



# **Estudo da Radiação Térmica Emitida por Incêndios em Poças**

Guilherme Lopes Barreto

Victor Hugo Meireles Gomes

## **Projeto Final de Curso**

**Orientador**

Prof. Carlos André Vaz Júnior, D.Sc.

Novembro de 2013

# **Estudo da Radiação Térmica Emitida por Incêndios em Poças**

*Guilherme Lopes Barreto*

*Victor Hugo Meireles Gomes*

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

Aprovado por:

---

Claudinei de Souza Guimarães, D. Sc.

---

Florian Alain Yannick Pradelle, Eng. Químico

---

Pedro Igor Veillard, Eng. Químico.

Orientado por:

---

Carlos André Vaz Júnior, D.Sc.

Rio de Janeiro, RJ – Brasil

Novembro de 2013

Barreto, Guilherme Lopes.

Gomes, Victor Hugo Meireles.

Estudo da Radiação Térmica Emitida por Incêndios em Poças/ Guilherme Lopes  
Barreto, Victor Hugo Meireles Gomes. Rio de Janeiro: UFRJ/EQ, 2013

xii, 74p.; il

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

Orientador: Carlos André Vaz Junior

1. Incêndio em Poça. 2. Simulação de Acidentes. 3. Radiação Térmica. 4.  
Projeto Final. (Graduação – UFRJ/EQ) 5. Carlos André Vaz Júnior. I. Estudo da  
Radiação Térmica Emitida por Incêndios em Poças

Aos meus pais e irmãos

(Guilherme Lopes Barreto)

À minha família e aos meus amigos.

(Victor Hugo Meireles Gomes)

"Os Deuses dão às crianças a sua sabedoria, pois elas não têm as mentes deformadas e torcidas pela vida"

Taylor Caldwell

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço especialmente aos meus pais, que mesmo antes de entrar na faculdade sempre me apoiaram e me incentivaram a estudar muito para me tornar um dia engenheiros como eles.

Guilherme Lopes Barreto

Agradeço aos meus pais que foram meu apoio e minha referência, aos professores por dedicadamente nos ensinarem a arte da Engenharia Química e a todos os amigos que fizeram parte desta conquista.

Victor Hugo Meireles Gomes

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

## **Estudo da Radiação Térmica Emitida por Incêndios em Poças**

Guilherme Lopes Barreto

Victor Hugo Meireles Gomes

Novembro, 2013

Orientador: Prof. Carlos André Vaz Junior

Grandes incêndios que se iniciaram em poças de líquidos inflamáveis são recorrentes na história da indústria química e petroquímica. Somente com a aplicação de medidas de segurança preventivas e de combate a incêndio garante-se o bom funcionamento de uma planta que opere com grandes quantidades de líquidos inflamáveis. Torna-se assim necessário reduzir ao mínimo o risco ao qual está submetida tanto a planta quanto a população vizinha. Este projeto apresenta estudo baseado no evento de incêndio ocorrido em Maio de 2013 na empresa Petrogold no Rio de Janeiro. A partir deste caso real, baseando-se unicamente em informações públicas e empregando modelagem matemática confiável, foi possível entender como o calor irradiado por incêndios em poça pode causar sérios danos à propriedade, aos trabalhadores, ao meio ambiente e a população local. A partir de modelos matemáticos de amplo uso o presente projeto apresenta a modelagem do caso citado, analisando suas consequências. De modo complementar, sugere-se um projeto de segurança para instalações industriais semelhantes, de acordo com as normas brasileiras vigentes. São avaliados fatores como distância de afastamento segura entre tanques de combustível, afastamento em relação a construções vizinhas e sistema fixo de combate a incêndio.

# ÍNDICE

1) INTRODUÇÃO .....	1
1.1. Incêndios na Indústria Química Brasileira.....	1
1.2. Objetivo geral .....	3
1.3. Objetivos Específicos .....	3
1.4. Estrutura do Trabalho .....	3
2) Parque de Tancagem .....	5
2.1. Quanto ao Formato .....	6
2.2. Quanto à Função: .....	6
2.3. Quanto ao Tipo de Teto .....	6
2.4. Quanto a Localização.....	8
2.5. Instrumentos e Acessórios .....	9
2.5.1. Respiro .....	9
2.5.2. Válvula de Pressão e Vácuo .....	9
2.5.3. Agitador.....	9
2.5.4. Sistema de Medição .....	9
2.5.5. Diques.....	10
3) Princípios Elementares do Fogo.....	11
3.1. Processo de Combustão .....	11
3.2. Combustível .....	11
3.2.1. Ponto de Fulgor ( <i>Flash Point</i> ).....	12
3.2.2. Ponto de Combustão ( <i>Fire Point</i> ) .....	12
3.2.3. Ponto de Auto Ignição.....	12
3.3. Comburente.....	12
3.4. Calor.....	13
3.4.1. Condução.....	13
3.4.2. Convecção .....	13
3.4.3. Radiação .....	14
4) O Evento Acidental da Petrogold S.A.....	15
4.1. A empresa .....	15
4.2. O incêndio.....	16

4.3.	Propriedades dos combustíveis armazenados: Álcool Etílico e Gasolina .....	17
5)	Modelagem matemática de incêndios: estudo de caso do evento Petrogold.....	18
5.1.	Incêndio em Poça.....	18
5.2.	Modelagem .....	18
5.2.1.	Primeiro Cenário: Incêndio em um único tanque.....	19
5.2.2.	Segundo Cenário: Incêndio no Dique .....	25
5.2.3.	Cenário Hipotético: Incêndio em uma Poça pequena .....	38
6)	Dimensionamento e Construção de Parques de Tancagem.....	41
6.1.	Aspectos técnicos que regem um Pátio de Tancagem .....	42
6.1.1.	Bacia de Contenção .....	43
6.1.2.	Circulação de Pessoas e Veículos .....	44
6.1.3.	Posição entre o costado dos tanques .....	45
6.1.4.	Parede externa mais próxima a uma edificação, rodovias e limites da propriedade .....	45
6.2.	Projeto de Contenção para o caso Petrogold .....	48
7)	Combate a Incêndio.....	51
7.1.	Definições .....	51
7.2.	Projeto de Sistemas de Contenção contra Incêndio .....	51
7.2.1.	Suprimento de Água.....	51
7.2.2.	Cálculo da Vazão .....	52
7.2.2.1.	Resfriamento de Tanques .....	52
7.2.2.2.	Sistema de Espuma.....	53
7.2.3.	Proteção da Bacia de Contenção .....	54
7.2.4.	Proteção das Plataformas de Carregamento .....	54
7.3.	Projeto de Proteção contra Incêndio para o caso da Petrogold analisado.....	55
7.3.1.	Projeto para Aspersores.....	56
7.3.2.	Projeto para Canhões Monitores ou Linhas Manuais.....	56
7.3.3.	Fornecimento de Água .....	57
7.3.4.	Proteção da Bacia de Contenção e das Plataformas de Carregamento .....	57
8)	Conclusão.....	60
9)	Referências.....	63
	Anexos.....	66

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 – Como um BLEVE se forma. ....	2
Figura 2 - Foto do incêndio na Petrogold. ....	3
Figura 3 - Pátio de Tanques. ....	5
Figura 4 - Tanque de Teto Fixo Plano. ....	7
Figura 5 - Tanques de Teto Flutuante. ....	7
Figura 6 - Tanque Subterrâneo. ....	8
Figura 7 - Válvulas de alívio de Pressão. ....	9
Figura 8 - Sistema de Medição. ....	10
Figura 9 - Elementos da Combustão. ....	11
Figura 10 - Esquema do terreno da Petrogold ....	16
Figura 11 - Incêndio em Poça. ....	18
Figura 12 - Foto aérea do terreno após o acidente. ....	19
Figura 13 - Incêndio no dique. ....	20
Figura 14 - Diagrama Esquemático do Modelo de Radiação Térmica. ....	21
Figura 15 – Afastamento recomendado para Incêndio no Tanque. ....	25
Figura 16 - Incêndio no dique. ....	26
Figura 17 - Foto de satélite do local de incêndio. ....	27
Figura 18 - Muros da Propriedade da Petrogold. ....	30
Figura 19 - Notação utilizada para cálculo do fator de forma. ....	32
Figura 20 - Esquema para cálculo do Fator de forma. ....	32
Figura 21 – Afastamento para pessoas sem considerar a barreira térmica. ....	34
Figura 22 - Alturas de Chama Exposta e Barreira Térmica ....	37
Figura 23 – Afastamento para pessoas considerando a barreira térmica. ....	37
Figura 24 - Típico Tanque de Armazenamento. ....	41
Figura 25- Detalhe da Figura 24: Dique e Bacia de Contenção. ....	43
Figura 26 - Aterramento de tanques e Caminhões durante operação de carga. ....	45
Figura 27 - Ilustrativo para as tabelas 8 a 11. ....	48
Figura 28 - Disposição dos tanques. ....	49
Figura 29 - Distâncias mínimas para o terreno da Petrogold de acordo com a ABNT NBR 7505-1. ....	50
Figura 30 - Medidas do Parque de Tancagem Petrogold. ....	58
Figura 31 - Afastamentos no Parque de Tanques da Petrogold. ....	62
Figura 32 - Representação de um furo em um tanque com líquido vazando. ....	67

## ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 - Propriedade de Combustíveis Líquidos.....	12
Tabela 2 - Descrição dos Tanques da Petrogold. ....	15
Tabela 3 - Propriedades e características dos combustíveis. ....	17
Tabela 4 - Calor de Combustão. ....	17
Tabela 5 - Dados da Taxa de queima de Incêndio em Poça. ....	39
Tabela 6 - Classificação dos Líquidos Inflamáveis e Combustíveis. ....	42
Tabela 7 - Líquidos armazenados pela Petrogold.....	43
Tabela 8 - Distância entre tanques.....	45
Tabela 9 - Líquidos classes I, II, IIA (Pressão de Operação até 17.2kPa). ....	46
Tabela 10 - Líquidos da Classe IIIB. ....	47
Tabela 11 - Tabela complementar para ser usada na tabela 9, quando citadas nas mesmas. ....	47
Tabela 12 - Tanques Petrogold. ....	48
Tabela 13 - Capacidade de Armazenagem. ....	52
Tabela 14 – Aspersores.....	53
Tabela 15 - Canhões monitores ou Linhas Verticais. ....	53
Tabela 16 - Taxa de aplicação e tempo de espuma nos tanques verticais com hidrocarbonetos. ....	54
Tabela 17 - Taxas de aplicação de espuma e tempos para plataformas de carregamento. .....	55
Tabela 18 - Projeto para aspersores nos tanques .....	56
Tabela 19 - Projeto para Canhões Monitores ou Linhas Manuais.....	57
Tabela 20 - Armazenagem de Água .....	57
Tabela 21 - Taxa de Aplicação de espuma para as Plataformas de Carregamento .....	59
Tabela 22 - Base de cálculo.....	70

## ÍNDICE DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Porcentagem de calor Irrradiado em função do diâmetro da chama. ....	22
Gráfico 2 - Distância de Separação Aceitável para chamas de formato aproximadamente cilíndrico.....	24
Gráfico 3 - Taxa de queima para poças de gasolina <i>Pool Fire</i> .....	39

## SIGLAS E ABREVIACÕES

ABIQUIM – Associação Brasileira da Indústria Química.

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

AEAC – Álcool Etilico Anidro Combustível

AEHC – Álcool Etilico Hidratado Combustível

ANP – Agência Nacional do Petróleo

API – Instituto Americano de Petróleo

ASD – *Acceptable Separation Distance* (Distância de Separação Aceitável)

BLEVE – *Boiling Liquid Expanding Vapor Explosion* (Explosão por Expansão do Vapor de Líquido em Ebulição)

CEETEPS – Curso Técnico de Segurança do Trabalho

CESTESB – Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental

EPI – Equipamento de proteção individual

FISPQ – Ficha de Informação de Segurança de Produtos Químicos

GAV – Gasolina de Aviação

GLP – Gás Liquefeito de Petróleo

GNL – Gás Natural Liquefeito

HRR – *Heat Release Rate* (Taxa de Calor Emitido)

IBP – Instituto Brasileiro de Petróleo

IT – Instrução Técnica

LGE – Líquido Gerador de Espuma

NBRT – Norma Brasileira Técnica

NIST – *National Institute of Standards and Technology, USA.* (Instituto Nacional de Padrões e Tecnologia, Estados Unidos)

QAV – Querosene de Aviação

REDUC – Refinaria de Duque de Caxias

SENAI – Serviço Nacional de Aprendizagem Industrial

# 1) INTRODUÇÃO

## 1.1. Incêndios na Indústria Química Brasileira

A indústria química mundial e a brasileira, em particular, sofreram durante anos com uma elevada taxa de acidentes fatais. Porém, especialmente a partir da década de 1970, as análises dos acidentes contribuíram de forma significativa para que as autoridades governamentais, indústrias e sociedade civil buscassem mecanismos visando prevenir novos episódios.

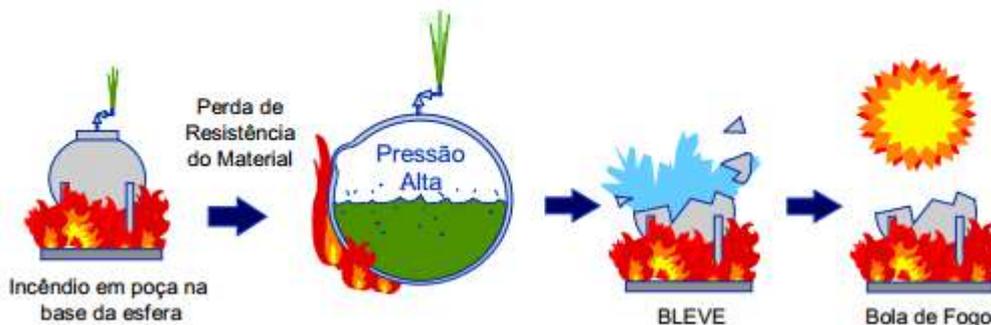
As técnicas e métodos desenvolvidos inicialmente para as indústrias bélica, aeronáutica e nuclear, foram então adaptadas para a realidade do setor químico e petroquímico. Passaram então a ser utilizadas com sucesso na realização de estudos e avaliações dos riscos presentes em atividades industriais nas áreas de petróleo, química e petroquímica [CETESB, 2003].

