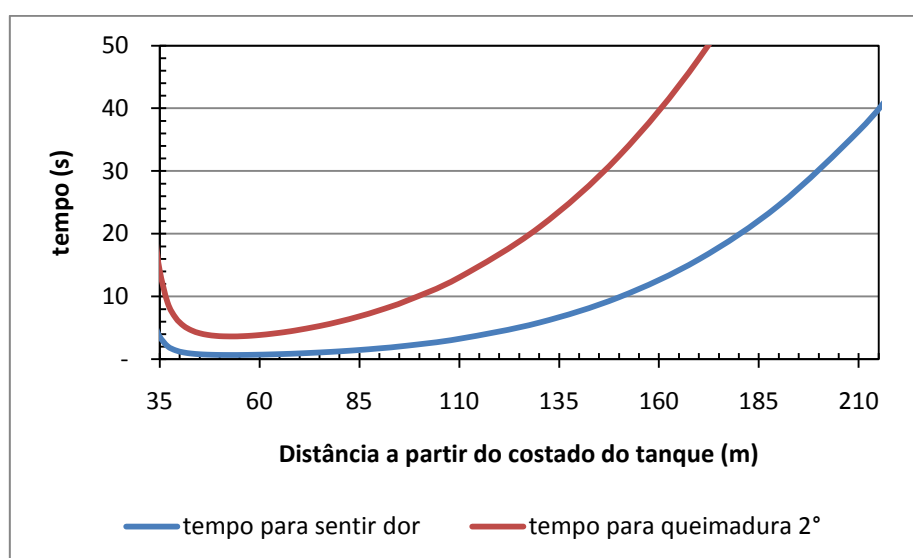


Figura 11 - Tempos para sentir dor (t_p) e tempo para queimadura de segundo grau (t_{2b}).

5.9 Temperatura de superfície (°C):

Desconsiderando-se o efeito convectivo e a transferência de calor no interior do sólido, conforme explicado no capítulo 4 (Modelo), utilizando-se a Equação 16, determinou-se os valores, que estão apresentados na Tabela 11, a seguir é mostrado o cálculo para um ponto do fluxo térmico pelo método de Chama Sólida.

É importante lembrar, que esta temperatura não é atingida instantaneamente, mas sim após um tempo específico para cada ponto, conforme a intensidade do fluxo térmico na região.

$$T_s = \left[\frac{q''}{\sigma} + T_0^4 \right]^{1/4} = \left[\frac{55,57}{5,67e^{-11}} + (273 + 25)^4 \right]^{1/4} = 996,99 \text{ K} = \mathbf{723,99^\circ\text{C}}$$

A Tabela 10 apresenta as temperaturas determinadas para os tanques vizinhos ao tanque sinistrado. Nota-se que o topo do teto dos tanques adjacentes (37 m do costado do tanque sinistrado) está a uma temperatura de aproximadamente 724°C, muito superior a faixa de temperatura de 500 a 550°C considerada como crítica para o aço, conforme anunciado. Nestes equipamentos existe a possibilidade da perda das propriedades físicas de resistência do metal com possível adernamento do tanque se não for realizado um efetivo resfriamento nestes equipamentos, as distancias entre os tanques está abaixo das distâncias recomendadas para manter os níveis de radiação inferiores a 37,8 kW/m² (Crocker e Napier, 1997).

5.10 Curvas de Probit:

Com a manipulação do termo tempo na Equação 19, obtém-se a equação 20, que segue, e através desta foi determinado o tempo necessário para a letalidade de 50% ($Y = 5$) das pessoas expostas a um fluxo térmico específico, sem proteção térmica adequada. Os tempos em segundos para toda a região próxima ao tanque, desde o

costado até 350m estão apresentado no Anexo 4, a Figura 12 apresenta um gráfico com os valores de tempo para quais Probit é igual a 5 (cinco).

A Tabela 11 apresenta os resultados para todas variáveis importantes para o modelo de Chama Sólida.

$$t = \frac{10^4 e^{\frac{Y+14,9}{2,56}}}{I^{4/3}} \quad (20)$$

Tabela 11 - Fluxo térmico, temperatura superfície e tempo necessário para 50% de probabilidade de morte (Y=5)

Pto.	Ponto de interesse:	Distância (m)	q'' (KW/m^2)	T_s ($^{\circ}C$)	t (s), (Y=5)	t (min)
1	Início da rua	23	zero	25	-	-
2	No equipamento fixo de combate a emergência	31	2,02	183,58	932,63	15,5
3	Topo do teto do tanque adjacente	37	55,57	723,99	11,21	-
4	Base do tanque adjacente	37	8,62	359,30	134,55	2,25
5	Lateral do tanque do outro lado da rua	62	14,56	444,22	66,87	1,11
6	Lateral dos tanques na transversal	97	8,42	355,89	138,69	2,31
-	Ponto de máxima radiação no solo	53,8	15,43	454,39	61,89	-