Dentre os inúmeros cenários acidentais possíveis em instalações industriais de grande porte, destacam-se aqui as ocorrências de incêndios. Estes são grandes emissores de calor e fumaça tóxica, os principais perigos neste tipo de evento. Diversas substâncias inflamáveis e combustíveis, como querosene, nafta, diesel, álcool etílico e gasolina são comumente armazenadas em imensos tanques. Tais compostos possuem elevado calor de combustão e forte potencial de geração de fuligem quando queimados de modo descontrolado. O fluxo de energia radiante gerado por um incêndio em tanque de combustível pode ser suficiente para ameaçar tanto a integridade estrutural das construções ao redor, quanto funcionários e muitas vezes a população vizinha à planta.

Em 1972, ocorreu o maior acidente já registrado na Refinaria de Duque de Caxias (REDUC), matando 38 trabalhadores e deixando mais 35 hospitalizados. O acidente culminou com a ocorrência de uma explosão por expansão de vapor de líquido em ebulição (BLEVE) em uma esfera de armazenamento de GLP. O BLEVE causou destruição de todo o parque de esferas e de parte da refinaria. Segundo artigo publicado na Revista Geográfica da América Central (2011), o vazamento de GLP em uma válvula de um dos tanques de armazenamento pode a ter congelado, impedindo seu fechamento. Uma nuvem de GLP foi formada, posteriormente sofrendo ignição. O incêndio durou várias horas aquecendo continuamente a esfera, como mostrado na Figura 1. O

aquecimento contínuo levou a fragilização de sua estrutura e finalmente a explosão (BLEVE). [Revista Geográfica da América Central, 2011].

- Sigla para "Boiling Liquid Expanding Vapor Explosion" ou Explosão por Expansão do Vapor de Líquido Fervente.



**Figura 1 – Como um BLEVE se forma. Fonte: Apostila do Curso sobre Estudos de Análise de Riscos e Programa de Gerenciamento de Riscos, DNV – 2006.**

Em 2013, quatro décadas após o acidente na REDUC, um novo acidente industrial de grande porte voltou a ocorrer em Duque de Caxias, só que, desta vez, na empresa Petrogold. Trata-se de uma empresa de armazenamento de combustíveis líquidos, como álcool, diesel e gasolina. As investigações das causas do acidente ainda não tiveram seus resultados divulgados de modo a permitir conhecer as razões exatas que levaram ao incêndio ocorrido (Figura 2). Independente das causas, as consequências foram severas: diversas pessoas ficaram feridas e muitas construções foram afetadas, inclusive levando à desativação de todo o parque de tanques da empresa. Os tanques situavam-se numa área residencial, próxima, inclusive, a uma escola. É fato que existe uma grande demanda por combustíveis em toda metrópole, mas um evento como esse, de tal proporção, abre espaço para uma reflexão quanto ao planejamento urbano e onde melhor alocar empresas que armazenem grandes volumes de substâncias perigosas e/ou inflamáveis.

A modelagem deste cenário acidental real permite averiguar a proporção do calor irradiado a partir de um grande incêndio em poça. Aplicando tais modelos ao incêndio na Petrogold pudemos calcular a radiação térmica a que estavam sujeitas as pessoas e construções próximas. Com o fluxo de radiação térmica é possível definir a distância de separação segura que deve existir entre uma instalação industrial deste tipo e as pessoas e construções ao redor. As normas brasileiras que regem a construção de um parque de tanques de líquidos inflamáveis nos permitem propor um projeto de segurança adequado

para empresas do setor, preocupando-se em prevenir a ocorrência de um incêndio e combater eficientemente a eventual ocorrência de um.



**Figura 2 - Foto do incêndio na Petrogold. Foto: Pablo Jacob/ Agência O GLOBO.**

## **1.2. Objetivo geral**

Este trabalho tem como objetivo aplicar a modelagem da radiação de calor de um incêndio em poça em eventos envolvendo grandes tanques de combustíveis. A partir de um método de modelagem matemática adequado é possível avaliar as proporções que um incêndio pode atingir, considerando seus efeitos especialmente sobre a população vizinha.

## **1.3. Objetivos Específicos**

Aplicar a modelagem matemática proposta pelo Instituto Americano de Padrões e Tecnologia (NIST) ao incêndio na Petrogold calculando o calor irradiado pela chama, sua altura, e os afastamentos seguros que devem ser aplicados a pessoas e edificações afim de evitar uma exposição excessiva à tal radiação.

Propor um projeto de segurança para o parque de tanques da Petrogold baseando-se nas normas brasileiras vigentes e comparar com o parque de tanques que existia na empresa, averiguando sua adequação às exigências da ABNT.

## **1.4. Estrutura do Trabalho**

O *Capítulo 1* apresenta uma introdução ao tema, nos falando de casos de incêndios na indústria química Brasileira inclusive do caso da empresa Petrogold, que é objeto de estudo deste trabalho.

O *Capítulo 2* trata de alguns conceitos sobre Parque de Tanques de Armazenamento, importantes para a ambientação ao caso em análise. Mostrando como os tanques de armazenamento são classificados e quais objetos e equipamentos são comumente encontrados em um Parque de Tancagem.

No *Capítulo 3* encontramos conceitos sobre fogo e incêndio, bem como algumas definições de propriedades de combustíveis líquidos pertinentes ao caso em tela, onde o incêndio se deu em tanques de gasolina e álcool.

O *Capítulo 4* nos apresenta a empresa Petrogold, e relata o incêndio nela ocorrido.

O *Capítulo 5* trata da modelagem do incêndio ocorrido usando o método apresentado por Kevin B. McGrattan, Howard R. Baum e Anthony Hamins em seu artigo publicado pelo NIST.

Nos *Capítulos 6 e 7* apresentam-se as normas brasileiras que regem a segurança no projeto de um parque de tanques de armazenamento de líquidos combustíveis. Atendendo-se aos afastamentos entre tanques e entre os prédios e vias ao redor dos tanques (*Capítulo 6*) e ao projeto de Contenção Contra Incêndio (*Capítulo 7*). Ao final do *Capítulo 6* encontramos uma figura que sugere um projeto com afastamentos seguros, de acordo com as normas brasileiras, para os tanques do caso em análise.

O *Capítulo 8* apresenta as conclusões finais deste trabalho.

Ao final do trabalho, os *Anexos* complementam algumas informações pertinentes e provém algumas imagens do incêndio ocorrido.

## 2) Parque de Tancagem

Um parque de tanques (Figura 3) é uma unidade operacional responsável pelo armazenamento de líquidos e/ou gases industriais, podendo armazenar tanto matérias-primas quanto produtos acabados.

Os tanques ou reservatórios podem operar a altas pressões ou à pressão atmosférica. Por exigência normativa e legal, ao redor dos tanques de líquidos inflamáveis ou combustíveis deve sempre haver um dique ou bacia de contenção capaz de reprimir possíveis derramamentos.

Parques de tancagem são classificados em três tipos de acordo com suas capacidades de armazenamento [ABNT 7505-1, 2003]:

- Pequenos - com capacidade igual ou inferior a 10 mil m<sup>3</sup>;
- Médios - com capacidade entre 10 e 40 mil m<sup>3</sup>;
- Grandes - possuem capacidade maior do que 40 mil m<sup>3</sup>.

Dentro do parque de tancagem, ou pátio de tanques, podem haver diferentes tipos de tanques, que por sua vez são classificados de acordo com seu Formato, Função, Tipo de Teto, Localização e utilização [SIQUEIRA, 2010].



**Figura 3 - Pátio de Tanques. Fonte: SENAI - Apostila monitoramento de controle de processos [SIQUEIRA, 2010]**

### **2.1. Quanto ao Formato**

- Cilíndricos: formato alongado e arredondado podendo ser dispostos na horizontal ou na vertical (Figura 3). Tanques cilíndricos horizontais são empregados quando o consumo do fluido é baixo, Tanques cilíndricos verticais, como apresentados na Figura 3, são escolhidos quando o parque exige reservatórios maiores e com movimentação de grandes vazões [SIQUEIRA, 2010].
- Esféricos: Usados para armazenar gás ou gás liquefeito (GLP, GNL, etc). A sua geometria reduz a formação de pontos de tensão, típicos de estruturas com quinas. Deste modo, tanques esféricos suportam pressões mais elevadas – sendo adequados ao armazenamento de gases sobre elevadas pressões. Foi este tipo de tanque que explodiu no acidente na REDUC em 1972.

No caso em análise neste projeto os tanques da empresa Petrogold armazenavam combustíveis líquidos, sendo do tipo cilíndricos verticais.

### **2.2. Quanto à Função:**

- Tanques de Recebimento: Estoque de produtos intermediários;
- Tanques de Resíduo: Armazena produtos fora de especificação ou provenientes de operações indevidas, aguardando reprocessamento;
- Tanques de Mistura: Usados para obtenção de misturas de produtos, ou produtos e aditivos, visando acerto de especificação.
- Tanques de Armazenamento: Estoque de matérias-primas e produtos acabados. Este é o caso do parque de tancagem da empresa Petrogold.

### **2.3. Quanto ao Tipo de Teto:**

- Fixo: O teto é construído junto à estrutura do costado (Figuras 3 e 4). Sua posição não varia. O teto pode ser cônico, curvo, plano, esferoidal ou semi-esferoidal [SIQUEIRA, 2010]. O parque de tancagem da empresa Petrogold era composto por tanques de teto fixo plano.
- Fixo com Diafragma Flexível: Possuem um revestimento interno projetado para deformar-se, suportando a expansão líquida ou gasosa do fluido. Esta membrana flexível normalmente é feita de plástico. É muito usado em sistemas fechados, ajudando a diminuir os prejuízos causados pela acumulação de vapores indesejados [SIQUEIRA, 2010].
- Móvel: O teto desloca-se de acordo com a pressão exercida pelo vapor. É necessária a existência de dispositivos de segurança que evitem acidentes provocados por uma possível sobre-pressão. Para evitar as perdas com a

evaporação usa-se um vedante entre o teto e a parede do tanque [SIQUEIRA, 2010].

- Flutuante: Neste tipo de tanque o teto flutua sobre o produto que está armazenado (Figura 5). A cobertura movimenta-se de acordo com o esvaziamento ou enchimento. A razão principal pela qual são utilizados é por reduzirem as perdas do produto em consequência da evaporação. Estes tanques devem possuir um sistema de selagem, visto que o seu teto flutuante move-se internamente em relação ao costado [SIQUEIRA, 2010].



**Figura 4 - Tanque de Teto Fixo Plano. Fonte: SENAI – Apostila de Monitoramento de Controle de Processos [SIQUEIRA, 2010]**



**Figura 5 - Tanques de Teto Flutuante. Fonte: SENAI - Monitoramento de Controle de Processos [SIQUEIRA, 2010]**

#### 2.4. Quanto a Localização:

- **Aéreos:** Situam-se acima do solo e normalmente são usados quando se armazenam grandes quantidades de fluido e se trabalha com altas vazões. Os tanques aéreos de grande porte normalmente apresentam formato cilíndrico vertical ou esférico. Para aplicações de pequeno consumo usam-se os tanques aéreos horizontais [SIQUEIRA, 2010].
- **Subterrâneos:** São mais seguros e são recomendados para o armazenamento de combustíveis e substâncias perigosas em ambiente cuja presença de pessoas seja frequente, como postos de gasolina urbanos. Fabricados em aço-carbono, o maior problema enfrentado por parques com esse tipo de tanque é a corrosão. [SIQUEIRA, 2010]. Tais tanques devem ser fortemente protegidos contra corrosão e ruptura, pois seu contato direto com o solo pode propiciar a contaminação de lençóis freáticos. Os tanques tendem a ser construídos com parede dupla (Figura 6) e um sensor especial instalado no espaço intersticial. Esse espaço tem pressão negativa em condições operacionais normais. O sensor é acionado pela alteração da pressão interna provocada pela entrada de ar ou da água do lençol freático devido à perda de vedação da parede externa, ou ainda pela saída do produto por falta de isolamento da parede interna. Esse tipo de tanque subterrâneo é em geral construído com dois materiais diferentes, sendo a parede interna construída com aço-carbono, enquanto a parede externa construída com uma resina termofixa não sujeita à corrosão. Certos modelos de tanques possuem as duas paredes fabricadas com resina. Essa arquitetura de tanques é comumente empregada em postos de gasolina (Figura 6).