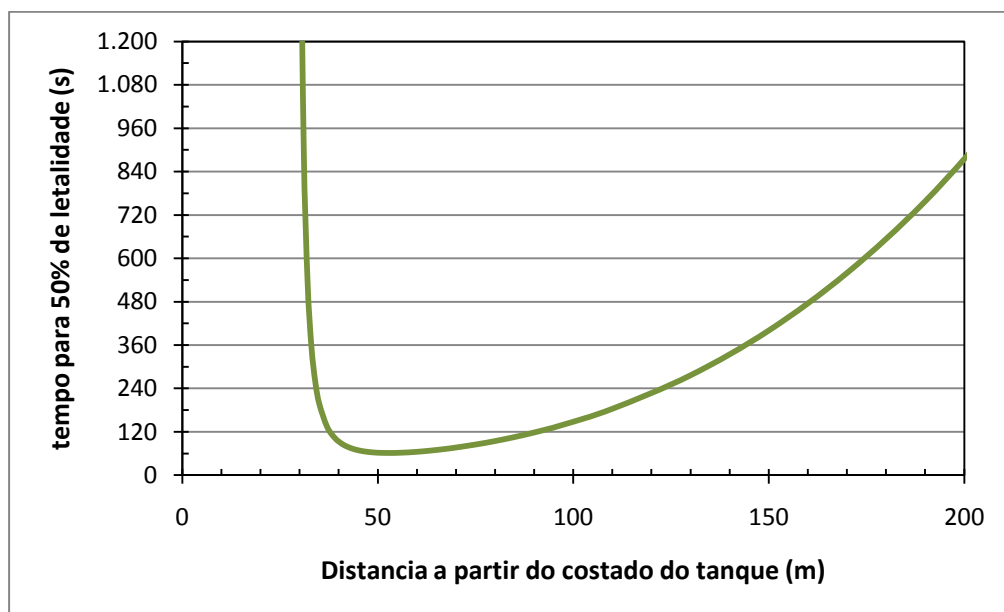


Figura 12 - Tempo necessário de exposição sem proteção para atingir 50% de letalidade numa amostra de pessoas envolvidas.

A Figura 13 é uma aproximação para a região de alto fluxo de calor, para que seja possível avaliar o tempo médio para 50% de letalidade. Nota-se que com uma exposição de menos de 2 minutos na região de máximo fluxo de calor (entre 38 e 90 m do costado do tanque) já são suficientes para uma probabilidade de 50% de letalidade devido aos efeitos causados pela alta radiação térmica.

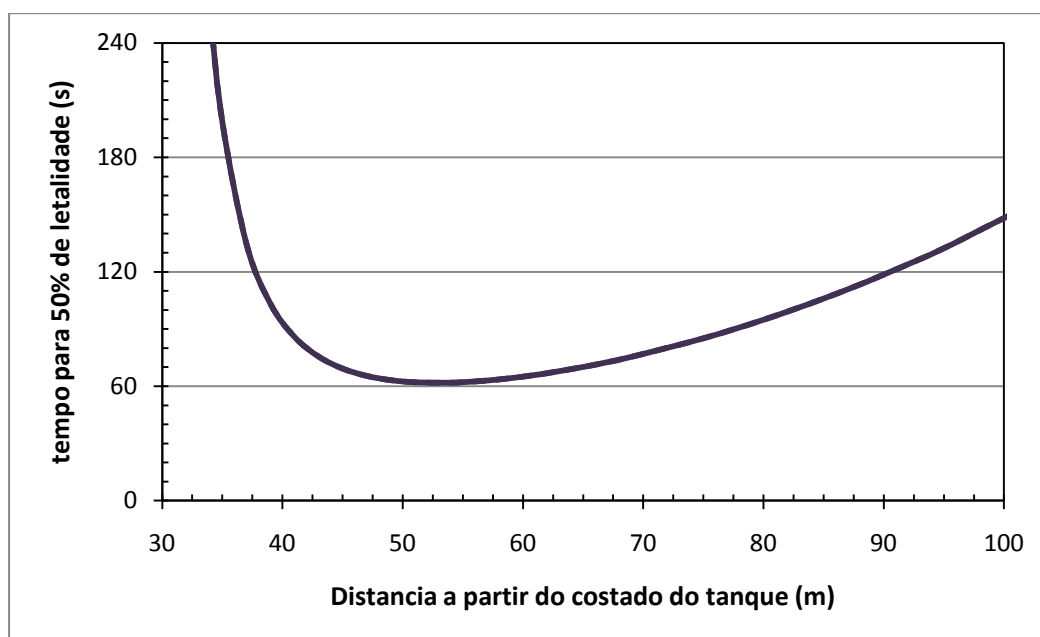


Figura 13 - Aproximação da Figura 12 para a região de máximo fluxo de calor

5.11 Resultados aplicados no PAE

A Figura 14 apresenta uma imagem de satélite da área com a linha que indica o fluxo térmico máximo ($15,44\text{kW/m}^2$), localizado a 53,8 m do costado do tanque.

A área (rosca circular) marcada na Figura 14 indica a região de fluxo térmico crítico (maior que 10kW/m^2) que por Probit indica uma permanência máxima de 2 minutos para pessoas sem proteção para a probabilidade de 50% de letalidade ($Y=5$). O critério para a escolha desta região de 10kW/m^2 foi para indicar a área onde pelo requisito da NFPA 1971 as vestimentas especiais de bombeiros seriam avaliadas, e desta forma apresentar a região onde não seria indicada a permanência de profissionais envolvidos por longos tempos, mesmo dispondo de vestimentas especiais.

Todos os cenários foram desenvolvidos para uma condição de vento nulo, logo as curvas de mesmo fluxo térmico são círculos geometricamente distribuídos ao redor do tanque.

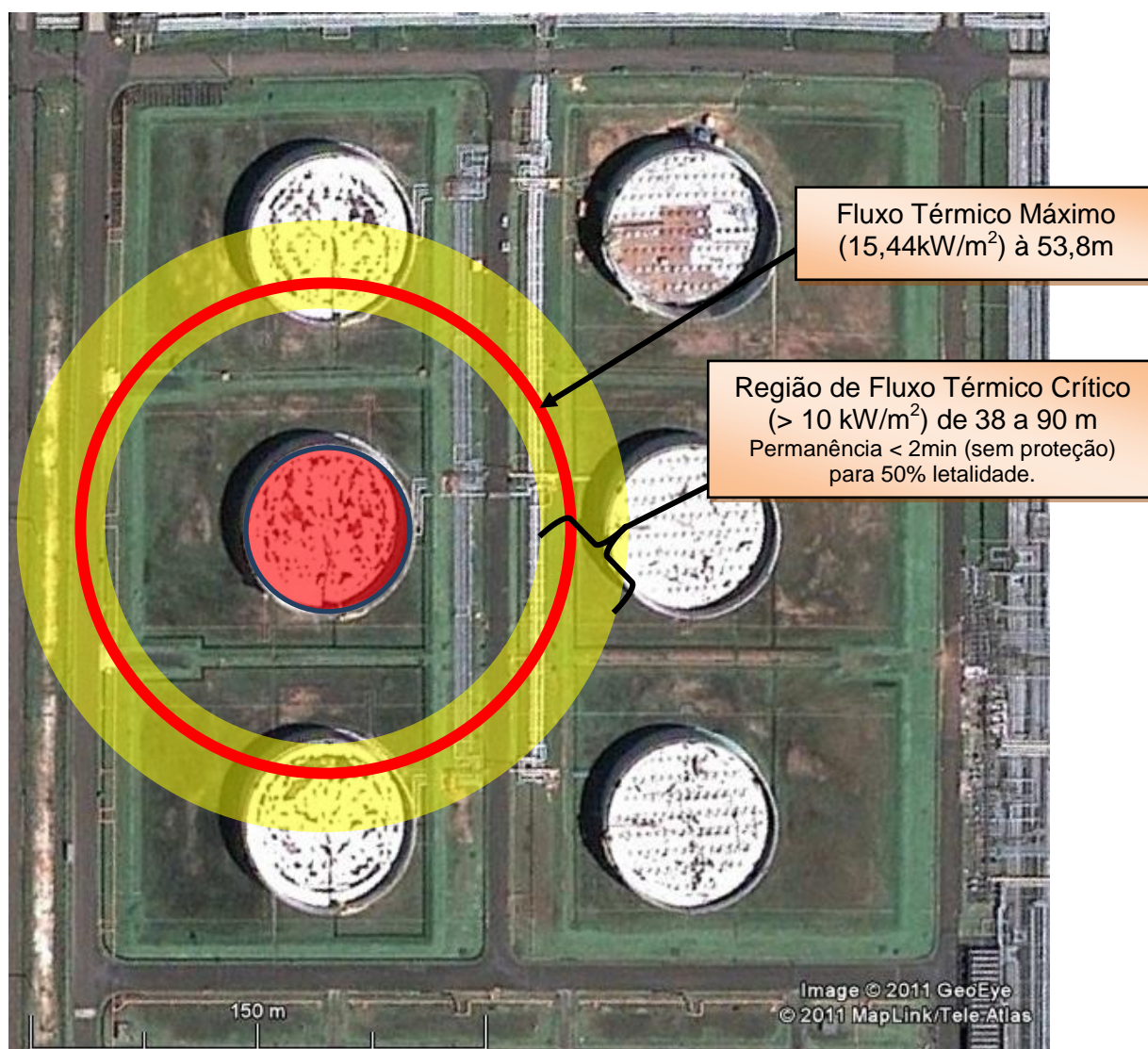


Figura 14 - Região de fluxo térmico máximo e fluxo crítico.

Já na Figura 15 estão apresentadas as linhas que representam as zonas de atuação, conforme a definição de zonas de risco apresentada no capítulo 2.

A primeira região marcada (vermelho) é uma zona de alto risco, pois está limitada pelo valor de 4,73 kW/m² (à aproximadamente 134 m do costado do tanque), que segundo CCPS (1999), Crocker e Napier (1997) e Schubach apud CCPS (1999) indica um bom valor para determinar um fluxo térmico seguro a pessoas expostas com

roupas de proteção adequadas. Pela definição esta área pode ser considerada a zona quente.

A segunda linha (amarela) indica a limitação da região de $1,7 \text{ kW/m}^2$ (222m) que segundo CCPS (1999) abaixo deste valor não existe risco para pessoal exposto, sem proteção, mesmo por longos períodos de tempo. Seria a zona morna da definição do pré-plano. E a condição normal de fluxo térmico (linha verde), comparada a um dia ensolarado de verão (1 kW/m^2), ocorreria a aproximadamente 285m do costado do tanque, nesta distância teoricamente não se perceberia mais o aumento do fluxo térmico devido ao incêndio.