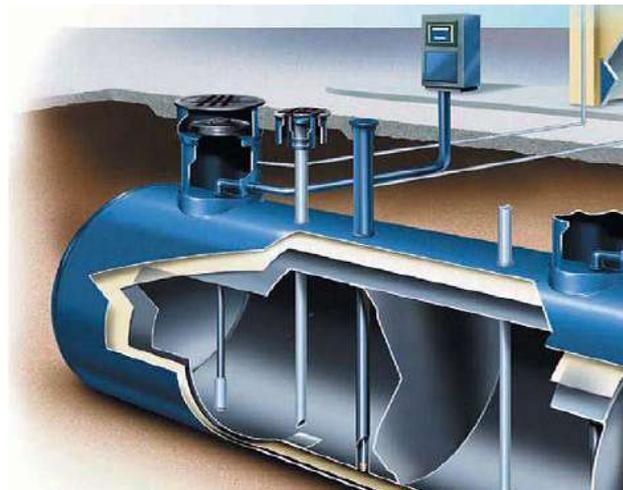


Figura 6 - Tanque Subterrâneo. Fonte: Confab - Tenaris Group

## 2.5. Instrumentos e Acessórios

O controle do manuseio, armazenamento e segurança do tanque é feito com um sistema de instrumentos que monitoram o nível, a pressão interna, a temperatura e, em alguns casos, a composição do fluido. Para auxiliar esse controle e garantir a segurança, são instalados alguns acessórios aos tanques:

### 2.5.1. Respiro

Alguns tanques pequenos de teto fixo e que armazenam líquidos possuem uma conexão no teto aberta para a atmosfera, essa abertura pode ser feita diretamente ou através de uma válvula. Esta conexão visa evitar a formação de vácuo ou pressão positiva durante as operações de esvaziamento ou carregamento [SIQUEIRA, 2010].

### 2.5.2. Válvula de Pressão e Vácuo

Seu uso é obrigatório em tanques de teto fixo. Tem a função de evitar a formação de vácuo ou pressão positiva durante as operações de descarga ou carga do líquido armazenado. Nestes tanques, o vapor está em equilíbrio com o líquido. À noite, com a redução da temperatura, há entrada de ar, enquanto, durante o dia, essa válvula propicia a saída dos vapores do interior do tanque [SIQUEIRA, 2010].

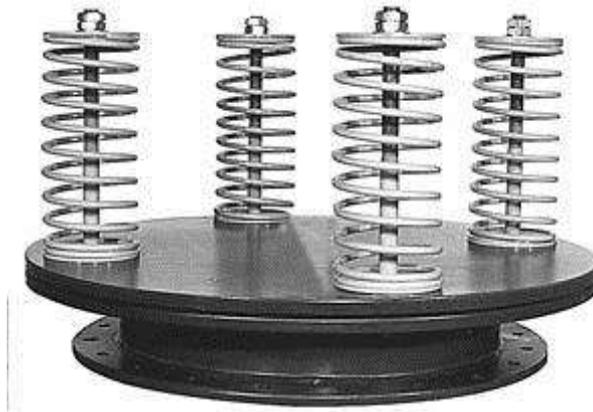


Figura 7 - Válvulas de alívio de Pressão. Fonte: [Groth Corp]

### 2.5.3. Agitador

Dispositivo cuja finalidade é movimentar o produto, a fim de homogeneizar as misturas de petróleo por exemplo. Normalmente essa homogeneização é feita pela agitação do produto por uma hélice acoplada a um eixo acionado por motor elétrico [SIQUEIRA, 2010].

### 2.5.4. Sistema de Medição

Em tanques para armazenamento de líquidos o sistema de medição de nível pode contar com uma boia que flutua com o nível do produto, ao longo de dois fios que servem como guia. O centro da boia é ligado a uma trena, que, após passar por uma

série de roldanas, apresenta a leitura direta em um visor externo. A Figura 8 ilustra o sistema.

A medição do nível de grandes tanques deve ser feita com precisão, pois um erro de milímetros pode representar uma diferença bastante significativa no volume transferido [SIQUEIRA, 2010].

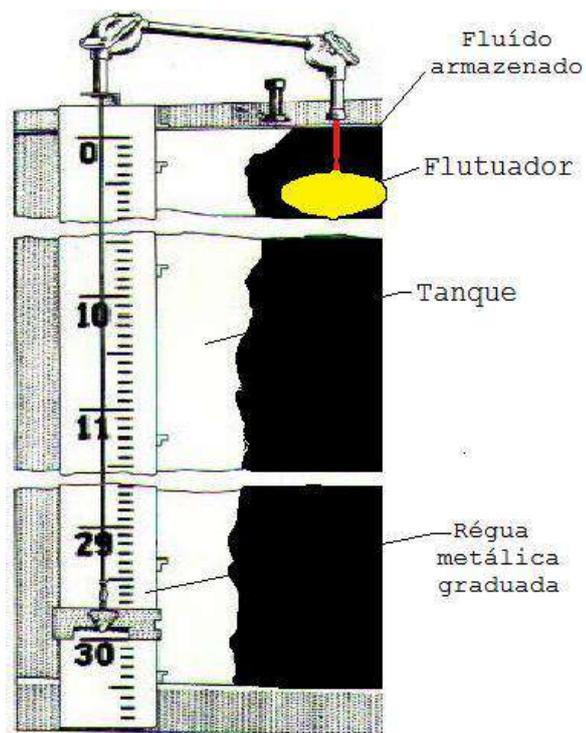


Figura 8 - Sistema de Medição. Fonte: [SIQUEIRA, 2010]

### 2.5.5. Diques

É uma contenção física ao redor do tanque ou do parque de tanques. A finalidade do dique é conter um possível vazamento, com ou sem incêndio. Evita assim que o material vazado se alastre para outras áreas da empresa. Por norma e exigência legal, todos os tanques destinados a armazenar produto líquido inflamável, combustível ou tóxico devem ser dotados de diques.

### 3) Princípios Elementares do Fogo

#### 3.1. Processo de Combustão

O processo de combustão é uma reação química que envolve um combustível e um comburente (oxigênio), liberando energia na forma de calor e luz. A Figura 9 mostra os quatro elementos essenciais no processo de combustão, onde o combustível sofre oxidação em presença do ar, formando uma reação em cadeia e liberando calor [JOSÉ, 2004].



Figura 9 - Elementos da Combustão. Fonte: Site CIMI, 2013

A combustão pode ser completa ou incompleta:

- Combustão Completa: Ocorre na presença de excesso de ar, transformando todo o combustível em  $CO_2$  e  $H_2O$ .
- Combustão Incompleta: Neste processo o combustível não sofre oxidação completa. Ocorre liberação de compostos intermediários como monóxido de carbono (CO), óxidos de nitrogênio ( $NO_x$ ), óxidos de enxofre ( $SO_x$ ), ou outras substâncias dependendo do combustível que está queimando. A combustão incompleta está associada a limitações na quantidade de oxigênio no meio. Ocorre grande formação de fumaça escura e presença de material particulado. [JOSÉ, 2004]

#### 3.2. Combustível

Pode ser sólido, como carvão, madeira e papel; líquido como gasolina, etanol e óleo cru; ou gasoso como metano e etano. Em geral o combustível é definido como uma substância que além de queimar, mantém a combustão e a propagação do fogo. [CEETEPS, 2008]

Cada material combustível apresenta características próprias, que os tornam mais ou menos possíveis de sofrerem ignição. Algumas destas características são o Ponto de Fulgor, Ponto de Combustão e Ponto de Auto Ignição, explicados a seguir.

### 3.2.1. Ponto de Fulgor (*Flash Point*)

De acordo com a definição da Norma NB – 98 – Armazenamento e Manuseio de Líquidos Inflamáveis e Combustíveis da ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas:

*“Ponto de fulgor de um líquido é a menor temperatura na qual a substância libera uma quantidade de vapor suficiente para formar uma mistura inflamável com o ar, perto da superfície do líquido ou dentro do recipiente usado.”*

Destaca-se porém que nesta temperatura a queima não se sustenta, ocorrendo apenas um rápido *flash*.

A Tabela 1 apresenta o ponto de fulgor de dois combustíveis de amplo uso: gasolina e etanol.

**Tabela 1 - Propriedade de Combustíveis Líquidos. Fonte: Ficha de Informação de Produto Químico - CETESB, SP, 2003.**

<b>PRODUTO</b>	<b>Ponto de Fulgor (°C)</b>	<b>Ponto ou faixa de Auto Ignição (°C)</b>
<b>Gasolina</b>	< -17,7	246 °C
<b>Álcool Etilico</b>	12,8	365,2 °C

### 3.2.2. Ponto de Combustão (*Fire Point*)

Corresponde a temperatura mínima em que os vapores desprendidos entram em combustão e continuam a queimar (queima sustentada). Em geral essa temperatura é poucos graus maior que a temperatura de fulgor. [CEETEPS, 2008]

### 3.2.3. Ponto de Auto Ignição

É a temperatura suficiente para que a mistura inflamável entre em combustão espontaneamente [CEETEPS, 2008] A Tabela 1 fornece as temperaturas de auto ignição da gasolina e do álcool etílico. Pode-se verificar que são bastante elevadas, sendo difícil de ocorrerem em condições normais de armazenamento.

## 3.3. Comburente

O comburente, juntamente com o combustível, participa da reação de combustão. O comburente natural encontrado no ar atmosférico, e comum em praticamente todos os incêndios acidentais, é o oxigênio [CEETEPS, 2008]. A redução na concentração de oxigênio a valores menores que 10% ou 8% do volume

normalmente impede a ocorrência de combustão. O valor mínimo de oxigênio para existência de fogo denomina-se Concentração Limite de Oxigênio (LOC) [CEETEPS, 2008]

### 3.4. Calor

O calor é transmitido entre o incêndio e os objetos ou pessoas próximos através dos processos de condução, convecção ou radiação. O calor liberado durante um incêndio é uma das maiores ameaças à vida e à integridade das construções próximas.

#### 3.4.1. Condução

A condução ocorre devido às interações entre partículas, onde há uma transferência de energia das partículas mais energéticas para as menos energéticas. É a principal forma de transferência de calor em sólidos. [INCROPERA, DEWITT, *et al* 2005]

A taxa de condução de calor será influenciada por vários fatores, como por exemplo: espessura do material, diferentes formatos de superfície, coeficiente de condutividade térmica deste material, etc.

#### 3.4.2. Convecção

Este modo de transferência de calor envolve a combinação da condução e o movimento do fluido, já que ocorre devido ao contato da superfície sólida com um líquido ou gás adjacente que está em movimento [ÇENGEL & CHAJAR, 2012]. Esta transferência é mantida por dois fatores: o movimento molecular aleatório e o movimento global do fluido no interior da camada limite. [INCROPERA, DEWITT, *et al* 2005.]

Calcula-se a taxa de transferência de calor pela Equação 1 [INCROPERA, DEWITT, *et al* 2005.]

Lei de Resfriamento de Newton

$$q'' = \frac{q}{A} = h(T_s - T_\infty)$$

**Equação 1**

q – taxa de transferência de calor (W)

A – área da superfície em contato (m<sup>2</sup>)

q'' – fluxo de calor por convecção por unidade de área (W/m<sup>2</sup>)

T<sub>s</sub> – temperatura da superfície (K)

T<sub>∞</sub> - temperatura do fluido (K)

h – coeficiente de transferência de calor (W/(m<sup>2</sup>.K))

### 3.4.3. Radiação

Conhecido também como calor radiante, não é preciso o contato físico entre os corpos para que haja a transferência de calor. Na radiação a transferência de calor ocorre mesmo no vácuo, sendo necessária apenas a existência de gradiente de temperatura. [MORISHITA, 2004]

Em um incêndio, o objeto em chamas produz grande quantidade de calor, e parte deste é emitido na forma de radiação. A intensidade de calor emitida durante um incêndio industrial pode ser suficiente para atingir quilômetros de distância, podendo causar enormes danos à natureza e à sociedade, além de propiciar o início de outros incêndios (propagação).

Para calcular a taxa de radiação deve-se primeiro calcular o fluxo térmico emitido pela superfície (Equação 2) [INCROPERA, DEWITT, *et al* 2005]:

Lei de Stephan-Boltzman

$$E = \varepsilon\sigma T_s^4$$

Equação 2

$\varepsilon$  - emissividade

$\sigma$  – constante de Stefan- Boltzman (=  $5,67 \times 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$ )

$T_s$  – temperatura da superfície de chama (K)

A Taxa Líquida de transferência de calor irradiado da superfície de uma chama, expressa por unidade de área, é explicitada pela Equação 3: [INCROPERA, DEWITT, *et al* 2005]

Lei de Resfriamento de Newton

$$q'' = \frac{q}{A} = \varepsilon\sigma(T_s^4 - T_{viz}^4)$$

Equação 3

A expressão acima é a diferença entre a energia térmica que é liberada devido à emissão de radiação e aquela que é ganha devido a absorção da radiação.

Assim, a taxa total de transferência de calor saindo da superfície de uma chama é dada pela Equação 4: [INCROPERA, DEWITT, *et al* 2005]

$$q = q_{conv} + q_{rad} = hA(T_s + T_\infty) + \varepsilon A\sigma(T_s^4 - T_{viz}^4)$$

Equação 4

## 4) O Evento Acidental da Petrogold S.A.

### 4.1. A empresa

A Petrogold é uma empresa voltada para a distribuição e armazenamento de combustíveis líquidos. Surgiu em 1999, com o intuito de suprir a carência dessa distribuição nos Estados de São Paulo, Goiás e Rio de Janeiro. Sua sede administrativa situa-se na Barra da Tijuca, no Rio de Janeiro.