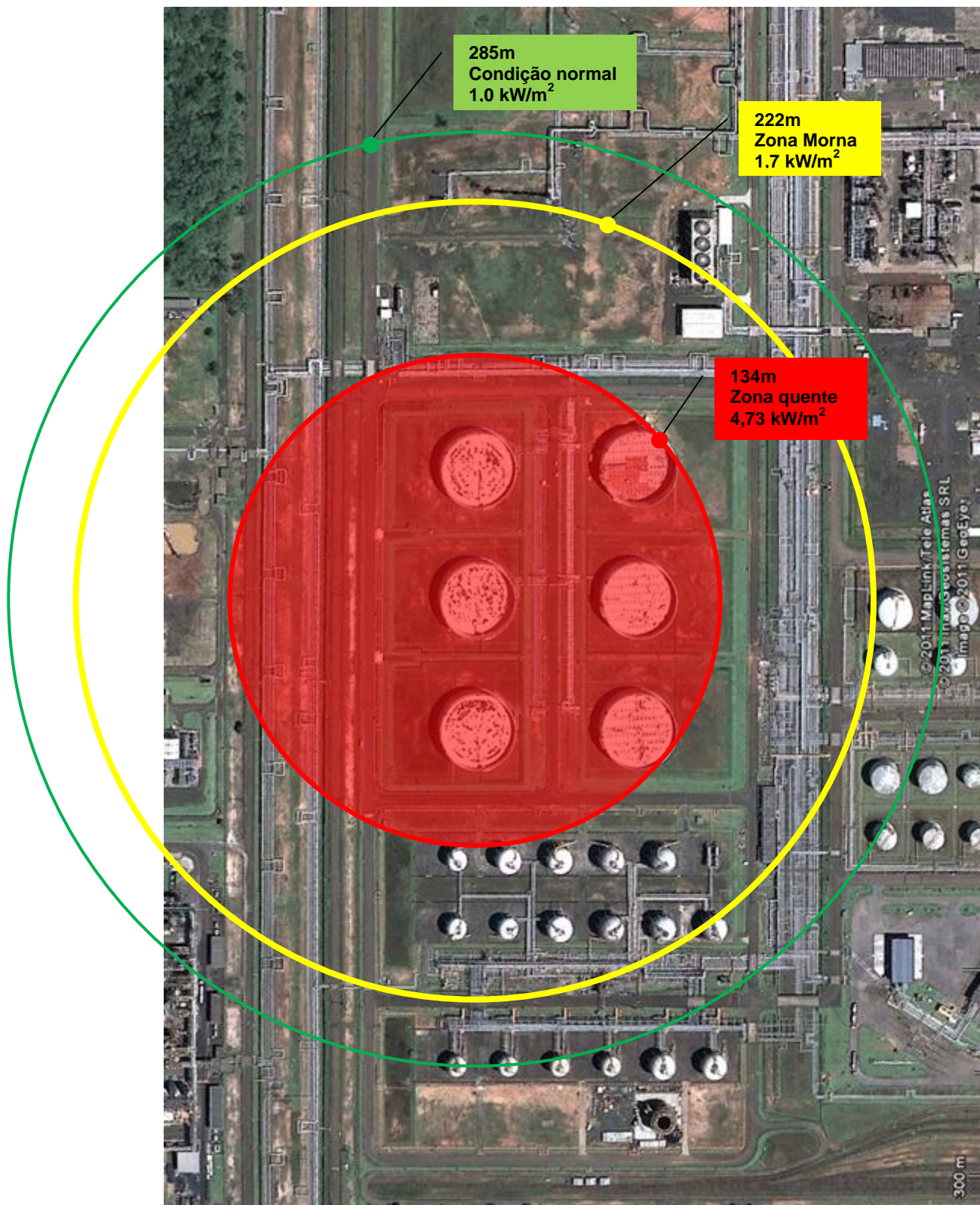


Figura 15 - Zonas de risco.

6. CONCLUSÃO

Grandes incêndios, ao longo do tempo, trouxeram enormes perdas materiais e muitas vezes, perdas humanas. Porém foram úteis para gerar uma enorme gama de informações que possibilitou conhecer o modo como ocorrem e os seus efeitos. Através destes dados reais e de modelos matemáticos baseados em dados empíricos foi possível, durante anos de evolução, aperfeiçoar as técnicas de análise quantitativa das possíveis conseqüências oriundas dos mais prováveis cenários de incêndio.

Este trabalho só foi possível pelo uso de um modelo matemático baseado nestes dados experimentais em constante evolução. O método de FHA (Fire Hazard Analysis) desenvolvido por CCPS (2003) com a introdução do modelo proposto por Crocker e Napier (1997) para o fluxo térmico em tanques de armazenamento de líquidos inflamáveis mostrou-se útil para determinar de forma rápida, e como uma primeira estimativa, os efeitos térmicos de um provável cenário de incêndio de grandes proporções.

Foi possível verificar que o modelo de determinação do fluxo de calor, ponto de origem, não apresenta um resultado satisfatório para a determinação da intensidade radiativa sobre alvos próximos expostos a grandes incêndios, pois apresenta uma incidência maior que o limite máximo de aplicabilidade do modelo. Sendo assim inadequado para estes cenários.

Por outro lado, o modelo de chama sólida apresentou um resultado satisfatório para a determinação dos fluxos térmicos, considerando o efeito de “sombra” do costado do tanque de aproximadamente 15m de altura, mostrando um perfil de fluxo térmico característico, com um pico de máximo ($15,43\text{kW/m}^2$) a aproximadamente 54m de distância do costado do tanque e reduzindo a intensidade de forma exponencial até um valor considerado normal (1kW/m^2) a aproximadamente 285m do costado do tanque.

Outro resultado importante e simples de se determinar para cenários de incêndio em tanques é o tempo de queima do inventário se nenhuma ação ofensiva for tomada, para o caso estudado este valor é de aproximadamente 61 horas de duração, para um nível máximo de nafta no tanque. Um tempo elevado que pode determinar a falha de estruturas próximas se nenhum resfriamento for planejado para estes equipamentos.

Verifica-se que o projeto da área de tancagem onde o tanque estudado se encontra não se enquadra nos valores de distancias entre tanques definidos por Crocker e Napier (1997), de aproximadamente uma vez o diâmetro do tanque sinistrado (para garantir fluxos térmicos inferiores a $37,8 \text{ kW/m}^2$ nos reservatórios vizinhos), o caso estudado é de aproximadamente 0,67 para os tanques mais próximos (37m). Desta forma, provavelmente os dois tanques localizados a uma distancia menor que uma vez o diâmetro do tanque, estariam expostos a uma radiação superior ($55,57 \text{ kW/m}^2$) aquela em que o metal é capaz de suportar sem sofrer nenhuma perda de resistência e ocasionaria o adernamento do costado deste tanque, desde que nenhum resfriamento (conforme previsto em normas) fosse garantido.

O estudo demonstrou que as zonas de risco para fins de atuação estão a uma distancia de aproximadamente 134m (zona quente, $4,73 \text{ kW/m}^2$) e 222m (zona morna, $1,70 \text{ kW/m}^2$). Estas distâncias inviabilizam a utilização dos equipamentos de controle de emergência existentes próximos ao tanque sinistrado (canhões fixos, tomadas de água para combate a incêndio, tomadas de injeção de espuma) e desta forma deveriam ser propostos estudos complementares para a alteração do projeto destes equipamentos, de forma a garantir a possibilidade da aproximação de pessoas e equipamentos necessários no controle. Alternativamente, o revezamento de pessoal poderia ser previsto como meio de reduzir a exposição, entretanto não interferindo na questão de equipamentos expostos, e ainda agregando um risco as pessoas expostas às taxas de calor acima do recomendado, mesmo que por um período de tempo menor e relativamente controlado.

Parece claro que Foster e Roberts (1995) determinaram valores muito conservativos para as zonas de atuação da equipe de atendimento, se fosse seguida esta referencia para o estudo de caso, teríamos uma zona quente limitada a 1 kW/m^2 (ou 100°C) a uma distancia de aproximadamente 285m do costado do tanque. Um valor impraticável para qualquer tipo de aproximação necessária para o controle da emergência.

Devido ao grau de imprecisão nas temperaturas calculadas pelo método empírico utilizado sugere-se a aquisição de um equipamento de medição de intensidade térmica na região de atuação da equipe, como por exemplo, câmeras térmicas, amplamente utilizadas por equipes de atuação em emergências. Lembrando

que isto não inviabiliza o uso do pré-plano como ferramenta de treinamento da equipe, como primeira estimativa de temperaturas e fluxos.

A determinação quantitativa dos efeitos dos prováveis cenários de incêndio do inventário de líquidos inflamáveis de uma empresa possibilita, em última análise, o enriquecimento das informações disponíveis para a elaboração dos pré-planos de emergência desta empresa, que compõe o seu PAE, sendo assim, a análise quantitativa deveria ser encarada como uma etapa fundamental para garantir uma vera semelhança entre os cenários levantados durante o estudo inicial e os reais efeitos esperados destes incêndios.

Através da determinação dos valores de intensidade térmica na região próxima ao sinistro é possível definir algumas variáveis importantes para a ação tática da equipe de atuação, como locais seguros para o posto de comando da emergência e das viaturas e equipamentos envolvidos no controle do acidente.

E por fim, um pré-plano que apresente as distâncias das zonas de atuação coerente com a realidade são imprescindíveis como ferramenta para o aprendizado da equipe, pois pode suportar a execução de exercícios simulados de emergência, além da determinação da distancia segura e factível com os cenários potenciais para projetos de equipamentos fixos de combate a incêndio.