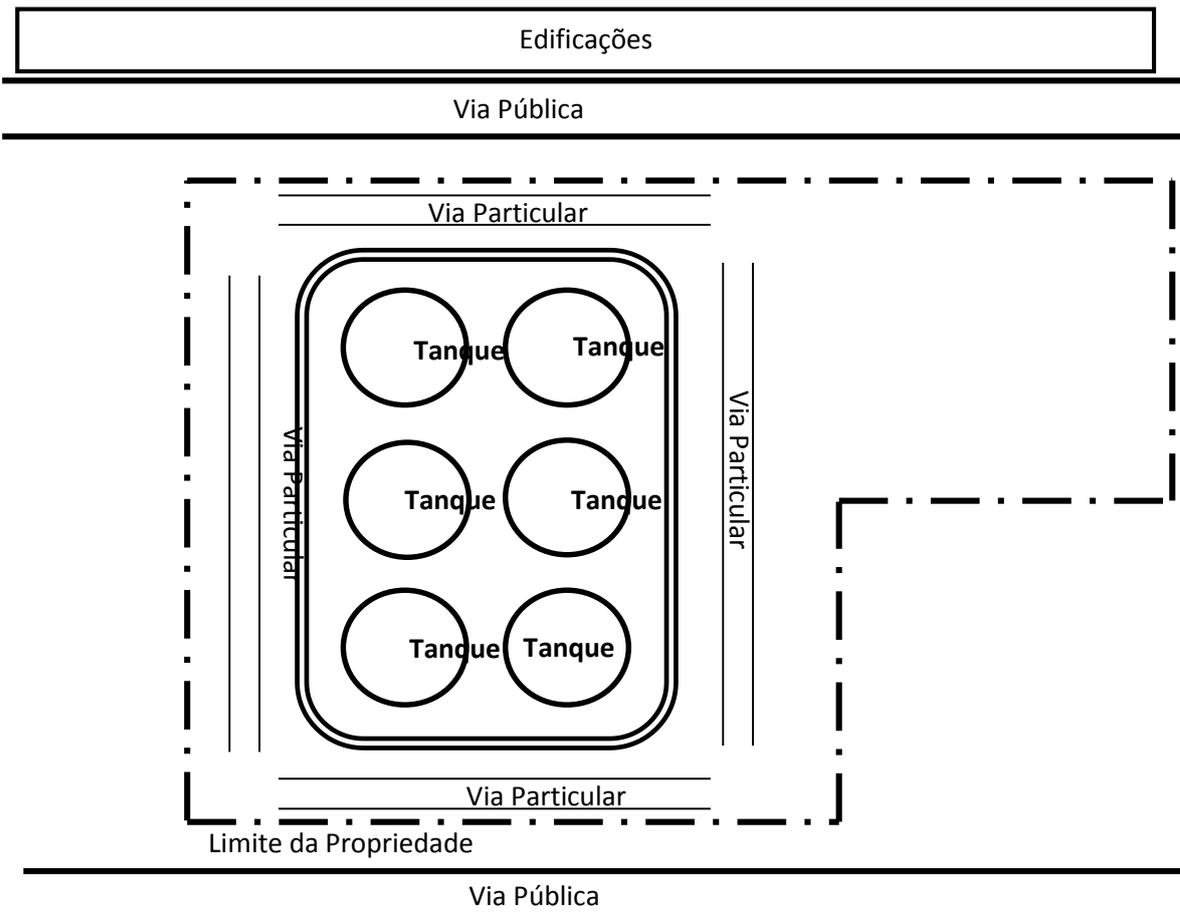
De acordo com informações disponibilizadas em seu site ([www.petrogold.com.br](http://www.petrogold.com.br)), a empresa “possui diversas bases de armazenamento de combustíveis e todos os seus tanques são constantemente inspecionados”. Além disso, possui uma frota de caminhões para a distribuição dos combustíveis que comercializa e se responsabiliza com uma logística sustentável “desde a preparação do motorista até a entrega do combustível”.

A ANP concedeu à empresa, em 2009, a licença para o funcionamento da base de distribuição em Duque de Caxias, conforme autorização no Anexo I [Disponível em: <http://nxt.anp.gov.br>]. A autorização descreve os produtos e cada um dos tanques do terminal da empresa. Com capacidade total de 2.048m<sup>3</sup>, estava autorizada a operar com gasolina, álcool combustível e diesel. Porém, seu site informa que a empresa operava apenas com Gasolina (comum e aditivada) e com Etanol Hidratado. A Tabela 2 retirada dessa autorização descreve o tamanho dos tanques que a empresa possuía.

**Tabela 2 - Descrição dos Tanques da Petrogold. Fonte: ANP, 2009 [<http://nxt.anp.gov.br>]**

Tanque nº	Diâmetro (m)	Altura (m)	Volume (m <sup>3</sup> )	Produto
<b>01</b>	9,32	7,45	508	GASOLINA
<b>02</b>	9,32	7,45	508	GASOLINA
<b>03</b>	7,64	7,50	344	AEAC
<b>04</b>	7,64	7,50	344	AEHC
<b>05</b>	7,64	7,50	344	DÍESEL

Os tanques cilíndricos verticais de teto fixo que armazenavam combustível e as dependências da empresa são ilustrados na Figura 10:



**Figura 10 - Esquema do terreno da Petrogold**

#### **4.2. O incêndio**

O incêndio no depósito de combustíveis da Petrogold iniciou-se por volta das 11 horas na quinta-feira do dia 23 Maio de 2013. O fogo tomou grandes proporções e se espalhou por todo parque de tancagem. Em virtude da severidade do evento, casas e escolas no entorno da empresa foram evacuados.

O Corpo de Bombeiros Militar do Estado do Rio de Janeiro (CBMERJ) combateu as chamas durante cerca de 20 horas. Dos seis tanques que a empresa possuía, cinco foram danificados, dentre estes um ficou completamente destruído. Além do incêndio nos tanques, houve também queima no combustível vazado para a bacia de contenção. Deste modo, imagens do evento mostram chamas não apenas no interior dos vasos, mas também ao seu redor.

Algumas imagens do acidente estão no *Capítulo 5* (Figuras 12, 13, 16 e 18) e no *Anexo V*.

### 4.3. Propriedades dos combustíveis armazenados: Álcool Etílico e Gasolina

A Gasolina é constituída basicamente por hidrocarbonetos (cadeias de 4 a 12 carbonos), uma quantidade pequena de oxigenados, além de compostos de enxofre, nitrogênio e metálicos, todos em baixa concentração. [BR Distribuidora - FISQP, 2012]

Já o Etanol ou Álcool Etílico é uma substância orgânica obtida a partir de biomassa (plantas ricas em açúcar, amido e material celulósico). É usado nas indústrias de bebidas alcólicas, perfumarias e também como combustível. [BR Distribuidora - FISQP, 2012]

Na Tabela 3 observa-se as propriedades e características da gasolina e do etanol. Destaca-se aqui a temperatura de ignição da gasolina, que por ser muito menor que a do etanol, apresenta maior facilidade de começar um incêndio. De acordo com a Tabela 4, pode-se verificar que a gasolina possui um calor de combustão e uma taxa de queima superiores ao do etanol. Isso nos leva a concluir que, na Petrogold, os tanques de armazenagem de gasolina representam o maior risco a acidentes.

Tabela 3 - Propriedades e características dos combustíveis. Fonte: BR Distribuidora - FISQP, 2012

	GASOLINA	ETANOL
Calor específico (kJ/kg)	349000	267000
Número de octano (RON/MON)	91/80	109/98
Calor latente de vaporização (kJ/kg)	376 ~ 502	903
Temperatura de Ignição (°C)	220	420
Razão Estequiométrica Ar/Combustível	14,5	9

Tabela 4 - Calor de Combustão. Fonte: Adaptado de McGRATTAN, BAUM, HAMINS, 2000.

Líquido	Taxa mássica de Queima, $\dot{m}''$	Calor de Combustão	Taxa Total de Calor Emitido (HRR) por unidade de Área, $\dot{q}''_f$	Distância de Separação sempre Segura	
	(kg/m <sup>2</sup> /s)	(kJ/kg)	(kW/m <sup>2</sup> )	Construções (m)	Pessoas (m)
Álcool Etílico	0,015	26.800	400	10	90
Gasolina	0,055	43.700	2.400	20	550

## 5) Modelagem matemática de incêndios: estudo de caso do evento Petrogold

### 5.1. Incêndio em Poça

Conforme ocorre a liberação de líquidos a partir de tanques, vasos e tubulações, existe a possibilidade de formação de poça no solo e simultânea evaporação de parte do líquido. Caso este seja inflamável, ocorrerá formação de nuvem de vapor próxima à poça. Na presença de fonte de ignição, essa nuvem pode eventualmente entrar em combustão, gerando o chamado “incêndio em poça” ou *pool fire*. A Figura 11 ilustra o processo descrito.

- Liberação de líquido inflamável com posterior ignição da poça

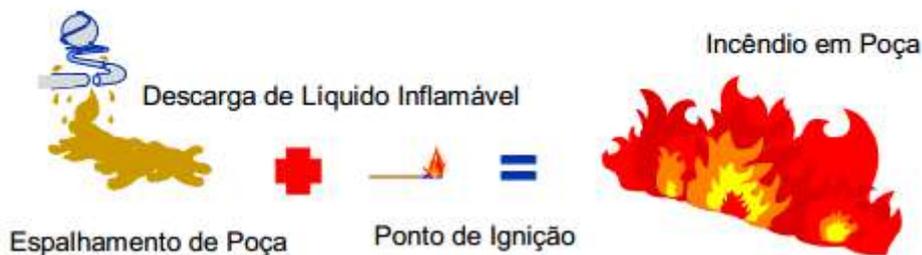


Figura 11 - Incêndio em Poça. Fonte: Apostila do Curso sobre Estudos de Análise de Riscos e Programa de Gerenciamento de Riscos, DNV – 2006.

### 5.2. Modelagem

A modelagem aqui efetuada baseou-se em dois cenários criados a partir das imagens relativas ao incêndio do Parque de Tancagem da empresa Petrogold. Foi analisado ainda um terceiro cenário, este hipotético e com menor tamanho de poça. Através destes cenários torna-se possível comparar, discutir e diferenciar a modelagem de grandes e pequenos incêndios.

O modelo matemático usado foi desenvolvido por Kevin B. McGrattan, Howard R. Baum e Anthony Hamins nos laboratórios do Instituto Americano de Padrões e Tecnologia (NIST – *National Institute of Standards and Technology*). Este modelo foi publicado no artigo *Thermal Radiation from Large Pool Fires* (Radiação Térmica de Incêndios de Grandes Poças) em 2000, pela Divisão de Engenharia de Segurança em Incêndios do NIST.

Através da modelagem pode-se quantificar o calor gerado pelo incêndio em poça, assim como a quantidade de calor radiado que atinge a vizinhança. Torna-se assim possível avaliar danos nas estruturas vizinhas e o risco à vida das pessoas ao redor.

### 5.2.1. Primeiro Cenário: Incêndio em um único tanque

Segundo imagens do acidente o incêndio iniciou-se em um dos tanques. Os cálculos apresentados neste item são referentes a apenas este tanque, não considerando o incêndio nos demais vasos e no dique. Para efeitos de modelagem considerou-se o tanque inicialmente todo preenchido de gasolina. Os valores obtidos são: calor gerado pela poça, altura da chama, calor irradiado e a distância de separação aceitável ou segura (ASD).

Para obter um melhor panorama do cenário acidental tem-se uma imagem aérea do local ao final do incêndio (Figura 12). Nota-se que apenas um dos tanques foi completamente destruído pelo fogo. Assumiu-se aqui que este foi o tanque por onde o incêndio começou.



**Figura 12 - Foto aérea do terreno após o acidente. Foto: Pablo Jacob/ Agência O GLOBO**

Na Figura 13 pode-se observar o incêndio ocorrendo no topo do tanque, numa altura muito maior que a barreira ao redor do dique.



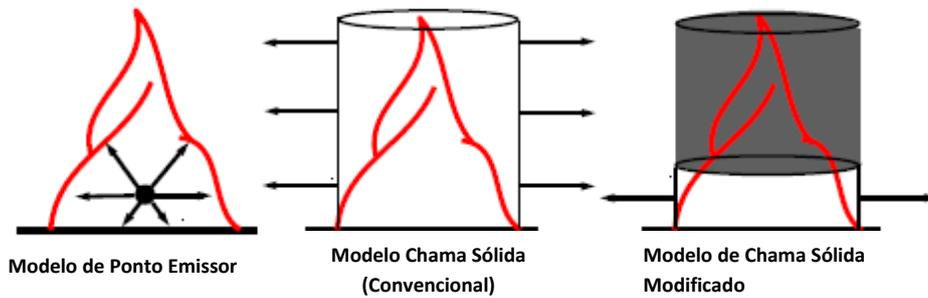
**Figura 13 - Incêndio no dique. Fonte: Alexandro Auler / Jornal EXTRA.**

### Radiação Térmica:

A taxa de calor emitido por um incêndio em poça envolve muitas variáveis de difícil medição como o formato da poça, a temperatura, o vento, a transmissividade do ar, a eficiência de queima do combustível, por exemplo, e estão sujeitos a muitas incertezas e variações imprevisíveis. De acordo com Kevin B. McGrattan, Howard R. Baum e Anthony Hamins, do laboratório NIST, após sucessivos modelos propostos e analisados, o melhor cálculo para prever os danos que um incêndio pode causar é através da taxa total de calor emitido, em inglês: *Total Heat Release Rate* (HRR). Essa taxa é proporcional ao consumo de combustível por unidade de área em um certo tempo, o que pode ser facilmente medido experimentalmente.

Pesquisadores do NIST realizaram mais de 100 experimentos de grande escala, e foram capazes de desenvolver um modelo para a determinação dos principais fatores que caracterizam incêndios em poça. Eles puderam observar que, em incêndios de grandes proporções, apenas uma parte do calor gerado na queima é efetivamente emitido na forma de radiação ( $\chi_r$ ). Para Kevin B. McGrattan, Howard R. Baum e Anthony Hamins apenas cerca de 30% a 40% da energia é irradiada.

Observou-se ainda que essa emissão ocorre de maneira mais acentuada junto a base da chama, próximo a piscina, onde há a área luminosa da chama. A partir de certa altura, a chama é recoberta por uma espessa nuvem de fumaça que bloqueia boa parte do calor irradiado, conforme representado na Figura 14.



**Figura 14 - Diagrama Esquemático do Modelo de Radiação Térmica. Fonte: Adaptado de McGRATTAN, BAUM, HAMINS, 2000.**

O calor total emitido pelo incêndio depende apenas da taxa de calor ( $\dot{q}_f''$ ) que cada substância libera ao queimar e da área da poça. Essa taxa de calor é praticamente constante para uma determinada substância, sendo tabelada (Tabela 4). Pela tabela, a gasolina libera 2400kW por metro quadrado de poça.

Então calcula-se o calor total emitido da seguinte forma:

$$Q_{total} = \dot{q}_f'' A$$

**Equação 5**

Para o caso da Petrogold,

Diâmetro do Tanque de Gasolina:

D = 9,32 m (Ref: Documento de Autorização da ANP, Anexo I)

$$Q_{total} = \dot{q}_f'' A = \frac{2400kW}{m^2} * \frac{\pi D^2}{4} = \frac{2400kW}{m^2} * \frac{\pi(9,32m)^2}{4}$$

$$Q_{total} = 163.731,76kW$$

Yang, Hamins, e Kashiwagi também investigaram a radiação de grandes incêndios obtendo a seguinte equação para determinar a porcentagem do calor emitido como radiação térmica ( $\chi_r$ ):

$$\chi_r = \chi_{r\text{ máx}} e^{-kD}$$

**Equação 6**

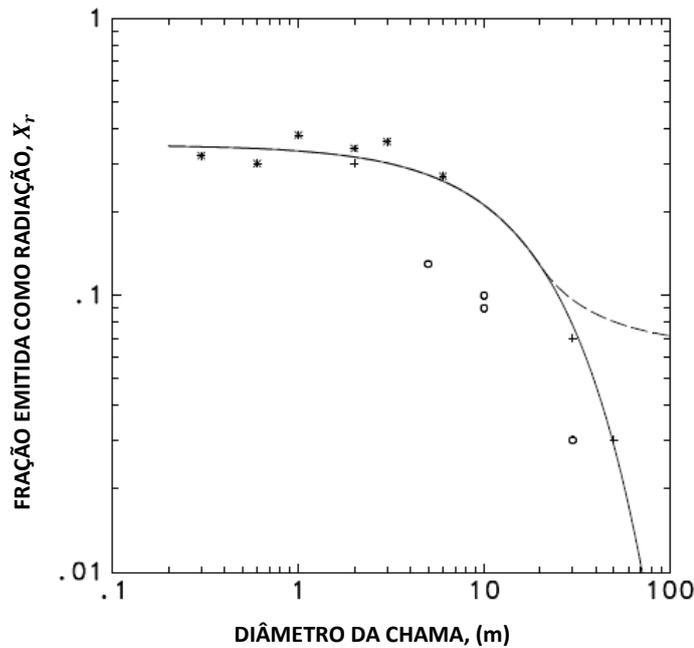


Gráfico 1 - Porcentagem de calor Irradiado em função do diâmetro da chama. Fonte: NIST, 2000.

Através de dados experimentais os cientistas do NIST identificaram que, diferente do que havia sido estudado por outros cientistas,  $\chi_r$  não varia muito a partir de um certo diâmetro de chama (veja a linha tracejada do Gráfico 1). Estima-se  $\chi_r^{m\acute{a}x}$  igual a 0,35 e a constante  $k$  igual a  $0,05m^{-1}$  [McGRATTAN, BAUM, HAMINS, 2000]. O valor de 0,35 encontra-se dentro da faixa de 30% a 40% que havia sido indicada por Kevin B. McGrattan, Howard R. Baum e Anthony Hamins.

Para um diâmetro de 9.32m,  $\chi_r$  será:

$$\chi_r = 0,35 * \exp(-0,05m^{-1} * 9,32m) = 0,22$$

Encontra-se então o calor irradiado pelo incêndio no tanque:

$$\dot{Q}_{irrad} = \chi_r * \dot{Q}_{total} = 0,22 * 163.731,76kW$$

$$\dot{Q}_{irrad} = 36.021kW$$

#### Altura da chama luminosa:

Os experimentos do NIST permitiram obter uma equação para o cálculo da altura da zona luminosa da chama ( $H$ ). Esta altura depende da taxa de calor emitida como radiação, do diâmetro da poça e do poder emissivo da chama ( $E_f$ ).

O modelo considera que a altura máxima que um incêndio em poça pode atingir é alcançada com um diâmetro de poça de 20m. Diâmetros de poça maiores que 20 metros não contribuem para alturas de chama luminosa maiores, e para diâmetros menores que 20m, a chama não atinge a altura máxima. Nestes casos, baseando-se no modelo de Kevin B. McGrattan *et. al.* [McGRATTAN, BAUM, HAMINS, 2000], a altura deve ser calculada pela seguinte equação:

$$H = \frac{\chi_{rm\acute{a}x} e^{-kD} D \dot{q}_f''}{4E_f}$$

**Equação 7**

J.C. Yang, A. Hamins, e T. Kashiwagi assumem que  $E_f$  pode ser considerado constante para toda a área luminosa da chama. Estimam que seu valor para piscinas de gasolina é de aproximadamente  $100\text{kW/m}^2$ . [McGRATTAN, BAUM, HAMINS, 2000]

Para este cenário, com diâmetro de poça de 9,32 metros, tem-se então uma altura da chama luminosa de:

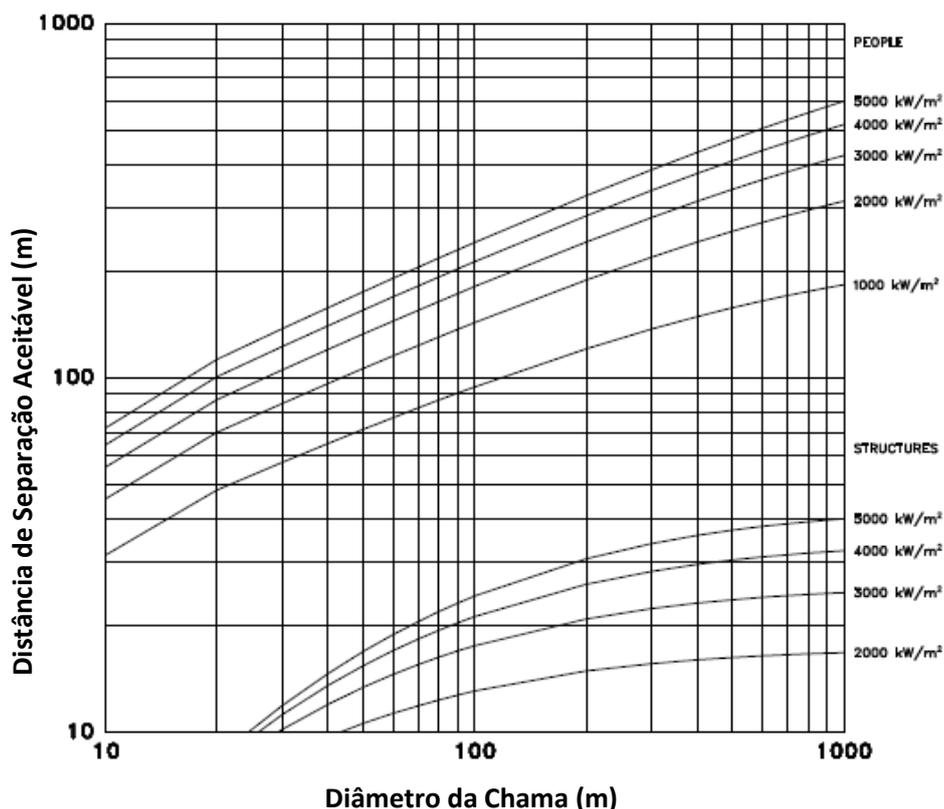
$$H = \frac{0,35 * \exp(-0,05\text{m}^{-1} * 9,32\text{m}) * 9,32\text{m} * 2400\text{kW/m}^2}{4 * 100\text{kW/m}^2}$$

$$H = 12,28\text{m}$$

#### Distância de Separação Aceitável ou Segura:

A Distância de Separação Aceitável ou Segura (ASD – *Acceptable Separation Distance*) determina a mínima distância a partir da qual uma pessoa ou construção não é afetada pelo calor recebido a partir do incêndio. O valor limite para construções é de  $31,5 \text{ kW/m}^2$ , correspondente a ignição da madeira. Para pessoas o limite de calor é bem menor, de apenas  $1,4 \text{ kW/m}^2$ . Valores superiores podem causar queimaduras de pele ou mesmo morte [McGRATTAN, BAUM, HAMINS, 2000].

Se o fluido em análise é líquido à temperatura atmosférica, como gasolina e etanol, se a base da chama tem um formato circular, e se não há obstruções consideráveis entre a chama (barreiras) e o receptor, pode-se utilizar o modelo simplificado da NIST. Este modelo determina a ASD de acordo com o Gráfico 2.



**Gráfico 2 - Distância de Separação Aceitável para chamas de formato aproximadamente cilíndrico.**  
**Fonte: Laboratório NIST [McGRATTAN, BAUM, HAMINS, 2000].**

Neste gráfico, as curvas superiores determinam a ASD para pessoas, enquanto as curvas inferiores para construções. Os números associados a cada curva referem-se à taxa de calor liberado por área de queima ( $\dot{q}_f''$ ), cujos dados encontram-se na Tabela 4.

Ressaltando as informações da ANP (Anexo I), para este cenário foi assumido um tanque de gasolina com diâmetro de 9,32 metros, altura de 7,45 metros, e volume de 508 m<sup>3</sup>. A forma do tanque é cilíndrica, o que nos permite considerar a base da chama com formato circular, e assumiu-se que não há barreiras térmicas, pois o muro da empresa tem altura inferior ao topo do tanque, onde está a base das chamas. O HRR por unidade de área ( $\dot{q}_f''$ ) para a gasolina é dado na Tabela 4 como 2.400 kW/m<sup>2</sup>. A partir do Gráfico 2 pode-se verificar que, com um diâmetro de poça de aproximadamente 10 metros, obtém-se ASD de menos de 10 m para edifícios, e 50 m para as pessoas. Estas distâncias devem ser aplicadas a partir da borda do tanque, e não a partir do seu centro. Aplicando estas distâncias, a área de afastamento da região dos tanques é aquela apresentada na Figura 15. O círculo em azul indica o tanque de gasolina, o círculo em amarelo indica o afastamento recomendado para construções e o círculo em vermelho o afastamento para pessoas.



**Figura 15 – Afastamento recomendado para Incêndio no Tanque. Fonte: Adaptado de Imagens ©2013 DigitalGlobe, Dados cartográficos ©2013 MapLink**

Deste modo, pessoas localizadas a menos de 50m do tanque em chamas estariam recebendo uma quantidade de calor radiado superior àquela considerada segura. Considerando o incêndio em poça em apenas um dos tanques, a região marcada em vermelho na Figura 15 indica a área a ser isolada. O cenário real porém mostrou-se muito mais complexo, com incêndio em vários tanques, no dique, formação de bolas de fogo (*fire ball*) e incêndio em jato (*jet fire*). Todos esses fenômenos ocorrendo simultaneamente contribuem para aumentar muito a zona de evacuação recomendada e a dificuldade para estimar corretamente o calor radiado sobre a população vizinha.

### **5.2.2. Segundo Cenário: Incêndio no Dique**

A Figura 16 retrata o incêndio em poça tomando não apenas os tanques, mas também toda a área do dique no entorno dos vasos. Enquanto o cenário simulado no item anterior despreza o incêndio no dique, este é agora considerado. Sua influência sobre a radiação emitida será avaliada.



**Figura 16 - Incêndio no dique. Fonte: Gustavo Vasconcellos / Agência O GLOBO.**

Com a foto de satélite do terreno da Petrogold (Figura 17), pode-se estimar a área do dique de contenção:

$$A = 22,86\text{m} * 34,28\text{m} = 783,64\text{m}^2$$

#### Radiação Térmica:

Assumiu-se neste cenário que todo o dique está tomado de combustível inflamável em chamas. Para os cálculos desprezou-se os tanques, supondo o dique como uma área retangular única de 23m por 34m. Tal hipótese é razoável na medida em que, conforme revelam as imagens do acidente, os tanques contidos no dique também estavam em chama. Ou seja, a área em chamas tinha aproximadamente as dimensões de todo o dique.



**Figura 17 - Foto de satélite do local de incêndio. Fonte: Imagens ©2013 DigitalGlobe, Dados cartográficos ©2013 Google, MapLink**

Para o cálculo do calor emitido pela chama que ocupou todo o dique usou-se a equação a seguir:

$$Q_{total} = \dot{q}_f'' A$$

**Equação 8**

Sendo o  $\dot{q}_f''$  da gasolina igual a  $2400 \text{ kW/m}^2$  e a área igual a  $783,64 \text{ m}^2$ , tem-se:

$$Q_{total} = \frac{2400 \text{ kW}}{\text{m}^2} * 783,64 \text{ m}^2$$

$$Q_{total} = 1.880.736 \text{ kW}$$

Como a base da poça neste caso não tem formato circular, é necessário estimar um diâmetro equivalente. O diâmetro do círculo que contém a mesma área do dique pode ser obtido através da equação:

$$\pi * \frac{D^2}{4} = 783,64m^2$$

$$D = 31,59m$$

Uma vez que o diâmetro correspondente é maior que 20m, o NIST recomendada usar  $X_r$  com valor de 0,35. Deste modo,

$$\dot{Q}_{irradiado} = X_r * \dot{Q}_{total} = 0,35 * 1.880.736kW$$

$$\dot{Q}_{irradiado} = 658.257,6kW$$

A estimativa de calor irradiado pelo incêndio em todo o dique é, portanto, 18 vezes maior que aquela estimada para incêndio em um único tanque.