REFERÊNCIAS

- CCPS - Center for Chemical Process Safety, **Guidelines for consequence Analysis of Chemical Releases**, American Institute of Chemical Engineers AIChE, New York, 1999.
- CCPS - Center for Chemical Process Safety, **Guidelines for Technical planning for on-site emergencies**, American Institute of Chemical Engineers AIChE, 1995.
- CCPS - Center for Chemical Process Safety, **Fire Protection in Chemical, Petrochemical, and Hydrocarbon Processing Facilities**, American Institute of Chemical Engineers AIChE, 2nd ed., New York, 2003.
- Crocker W. P. e Napier D. H. **Thermal Radiation of Liquid Pool Fires and Tank Fires**, Department of Chemical Engineering and Chemistry, University of Toronto, Canada, 1997.
- Foster J. A. e Roberts G. V., **Measurements of the Firefighting Environment**, Central Fire Brigades Advisory Council Research Report 61/1994, Home Office Fire Research and Development Group, Fire Engineers Journal, Reino Unido, 1995.
- Gre, L. I. C. e Barrera P. R., **Apostila de Gerenciamento de Risco de Processo**, Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Especialização em Engenharia de Segurança do Trabalho, Porto Alegre, 2011.
- NFPA 1971 - National Fire Protection Association, **Standard on Protective Ensemble for Structural Fire Fighting**, Edition 2007. Disponível em www.nfpa.org
- SFPE - Society of Fire Protection Engineers Engineering Guide, **Assessing Flame Radiation to External Targets from Pool Fires**, Bethesda, MD. 1999.
- SFPE Society of Fire Protection Engineers, Bethesda, **Engineering Guide for Predicting 1st and 2nd Degree Skin Burns from Thermal Radiation**, MD, 2000.
- Stoll, A.M. e Chianta, M.A., **A Method and Rating System for Evaluation of Thermal Protection**, Report No. NADC-MR-6809, Naval Air Development Center, Johnsville, PA, 1968.
- Sudheer S. e Prabhu S. V. **Measurement of Flame Emissivity of Hydrocarbon Pool Fires**, Department of Mechanical Engineering, Indian Institute of Technology, Bombay, Mumbai 400076, India, 2010.
- Wieczorek C. J. and Dembsey A. N. **Human Variability Correction Factors for Use with Simplified Engineering Tools for Predicting Pain and Second Degree Skin Burns**, Journal of Fire Protection Engineering 2001, disponível em: <http://jfe.sagepub.com/content/11/2/88>

ANEXO 1 - Exemplo de informações para pré plano de emergência (CCPS, 1999)

<i>Information</i>	<i>Description</i>
GENERAL	
Facility identification	Facility name (use common name)
Facility plot plan	Is it current?
Date	Date the information is gathered
Number of levels in structures	Number of floors from ground floor up (or height if more appropriate)
Structure dimensions	Estimate the overall size of building or open structure.
People in area during day and night	Typical number of people that can be found in the area during the day and night time. Any special needs people?
Included areas	Describe the area(s) that are associated with building/facility/area.
Sub levels	Number of below ground levels
Facility activity	What activities are taking place in the area?
STRUCTURE	
Construction type	What is the structure made of?
Exterior doors, type and number	What are outer doors made of, how many, and how do they work?
Elevators/lifts	State if structure has elevators and, if so, where.
Stairway location construction	State where stairs are located and what they are made of.
Interior wall construction	What are the walls inside structure made of?
Exits illuminated?	Are the exits illuminated and do they have back-up power (battery)?
Corridor widths/height	How wide are the corridors and aisles and how high are both?
PROCESS EQUIPMENT	
Tanks/vessels	Number of tanks/vessels and size in gallons
Tank/vessel construction	What is each tank/vessel made of, pressure rating, relief settings, insulation?
Contents	What product does it contain and quantity?
Marking system	What marking system is used on the tank (e.g., NFPA 704)?
Dikes and berms	What are the dikes and berms made of and how much product will it hold? Are there drains in the diked area? Can drains be shut?
Sprinklers	Sprinkled area?

<i>Information</i>	<i>Description</i>
PROCESS EQUIPMENT <i>(continued)</i>	
Chemical shutoffs	Locations
Drainage description	Where will liquids running from the area go?
SUPPRESSION	
Foam system	Do tanks have foam or subsurface system?
Water monitor	Is tank area protected by water monitor system? Can foam be used in the system?
UTILITIES	
Heating type	What type of heat is used? What is the fuel source?
Electrical shutoff location	Where are the panel boxes or main shutoffs and what type breakers, fuses?
Gas shutoffs locations	If gas is used in the area, where are the shutoffs?
Water shutoffs locations	Where are the water shutoffs?
PROTECTION SYSTEMS	
Fire alarm type	Does the fire alarm sound only in the area or does it go off some where else?
Fire detection type	State type of alarm in area, if any.
Sprinkler type	Does system cover entire area or just sections?
Sprinkler wet or dry	Is the system wet or dry? What are the sprinkler heads rated for?
Sprinkler fire department connection	Where is the fire department connection for the sprinkler system? On the outside of any structure? Design pressure?
Portable extinguishers	Number and location
Portable extinguisher: type	State what types of extinguishers are maintained in area.
Standpipe fire department connection	Does the area have a standpipe system? If so where is it located and where is the fire department connection? Size and thread?
Standpipe hose diameter	Does the standpipe system have fire hose stations? If so, what size is the hose?
Standpipe wet or dry	Is the system wet or dry?
Nearest hydrant	Where is the nearest hydrant?
Secondary water source	Where would the secondary water source be found?
Other protection systems	List any other fire protection systems in area.

<i>Information</i>	<i>Description</i>
INSTRUMENTATION	
Inventory devices	Are there high-level alarms on tanks?
Leak detectors	Are there any leak detectors in the diked area or on tanks?
RESPONSE CONSIDERATIONS	
Chemicals in area	What chemicals are stored or used in the area?
Other "in-process" chemicals	What chemicals are produced during the process, if any?
Process description	Briefly describe the type of process taking place in area?
List of credible incidents	Taken from studies of what can go wrong.
Summary of hazards	Give a brief statement or overview of hazards in area.
Nearby hazards	List hazards that are nearby such as chemical storage, other processes taking place in building nearby.
Response considerations	Try to think of any information that a fire department or other emergency responders will need to know if a problem were to occur, such as any special mitigation techniques or actions, how would they get to the area, or whether they would need special tools.
Other comments	This area is for any additional information.