#### Altura da chama luminosa:

Novamente a altura da chama é calculada através da equação:

$$H = \frac{(X_{r,máx} \cdot e^{-kD} \cdot D \cdot \dot{q}''_f)}{(4 \cdot E_f)}$$

#### **Equação 7**

Para o caso do incêndio em todo o dique tem-se o diâmetro equivalente de  $D=31,59m$ . O modelo NIST aqui adotado indica que a altura da chama atinge seu valor máximo em piscinas com diâmetro de 20 metros. Poças com diâmetro maior não ocasionam alturas de chama luminosa maiores. O valor de H é então encontrado usando os valores de  $D=20m$ ;  $X_{r,máx} = 0,35$ ;  $k=0,05m^{-1}$  e  $E_f=100kW/m^2$ :

$$H = \frac{(0,35 \cdot e^{-1} \cdot 20m \cdot \dot{q}''_f)}{(4.100kW/m^2)} = 6,4 \cdot 10^{-3} * \dot{q}''_f$$

Sendo o  $\dot{q}''_f$  da gasolina igual a 2400kW/m<sup>2</sup> tem-se:

$$H = 15,36 m$$

Nota-se que a altura da chama deste cenário não difere muito daquela estimada para o incêndio apenas em um tanque, que foi de 12,28m. Essa diferença não é significativa em função da hipótese do modelo NIST, de que a altura máxima que a chama luminosa atinge é aquela de uma poça de 20m de diâmetro.

#### Distância de Separação Sempre Segura:

É importante observar os dados da Tabela 4, especialmente a coluna Distância de Separação Sempre Segura. Essa coluna informa valores de afastamento independentemente do tamanho do incêndio em poça. Para a gasolina tem-se um afastamento indicado de 20m para construções e 550m para pessoas.

Utilizando a escala cartográfica da Figura 17 observa-se que o afastamento entre os tanques e as construções vizinhas ao Norte (Rua Batista Lacerda), ao Sul (Rua Emilio Gomes) e a Oeste (Rua Geraldo Rocha), supera os 20m indicados. A construção à Leste, porém, se encontra a menos de 20m dos tanques, um afastamento menor que o mínimo sempre seguro. Por se tratar de uma região residencial, deve-se considerar também o afastamento seguro para pessoas. Neste caso, seria recomendado evacuar todas as pessoas em uma distância de 550 m ou menos da empresa.

#### Distância de Separação Aceitável ou Segura:

Enquanto no cenário de incêndio em um único tanque foi possível empregar o método simplificado do NIST (método gráfico), nem sempre isso é possível. Deve-se assim averiguar a possibilidade de usar o modelo simplificado para o cenário de incêndio em dique.

No caso do incêndio no dique, a configuração da base da poça não é mais a de um círculo, mas de um retângulo. Além disso, a altura dos muros da propriedade da Petrogold tem cerca de 5m, são portanto barreiras térmicas, obstáculos para a emissão de radiação térmica, e precisam ser consideradas na modelagem do incêndio (Figura 18). Devido a estes fatores não é recomendado utilizar aqui o método simplificado empregado no cenário de incêndio em um único tanque (Gráfico 2). O cenário do incêndio em dique é melhor avaliado através do Cálculo Detalhado para Incêndios em Poça, que será apresentado adiante.

**Barreira Térmica:** Uma forma eficiente de mitigar o fluxo radiativo de um incêndio é construir uma barreira térmica ao redor de toda a área de risco. Considerando que esta barreira se manterá intacta durante todo o incêndio, ela serve para reduzir a quantidade de radiação que efetivamente atinge um alvo.

A barreira altera o fator de forma (ou fator de visão), um parâmetro fundamental para estimar quanto de radiação efetivamente atinge o alvo. Nos casos mais simples pode-se assumir que uma barreira de altura  $x$  reduzirá o fluxo térmico de uma chama de altura  $H$  por um fator  $x/H$ . Essa hipótese é válida desde que o observador esteja no mesmo nível da base da chama, e que a barreira tenha comprimento suficiente para abranger toda a largura da chama. [McGRATTAN, BAUM, HAMINS, 2000]



**Figura 18 - Muros da Propriedade da Petrogold. Fonte: Alexandre Auler/ Jornal EXTRA**

O modelo NIST considera que o calor é irradiado quase todo na base do incêndio, onde há a chama luminosa. Deste modo, as barreiras afetariam fortemente a radiação que chega a um observador no solo, pois o muro cobriria praticamente toda a parcela luminosa da chama. Os efeitos da barreira poderiam estar sendo superestimados.

Medidas recentes de estudos de incêndios feitas no Japão com incêndios de diâmetros iguais a 20m [TAKAHASHI, KOSEKI & HIRANO, 1999] mostraram que cerca de 85% da energia radiante provém de alturas inferiores a 20m. Apenas os outros 15% são emitidos pela nuvem negra quente em alturas superiores e por eventuais chamas luminosas nessa região.

Para considerar de forma realista a presença de uma barreira térmica, o método NIST sugere que, na existência de barreira, se considere que o poder emissivo da chama ( $E_f$ ) fique reduzido pela metade (de  $100\text{kW/m}^2$  para  $50\text{kW/m}^2$ ). Como o poder emissivo entra no denominador da equação de cálculo da altura de chama (Equação 9), o valor da altura fica dobrado nos cálculos para muro ou outros obstáculos.

Tal faixa de valores para poder emissivo não é arbitrária. Muitos pesquisadores fizeram medidas do poder emissivo de poças, encontrando valores compatíveis. [McGRATTAN, BAUM, HAMINS, 2000]

### Cálculo detalhado para incêndios em poça.

Segundo o NIST, nos casos que envolvem incêndios em poça para os quais o modelo gráfico simplificado não é conveniente, é necessário um cálculo mais detalhado. Especificamente, se obstruções físicas (barreiras térmicas) são consideradas, ou se a poça não possui formato circular (como é o caso do incêndio no dique em análise), o fluxo de radiação térmica é melhor estimado pela expressão:

$$\dot{q}'' = F \cdot E_f$$

**Equação 9**

O fator de forma (F) deve ser calculado de maneira razoavelmente detalhada. Para simplificar o cálculo desse fator é normal assumir o formato de chama como sendo cilíndrico ou placas verticais.

O fator de forma depende da altura da chama luminosa, do diâmetro da chama, da distância entre a chama e o receptor, e da posição relativa do receptor.

O NIST apresenta tabelas que fornecem o fator de forma para alguns cenários típicos. Tais tabelas encontram-se nos Anexos III e IV.

O fator de forma para uma placa vertical de altura H e largura W, com um alvo a uma distância S do centro da placa e a distância S' (Figura 19) da linha central também pode ser obtida pela fórmula seguinte:

$$F(S, S', H, W) = \begin{cases} \frac{F(S, 0, H, 2S' + W) - F(S, 0, H, 2S' - W)}{2} \} 2S' > W \\ \frac{F(S, 0, H, 2S' + W) + F(S, 0, H, W - 2S')}{2} \} 2S' < W \end{cases}$$

**Equação 10**

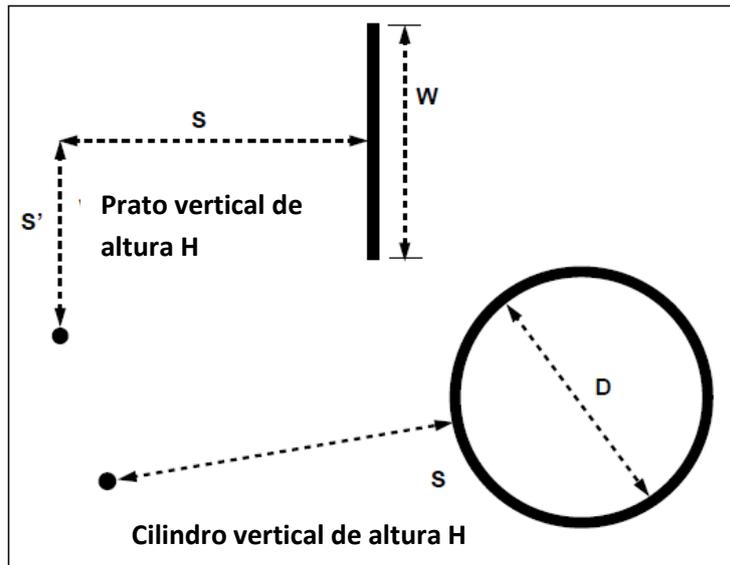


Figura 19 - Notação utilizada para cálculo do fator de forma. Fonte: NIST

No caso avaliado a altura da chama, calculada no item anterior, é de 15,36m. Para averiguar a efetividade da barreira térmica de 5m que a empresa construiu ao redor de seu terreno o presente trabalho propôs usar o método detalhado para o incêndio no dique calculando os afastamentos recomendáveis com e sem a barreira térmica de 5m.

O perímetro da chama é o perímetro do dique, de medidas  $W_1=22,86\text{m}$  e  $W_2=34,28\text{m}$  (Figura 20). As distâncias de afastamento até os alvos externos existentes são de  $S_1=16,7\text{m}$  ;  $S_2=16,7\text{m}$  e  $S_3=43,3\text{m}$ .

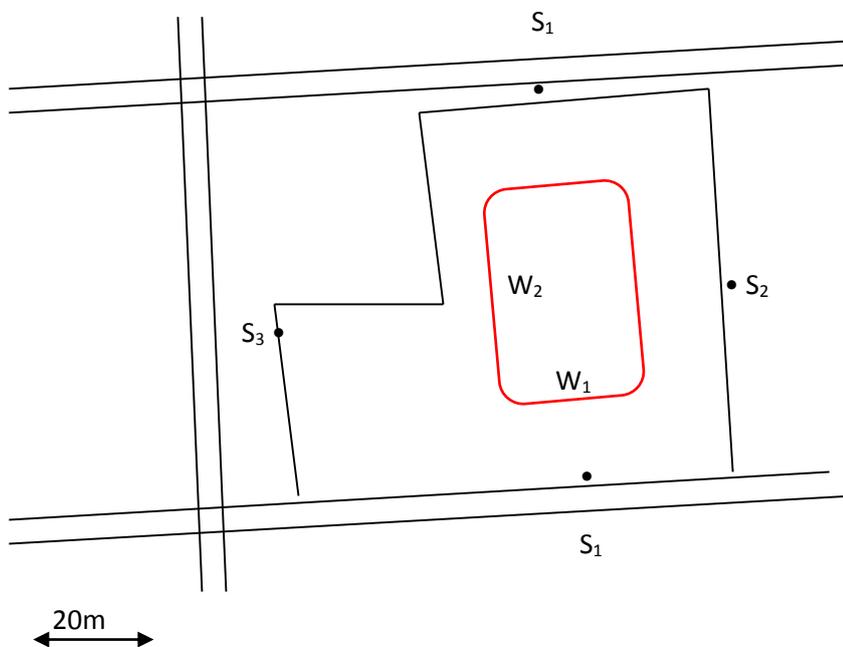


Figura 20 - Esquema para cálculo do Fator de forma

Assim, desconsiderando o efeito da barreira de 5m:

S1/W1 =	16,7m/22,86m	H/W1 =	15,36m/22,86m
S2/W2 =	16,7m/34,28m	H/W2 =	15,36m/34,28m
S3/W2 =	43,3m/34,28m		

Ou seja,

S1/W1 =	0,730534	H/W1 =	0,671916
S2/W2 =	0,487165	H/W2 =	0,448075
S3/W2 =	1,263127		

Com esses dados, aplicam-se os valores de S/W e H/W na tabela do Anexo IV. Fazendo as devidas interpolações, encontram-se os valores dos fatores de visão do caso em análise (marcado em verde nas tabelas abaixo):

H/W \ S/W	0,6	0,6714	0,7
0,7	0,216		0,232
0,7305	0,206	<b>F<sub>1</sub> = 0,218</b>	0,222
0,8	0,184		0,2

H/W \ S/W	0,4	0,44807	0,5
0,4	0,23		0,256
0,4871	0,189	<b>F<sub>2</sub> = 0,201</b>	0,214
0,5	0,183		0,208

H/W \ S/W	0,4	0,44807	0,5
1	0,1		0,12
1,126313	0,025	<b>F<sub>3</sub> = 0,066</b>	0,109
2	0,03		0,037

Um alvo situado na rua ao Norte (Rua Batista Lacerda) ou ao Sul (Rua Emílio Gomes) do dique estaria exposto a uma radiação igual a  $q''_{1,1}$ . À Leste a exposição estimada é indicada por  $q''_{2,2}$ , já a exposição à Oeste (Rua Geraldo Rocha) é aquela indicada por  $q''_{3,2}$ .

Assim:

$$q'' = F_i * E_f = F_i * 100 \text{ kW/m}^2$$



citado, havia uma barreira de cerca de 5m ao redor da propriedade da empresa. Calcularemos agora as distâncias de afastamento levando em consideração o fator de forma (como calculado acima) mas também a barreira, o que nos permitirá averiguar o poder de blindagem da mesma.

Conforme explicado, na presença de barreiras térmicas o poder emissivo é reduzido à metade,  $50\text{kW/m}^2$ , e o valor da altura da chama luminosa é dobrado,  $H = 2 \cdot 15,36\text{m} = 30,72\text{m}$ . A barreira de 5m reduz a altura da chama para  $30,72 - 5 = 25,72\text{m}$ . Com isso, os novos valores para o fator de forma F são calculados via interpolação na tabela do Anexo IV.

$$H=25,72\text{m} \quad W_1=22,86\text{m} \quad W_2=34,8\text{m} \quad S_1=16,7\text{m} \quad S_3=43,3\text{m}$$

$$S_1/W_1 = 0,730534 \quad H/W_1 = 1,12511$$

$$S_3/W_2 = 1,263127 \quad H/W_2 = 0,73901$$

Interpolação:

H/W \ S/W	1
0,7	0,261
0,730534	0,251
0,8	0,23

H/W \ S/W	0,7	0,73901	0,8
1	0,151		0,162
1,263127	1,124	0,128	0,134
2	0,05		0,056

$$F_{1,1} = 0,251$$

$$F_{3,2} = 0,128$$

Então, para as direções Norte e Sul do dique, o fluxo de radiação é:

$$q'' = F_{1,1} \cdot E_f = 0,251 \cdot 50$$

$$q''_{N,S} = 12,55 \text{ kW/m}^2$$

O que representa uma redução de cerca de 42% no fluxo radiativo.

Na direção Oeste, o fluxo de radiação é:

$$q'' = F_{3,2} \cdot E_f = 0,128 \cdot 50$$

$$q''_{\text{Oeste}} = 6,4 \text{ kW/m}^2$$

Que representa uma redução de apenas 2,4% nesta direção.

Os dois fluxos radiativos são superiores ao limite de  $1,4\text{kW/m}^2$  para pessoas.

Para manter a radiação dentro do limite seguro para seres humanos seria necessário que o fator de forma fosse de 0,028. Para tal há duas possibilidades:

**Aumentar o afastamento:**

H/W fixo →

$$H/W_1 = 1,12511$$

$$H/W_2 = 0,73901$$

F = 0,028 → S/W =

H/W \ S/W		1
	3	0,261
	<b>3,308</b>	0,028
	4	0,23

H/W \ S/W	0,7	0,73901	0,8
	2	0,043	<b>0,045731</b>
	<b>2,837</b>		0,028
	3	0,023	<b>0,02456</b>
			0,027

$$\rightarrow S_{N,S} = 75,61\text{m} \quad \rightarrow S_{Oeste} = 98,75\text{m}$$

**Aumentar a altura do muro:**

S/W fixo →

$$S_1/W_1 = 0,730534$$

$$S_3/W_2 = 1,263127$$

F = 0,028 → H/W =

H/W \ S/W	0,05	<b>0,060</b>	0,06
	0,7	0,025	0,03
	0,730534	<b>0,0235</b>	0,028
	0,8	0,02	0,024
			<b>0,0282</b>

H/W \ S/W	0,1	<b>0,128</b>	0,2
	1	0,027	0,054
	1,263127	<b>0,0220</b>	0,028
	2	0,008	0,015
			<b>0,0437</b>

$$\rightarrow H_{N,S} = 1,372\text{m} \quad \rightarrow H_{Oeste} = 4,454\text{m}$$

Essas alturas acima indicam a altura máxima de chama que pode estar exposta a um alvo, veja a Figura 22 abaixo:

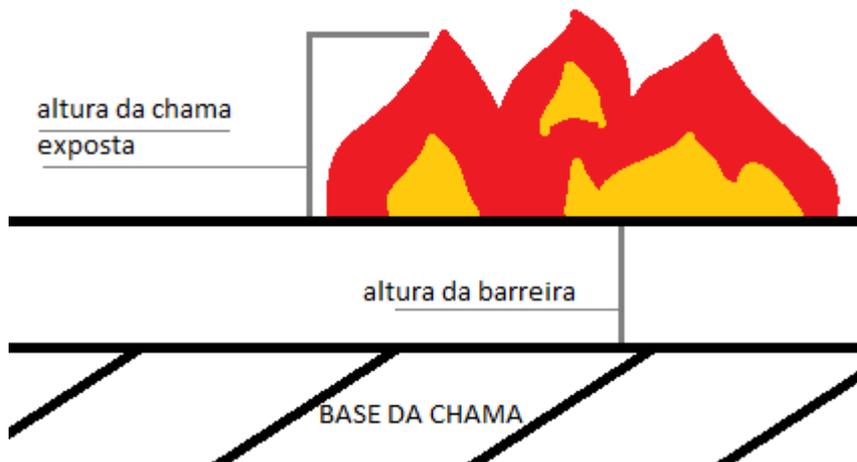


Figura 22 - Alturas de Chama Exposta e Barreira Térmica

Lembrando que o método manda, na presença de uma barreira térmica, reduzir à metade o valor de  $E_f$  e dobrar o real valor de  $H$  para os cálculos na Equação 7. Sendo assim, as alturas  $H_{N,S}$  e  $H_{Oeste}$  acima calculadas representam a máxima altura de chama exposta. Então, a altura real que a barreira deve conter é ( $H_{barreira}$ ):

$$H_{N,S} = 2 * (H_{chama} - H_{barreira})$$

$$1,372m = 2 * (15,36 - H_{barreira})$$

$$H_{N,S\ barreira} = 14,67m$$

$$H_{Oeste} = 2 * (H_{chama} - H_{barreira})$$

$$4,454m = 2 * (15,36 - H_{barreira})$$

$$H_{Oeste\ barreira} = 13,14m$$

Então, os muros da propriedade (barreira térmica) deveriam ter pelo menos 14,67m. Como uma barreira de quase quinze metros seria um muro muito alto sugere-se como melhor maneira de isolar a área aumentar o afastamento redor do dique. A Figura 23 mostra no mapa as áreas que seriam afetadas por esse isolamento de segurança.



Figura 23 – Afastamento para pessoas considerando a barreira térmica. Fonte: Adaptado de Imagens ©2013 DigitalGlobe, Dados cartográficos ©2013 Google, MapLink

### 5.2.3. Cenário Hipotético: Incêndio em uma Poça pequena

Adotou-se este cenário para fins de comparação com os casos reais, considerando incêndio em uma poça com diâmetro menor que 5 metros. Para não adotar um diâmetro aleatório, o Anexo II apresenta os cálculos necessários para a formação dessa poça, considerando um tempo de vazamento do tanque de 3 segundos – caso por exemplo um técnico esquecesse de fechar a válvula de segurança do tanque.

O modelo de Babrauskas é uma das modelagens matemáticas, utilizadas pelo NIST, para calcular a radiação térmica da *pool fire* com diâmetros menores de 5 metros.

Logo para chegarmos ao resultado de uma modelagem de um poça de incêndio menor de 5 metros e compará-la com os nossos cenários reais da Petrogold tivemos que adotar o modelo de Babrauskas citada pelo NIST.

#### Modelo via Hc (Babrauskas)

Cálculo da taxa mássica de queima:

$$m'' = m''_{inf}(1 - e^{-k'D})$$

**Equação 11**

$k'$  (coeficiente de absorção efetiva) = 2,1 [1/m] (Ref: Tabela 5)

$m''_{inf}$  (taxa de queima assintótica) = 55 [g/m<sup>2</sup>.s] (Ref: Tabela 5)

D (diâmetro da poça) = 4,7 [m]

$m'' = 55 \times (1 - \exp(-2,1 \times 4,7)) = 54,997$  [g/m<sup>2</sup>.s]

Cálculo do Calor Irradiado:

$$Q = m'' \cdot \Delta H_c \cdot X_{chem} \cdot \pi \cdot D^2 / 4$$

**Equação 12**

$m''$  (Taxa de calor queimada por unidade de área) = 54,997 [g/m<sup>2</sup>.s]

Hc (Calor de Combustão) = 43,7 [kJ/g] (Ref:Tabela 5)

Xchem (Eficiência de Combustão) = 0,92 (Ref: Tabela 5)

D (diâmetro da poça) = 4,7 [m] (Ref: Anexo II)

Tabela 5 - Dados da Taxa de queima de Incêndio em Poça. Fonte: Prof. Carlos André Vaz Jr, notas de aula.

Líquido	Taxa de Queima de Massa, $m''_{inf}$ , [g/m <sup>2</sup> .s]	$\Delta H_c$ (kJ/g)	$\chi_{chem}$	$\chi_r$
Gasolina	55	43,7	0,92	0,31

Outro modo de obter  $m''$  é diretamente do Gráfico 3, identificando um valor para a gasolina de  $m''$  de aproximadamente 55 g/m<sup>2</sup>.s.

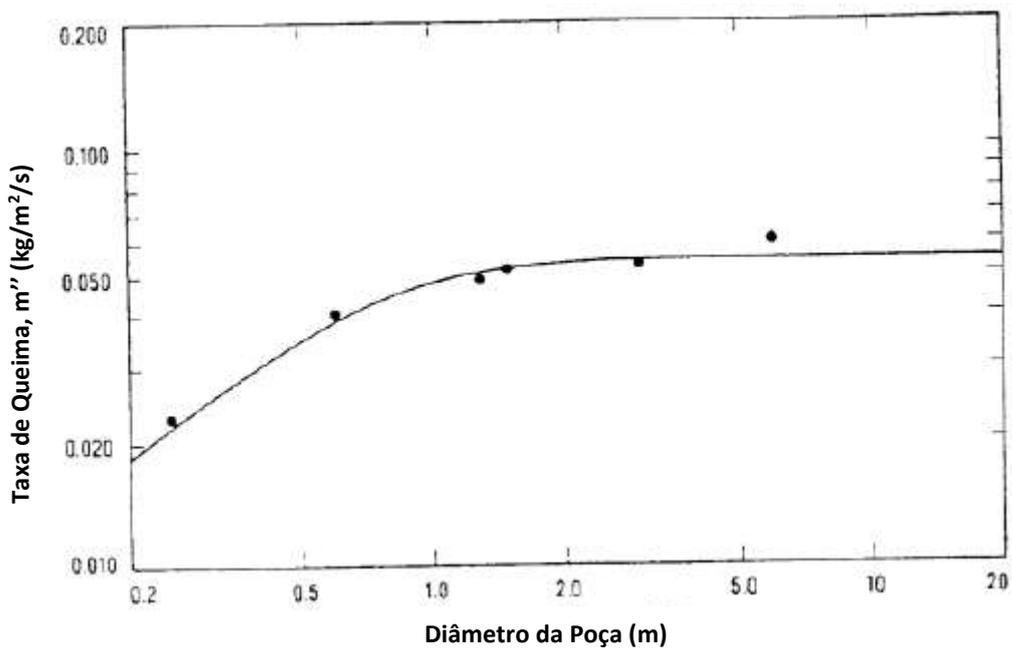


Gráfico 3 - Taxa de queima para poças de gasolina *Pool Fire*. Fonte: NIST, 2000.

Com isso,

- Calor Total Gerado

$$Q_{total} = \frac{54,997 \times 43,7 \times 0,92 \times 3,14 \times 4,7^2}{4}$$

$$Q_{total} = 38341,9 \text{ [kW]}$$

- Calor Irradiado

$$\chi_r = \chi_{r \text{ máx}} e^{-kD}$$

$$\chi_r = 0,35 * \exp(-0,05m^{-1} * 4,7m)$$

$$\chi_r = 0,277$$

$$\dot{Q}_{irrad} = \chi_r * \dot{Q}_{total}$$

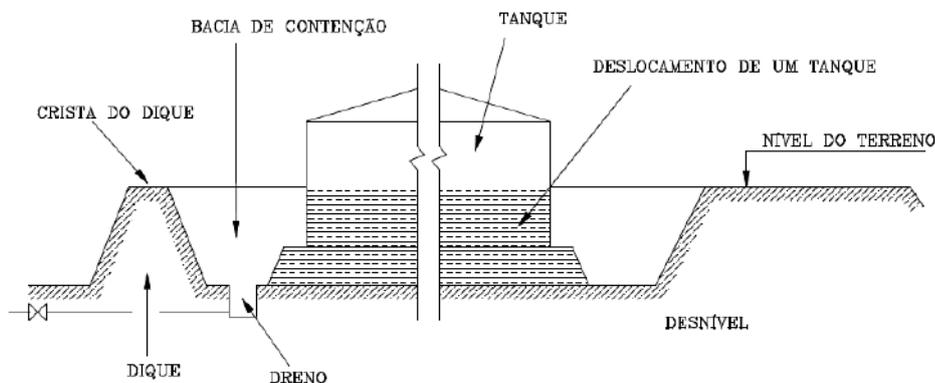
$$\dot{Q}_{irrad} = 0,277 * 38341,9$$

$$\dot{Q}_{irrad} = \mathbf{10620,71 [kW]}$$

## 6) Dimensionamento e Construção de Parques de Tancagem

O dimensionamento de um parque de armazenamento muitas vezes se torna uma tarefa difícil, pois é preciso atender às variantes demandas de clientes, sazonalidade da produção e, ainda, atender a normas ambientais e de segurança. [BARBOSA, 2010] Fato é que quanto mais conseguirmos aumentar a eficiência da área de um parque de armazenagem menor o tornamos, mas, ao mesmo tempo, aumentamos o risco a incêndio. Quanto mais eficientemente usamos o volume de um vaso, mais cheio ele deve estar, e, portanto, mais líquido haverá ali propenso a entrar em combustão. Da mesma forma, um planejamento eficiente de um parque de tancagem prevê o melhor aproveitamento possível da área destinada aos tanques, se possível, sem deixar espaços vazios. Ao mesmo tempo, se passamos para um olhar da Segurança Industrial, quanto mais afastados os tanques estiverem uns dos outros, mais seguros estarão. É preciso então encontrar um distanciamento seguro que não exija áreas impraticáveis no projeto.

Quando se trata do armazenamento de líquidos inflamáveis ou perigosos, faz-se necessário tomar uma série de medidas preventivas no projeto e na disposição destes tanques, a fim de evitar um acidente de grandes proporções capaz de causar danos à propriedade industrial, à população vizinha ao parque e ao meio ambiente. Neste trabalho foi avaliada a concepção do parque de tancagem e as normas aplicáveis aos tipos de líquidos ali armazenados. A Figura 24 mostra os componentes mais comuns no projeto de um tanque. Esta nomenclatura é necessária para a compreensão das normas.