ANEXO 2 - Exemplo de Pré-Planing (CCPS, 2003)

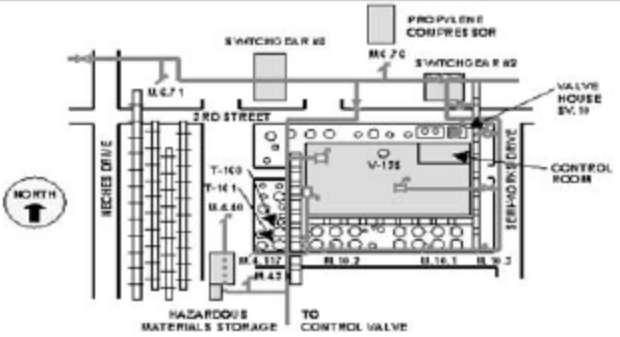
ABC Chemical Corporation Emergency Response Pre-Plans Somewhere, Texas					Review Date:
					00-Jan-00
Equipment:	Unit:	Batch:	Emergency Contact:		
V-135 Reactor	S1B	193	Incident Commander		
Location:		Muster Point:		Emergency Contact Phone:	
North and Northeast		ABC Control Room		000-000-000	
Area Contents:	Special Hazards:		ERG Guide Number:		
Process Equipment	Sulfur Monochloride (S2CL)		137		
Storage Configuration:	Storage Quantity:	Storage Height:	Storage Width:	Storage Length:	
NA	NA	NA	0	0	
Type of Structure:	Dimensions (N/S):	Dimensions (E/W):	Structure Height:	Structure Stories:	
Interior	100	250	30	2	
Roof Construction:	Fiberglass on steel		Vertical Openings:		
Wall Construction:	Fiberglass on steel columns		None		
Floor Construction:	Metal grating on steel beams		Venting:		
			None		
			Vent Operation:		
			NA		
			Vent Operator Locations:		
			NA		
North Egress Point:	Door		North Exposure:		
South Egress Point:	Door		Propylene Compressors		
East Egress Point:	Door, Bay Door		South Exposure:		
West Egress Point:	Door, Bay Door		PAO		
			East Exposure:		
			IV Expansion		
			West Exposure:		
			Rail Car Dock		
Raw Materials/Utilities:		Use:	Shutoff Location:		
S2C1		V-135 Reactor	Near V-138		
Isobutylene (IC4)		V-135 Reactor	Near V-161		
Electricity		V-135 Reactor	In Switchgear #2		
Steam		V-135 Reactor	Near V-134		
Fire Protection System:	System Design:	System Pressure:	System Control Valve Locations		
S1B Deluge			Valve house east side of building		
Monitor/Hydrant:	Flow:	Distance:	Drainage:		
M-134	700	100	Lift Station #4		
M-233	700	150			
	0	0			
FW Pumps:	FW Pump Flow:	FW Pump Pressure:	FW Pump Drivers:	FW Pump Status:	
P101/102/201/202	2500	150	All diesel driven	Standby	
Chemical:	Reacts:	Extinguishing Media:			
S2C1	Reacts violently with water.	Dry Chem. Dry sand, CO2, H2O.			
Special Precaution:	Contact with water generates highly toxic fumes; HCl, chlorine gas, SO2 and H2S.				
PPE Requirements:	Bunker gear, SCBA.				

**ABC Chemical Corporation
Emergency Response Pre-plans
Somewhere, Texas**

Review Date:

00-Jan-00

Plot Plan:



Fire Procedures:

- Isolate S2C1 to V135 with block valve near V138.
- Apply dry chemical, dry sand, or CO2 to fire.
- Do not use water on the S2C1 material itself.
- If large quantities of S2Dc1 combustible are involved, use water in flooding quantities as spray and fog.
- Apply water from as far a distance as possible.
- Use water to keep fire exposed equipment cool.
- Use water spray to knock down vapors.

Isolation Procedures:

- Isolate S2C1 to V135 with block valve near V138 at grade.
- Isolate IC4 to V135 with block valve in pipe rack near V161 with chain operator.
- Isolate electricity to V-135 in Switchgear #2.
- Isolate steam to V135 with block valve near V134.

Environmental / Runoff Procedures:

- Dig a pit, pond, lagoon, holding area to contain liquid or solid material
- Dike surface flow using soil, sand bags, foamed Polyurethane, or foamed concrete.
- Neutralize with agricultural lime (CaO), crushed Limestone (CaCO3), or sodium bicarbonate (NaHCO3).
- Apply water spray or mist to knock down vapors.
- Vapor knock down is corrosive or toxic and should be diked for containment.

Operation of Mitigating Systems Procedures:

- Manually operate SIB Deluge System with switches on east or west walls or from valve house.
- Use monitors and hand-held hose lines for exposure protection as necessary.

Evacuation Distances

All directions

600 ft

Downwind:

2 miles

Anexo 3 - Modelo de Pré-plano

PRÉ PLANO DE EMERGÊNCIA		Classificação:
TANQUE DE NAFTA		
DADOS DO EQUIPAMENTO	DADOS FÍSICO-QUÍMICOS DO PRODUTO	FOTO DO EQUIPAMENTO OU LOCAL
Diâmetro: Altura: Volume: Área: Tipo de teto: Localização do equipamento:	Produto: Estado Físico: Temp. de Armazenamento: Ponto de fulgor: Ponto de Ignição: Ponto de Ebulição: Densidade Específica de Vapor (Ar=1): Densidade Específica (H2O=1): Faixa Explosiva: Aparência:	
TOXICIDADE	RECURSOS NECESSÁRIOS	
TLV/TWA (ACGIH/NIOSH): IDLH: Ação no organismo:	MATERIAIS	HUMANOS
	<u>Viaturas</u>	<u>Equipamentos hidráulicos</u>
	<u>EPI's</u>	<u>Brigada de Emergência</u>
OUTRAS INFORMAÇÕES	<u>Outros</u>	
Vento Predominante: Itinerário: Isolamento: Posto de Comando: Nível de Proteção:		
		Cosumos Previstos em litros/m ³ :

PRÉ PLANO DE EMERGÊNCIA		Classificação:
TANQUE DE NAFTA		
CENÁRIOS ACIDENTAIS		
Adernamento do teto com fogo e perda das câmaras de espuma		
AÇÕES		
1. Manobras de Controle de Emergência:		
2. Manobras operacionais:		
3. Norma ABNT (NBR 7505-4): 3.1. Aplicação de Espuma:		
3.2. Refrigeração;		
4. Cálculo:		
Emitente:	Data: / /	Revisão: 00

ANEXO 4 - Tabela de dados calculados para distâncias a partir do costado do tanque

x	ζ	F_{12} ($H+H_f$)	F_{12} (H)	q''	T	t ($Y=5$)	t_p	t_{2b}
27,5	0,737	0,955	0,955	0,001	25,189	20126453,748	NA	NA
27,7	0,736	0,911	0,911	0,016	27,642	586056,627	NA	NA
28,0	0,735	0,871	0,871	0,068	35,791	85013,026	NA	NA
29,0	0,733	0,789	0,785	0,465	83,127	6599,562	NA	NA
30,0	0,731	0,734	0,723	1,138	135,917	1999,882	97,746	212,459
31,0	0,729	0,690	0,672	2,017	183,581	932,628	32,961	87,028
32,0	0,727	0,654	0,626	3,038	224,926	540,107	15,134	45,930
33,0	0,725	0,622	0,584	4,146	260,505	356,792	8,382	28,276
35,0	0,721	0,569	0,509	6,440	317,361	198,347	3,631	14,226
37,0	0,717	0,526	0,445	8,616	359,301	134,552	2,088	9,034
39,0	0,714	0,489	0,390	10,514	390,085	103,181	1,431	6,622
41,0	0,711	0,457	0,342	12,070	412,459	85,838	1,101	5,340
43,0	0,707	0,428	0,302	13,280	428,459	75,569	0,918	4,600
45,0	0,705	0,403	0,267	14,174	439,603	69,286	0,811	4,156
47,0	0,702	0,380	0,238	14,793	447,028	65,448	0,748	3,888
49,0	0,699	0,359	0,212	15,183	451,589	63,217	0,712	3,733
51,0	0,697	0,339	0,191	15,386	453,931	62,107	0,694	3,657
53,8	0,693	0,315	0,165	15,426	454,393	61,891	0,691	3,642
55,0	0,692	0,305	0,156	15,375	453,805	62,166	0,695	3,661
57,0	0,690	0,290	0,142	15,218	452,003	63,019	0,709	3,719
59,0	0,688	0,276	0,129	14,992	449,365	64,293	0,729	3,808
61,0	0,686	0,263	0,119	14,712	446,067	65,930	0,756	3,921
62,0	0,685	0,257	0,114	14,556	444,216	66,871	0,771	3,987
65,0	0,682	0,239	0,101	14,045	438,026	70,136	0,825	4,216
67,0	0,680	0,229	0,093	13,678	433,484	72,655	0,868	4,393
69,0	0,678	0,219	0,086	13,299	428,697	75,428	0,915	4,590
75,0	0,673	0,192	0,070	12,139	413,404	85,187	1,089	5,292
80,0	0,669	0,172	0,060	11,195	400,150	94,900	1,270	6,005
85,0	0,665	0,156	0,052	10,301	386,843	106,033	1,487	6,837
90,0	0,662	0,141	0,045	9,471	373,713	118,604	1,745	7,795
97,0	0,658	0,124	0,038	8,422	355,895	138,693	2,181	9,361
110,0	0,650	0,099	0,028	6,809	325,111	184,153	3,266	13,042
130,0	0,640	0,072	0,019	5,015	284,110	276,880	5,840	21,017
150,0	0,632	0,054	0,014	3,800	250,153	400,789	9,893	32,397
170,0	0,625	0,042	0,011	2,957	222,007	559,920	15,931	47,908
190,0	0,619	0,034	0,008	2,356	198,523	758,243	24,541	68,308
210,0	0,613	0,028	0,007	1,915	178,767	999,639	36,387	94,388
220,0	0,611	0,025	0,006	1,738	170,053	1137,679	43,752	109,810
250,0	0,604	0,019	0,005	1,329	147,693	1626,754	NA	NA
270,0	0,600	0,017	0,004	1,130	135,371	2019,834	NA	NA
285,0	0,597	0,015	0,003	1,008	127,230	2352,389	NA	NA
290,0	0,596	0,014	0,003	0,971	124,701	2470,725	NA	NA
330,0	0,589	0,011	0,003	0,739	107,276	3559,968	NA	NA
350,0	0,586	0,010	0,002	0,652	100,122	4205,204	NA	NA