**Figura 24 - Típico Tanque de Armazenamento. Fonte: BOMBEIROS SP, 2004**

Há diversas técnicas para dimensionamento de parques de tanques de armazenamento, mas não há uma metodologia predominante, cada empresa adota seu próprio padrão de acordo com as suas necessidades [BOMBEIROS SP, 2004] entretanto, existem normas pertinentes. A Associação Brasileira de Normas Técnicas junto com o Instituto Brasileiro de Petróleo (IBP) regulamentam como um parque de armazenamento de líquidos inflamáveis e combustíveis deve ser projetado e estar equipado para sua proteção contra derramamentos e incêndios. As recomendações e

exigências mínimas nela contidas são baseadas no histórico de incêndios e é construída com uma Comissão de Estudo representada por profissionais do setor, tanto produtores quanto consumidores e ainda neutros (universidades, laboratórios).

Para o caso avaliado foram consideradas as normas brasileiras NR-20 (Líquidos e Combustíveis Inflamáveis) do Ministério do Trabalho e Emprego (MTE), a norma ABNT NBR 7505-1 (Armazenagem de líquidos inflamáveis e combustíveis Parte 1: Armazenagem em tanques estacionários. 2003) e a ABNT NBR 7505-4 (Armazenagem de líquidos inflamáveis e combustíveis. Parte 4: Proteção contra incêndio. 2003). Usou-se também a INSTRUÇÃO TÉCNICA Nº 27/2004 do Corpo de Bombeiros de São Paulo sobre a armazenagem de Líquidos Inflamáveis e Combustíveis.

### 6.1. Aspectos técnicos que regem um Pátio de Tancagem

A Norma ABNT NBR 7505-1 define distâncias entre o costado dos tanques. Deve-se atentar para as seguintes distâncias: [NR-20, 2008]

- Posição entre o costado dos tanques;
- Parede externa mais próxima de uma edificação e altura do tanque;
- Parede externa mais próxima do equipamento fixo ou circulação de pessoas;
- Limite da propriedade e rodovias;
- Tamanho da base interna do dique, bem como seu volume.

As normas apresentam uma classificação dos líquidos combustíveis e inflamáveis, e as recomendações de segurança dependem dessa classificação. As tabelas que são apresentadas neste capítulo foram retiradas das normas ABNT-7501-1 e ABNT-7505-4 buscando-se mostrar apenas a parte interessante a este estudo.

**Tabela 6 - Classificação dos Líquidos Inflamáveis e Combustíveis. Fonte: ABNT 7505-1, 2003.**

		<b>Classe</b>	<b>Subclasse</b>	
<b>Classe</b>	<b>Nomenclatura</b>	<b>Descrição</b>	<b>Subclasse</b>	<b>Descrição</b>
<b>I</b>	<b>Inflamáveis</b>	Líquidos que possuem ponto de fulgor inferior a 37,8°C e pressão de vapor menor ou igual a 275,6 kPa (2068,6 mm Hg)	<b>IA</b>	Líquidos com ponto de fulgor inferior a 22,8°C e ponto de ebulição inferior a 37,8°C
			<b>IB</b>	Líquidos com ponto de fulgor inferior a 22,8°C e ponto de ebulição igual ou superior a 37,8°C
<b>II</b>	<b>Combustíveis</b>	Líquidos com ponto de fulgor igual ou superior a 37,8°C e inferior a 60°C		

<b>III</b>	<b>Combustíveis</b>	Líquidos com ponto de fulgor igual ou superior a 60°C	<b>IIIA</b>	Líquidos com ponto de fulgor igual ou superior a 60°C e inferior a 93°C
			<b>IIIB</b>	Líquidos com ponto de fulgor igual ou superior a 93°C

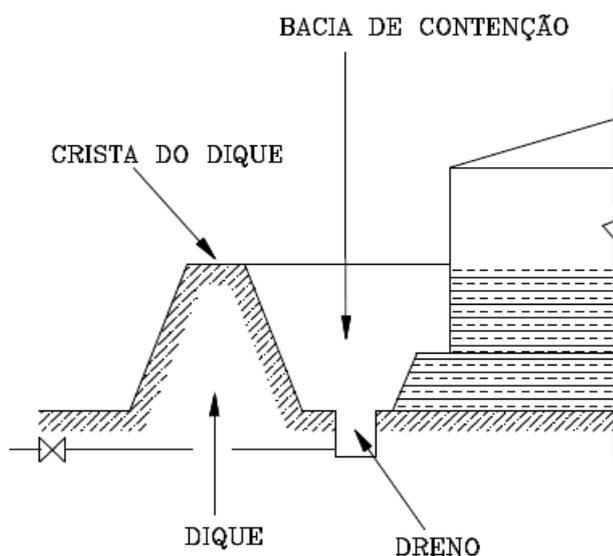
No caso em estudo, os tanques armazenavam gasolina e álcool (conforme informa o site da empresa). Os pontos de fulgor de cada substância e sua classificação são apresentados na Tabela 7:

**Tabela 7 - Líquidos armazenados pela Petrogold Fonte: Fichas de Instrução Técnica de Produtos Químicos (FISPQ), Petrobrás.**

Substância	Ponto de Fulgor	Ponto/Faixa de Ebulição	Classificação
<b>Gasolina</b>	-42,8°C	27 – 220°C	IA
<b>Álcool Etilico Hidratado Combustível (AEHC)</b>	15°C	77°C	IB
<b>Álcool Etilico Anidro Combustível (AEAC)</b>	13°C	78,5°C	IB

### 6.1.1. Bacia de Contenção

Bacia de Contenção é uma depressão no contorno do vaso, limitada pela topografia do terreno ou por um dique, destinada a conter vazamentos. [ABNT 7505-1, 2003]



**Figura 25- Detalhe da Figura 24: Dique e Bacia de Contenção. Fonte: BOMBEIROS SP, 2004.**

Não é permitido, segundo as Normas NR-20 e ABNT-NBR 7505-1, qualquer construção que não seja o tanque ou tubulações no interior da bacia de contenção.

A norma permite a construção de mais de um tanque por bacia, porém a soma das capacidades dos tanques não deve exceder 20.000 m<sup>3</sup>. Sua capacidade deve ser no mínimo igual ao volume do maior tanque, mais o volume de deslocamento da base deste tanque, mais a soma dos volumes de deslocamento dos demais tanques, suas bases e dos diques intermediários.

A contenção/parede deve ser de material quimicamente compatível (terra, concreto, outros) com os produtos armazenados nos tanques que ele isola, formando a Bacia de Contenção. A altura do dique deve ser aquela que compreenda o volume da bacia calculado de acordo com o explicado acima, mais 20cm para conter as movimentações do líquido. A altura máxima é de 3m, sua superfície superior deve ser plana e ter uma largura mínima de 60cm. A distância mínima entre a base externa do dique e o limite da propriedade é também de 3m. [ABNT 7505-1, 2003]

#### **6.1.2. Circulação de Pessoas e Veículos**

A bacia de contenção deve estar nas proximidades de no mínimo duas vias diferentes. Estas vias devem ser pavimentadas ou estabilizadas e ter largura compatível para a passagem simultânea de dois veículos de combate a incêndio, ou 5 m, devendo ser adotado o maior destes valores. Quando mais de dois tanques estiverem numa mesma bacia de contenção, eles devem ser posicionados de modo a permitir o acesso a cada um deles por uma via adjacente. [ABNT 7505-1, 2003]

O acúmulo de eletricidade estática no escoamento de hidrocarbonetos em dutos, na simples mistura de líquidos imiscíveis, no transporte pneumático de sólidos, no movimentar-se de transportes de cargas, pode representar uma importante ameaça a segurança operacional. Por isso o projeto de segurança dentro de instalações industriais passa sempre por um correto aterramento de todos os dispositivos, tanques e tubulações; como mostra a Figura 26. [ABNT 7505-4, 2003]

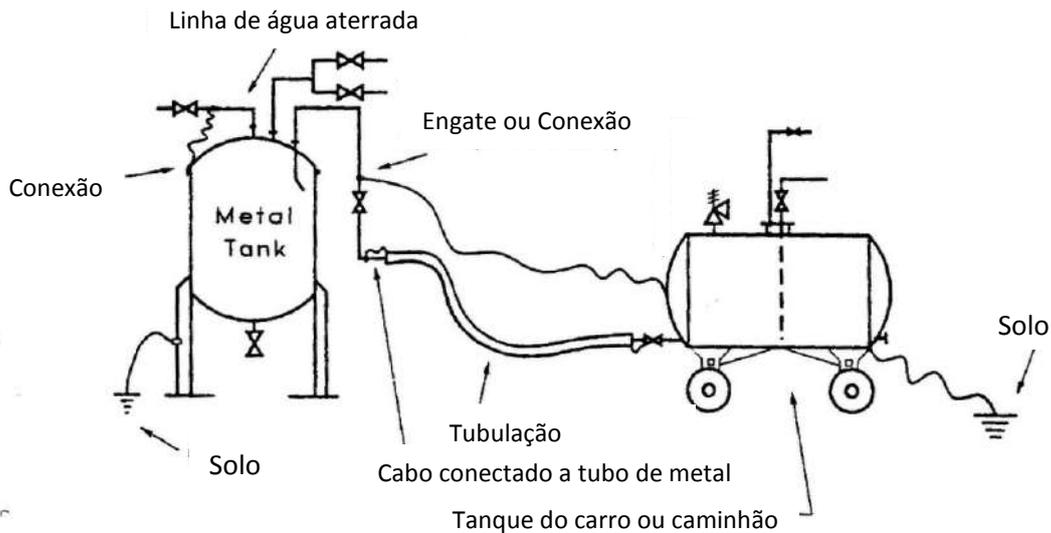


Figura 26 - Aterramento de tanques e Caminhões durante operação de carga. Fonte: Adaptado de Crowl e Louvar, 2002.

### 6.1.3. Posição entre o costado dos tanques

A ABNT NBR 7505-1 define as distâncias de segurança entre o costado do tanque e o costado de outro tanque. É função do diâmetro dos tanques, do tipo de teto e da classe do fluido armazenado, conforme a Tabela 8.

Tabela 8 - Distância entre tanques. Fonte ABNT 7505-1, 2003.

	Tanque de teto flutuante	Tanque de teto fixo ou horizontal	
		Líquidos da classe I ou II	Líquidos da classe IIIA
<b>Todos os tanques com o diâmetro inferior a 45 m</b>	1/6 da soma dos diâmetros dos tanques adjacentes, mínimo de 1 m	1/6 da soma dos diâmetros dos tanques adjacentes, mínimo de 1 m	1/6 da soma dos diâmetros dos tanques adjacentes, mínimo de 1 m
<b>Se possuírem dique de contenção</b>	1/4 da soma dos diâmetros dos tanques adjacentes	1/3 da soma dos diâmetros dos tanques adjacentes	1/4 da soma dos diâmetros dos tanques adjacentes

### 6.1.4. Parede externa mais próxima a uma edificação, rodovias e limites da propriedade

As distâncias até uma edificação são de grande importância à segurança e as regras se aplicam de acordo com alguns parâmetros. Deve-se primeiro verificar:

- A classe do fluido (I, II, IIIA ou IIIB);
- A pressão do tanque: maior ou menor que 17.2 kPa
- O tipo de tanque (Vertical com teto flutuante, Vertical com Solda de baixa resistência, Horizontal, etc)

- A capacidade do tanque.

Tendo sido verificadas essas variáveis, as tabelas a seguir indicam os distanciamentos seguros dependendo, principalmente, do diâmetro do tanque.

**Tabela 9 - Líquidos classes I, II, IIA (Pressão de Operação até 17.2kPa). Fonte: ABNT 7505-1, 2003.**

Tipo de tanque	Proteção	Coluna 1: Distância mínima do limite da propriedade onde haja ou possa haver construção, incluindo o lado oposto da via pública, nunca inferior a 4,5 m (5 pés)	Coluna 2: Distância mínima do lado mais próximo de qualquer via pública ou qualquer edificação importante na mesma propriedade, nunca inferior a 4,5 m (15 pés) para o primeiro e 1,5 m (5 pés) para o segundo, o maior valor
Vertical com solda de baixa resistência entre o teto e o costado (conforme API 650)	Usando sistema de espuma conforme Norma Brasileira existente <sup>1)</sup> ou sistema de inertização conforme NFPA 69; em tanque que não exceda 45 m de diâmetro <sup>**)</sup>	1/2 diâmetro do tanque	1/6 do diâmetro do tanque
	Com proteção contra exposição <sup>*</sup> )	o diâmetro do tanque	1/3 do diâmetro do tanque
	Sem proteção alguma	2 vezes o diâmetro do tanque limitado a 105 m (350 pés)	1/3 do diâmetro do tanque
Horizontal e vertical com dispositivo de alívio de emergência limitada a pressão de 17,2 kPa (2,5 psig)	Usando sistema de inertização conforme NFPA 69 no tanque ou sistema de espuma aprovado no tanque vertical	1/2 do valor da Tabela 11	1/2 do valor da Tabela 11
	Com proteção contra exposição <sup>*</sup> )	O valor da Tabela 11	O valor da Tabela 11
	Sem proteção alguma	2 vezes o valor da Tabela 11	O valor da Tabela 11
<p><sup>*</sup>) <b>proteção contra exposição:</b> Recursos permanentemente disponíveis, representados pela existência de Corpo de Bombeiros na jurisdição, capaz de resfriar com água as estruturas vizinhas à armazenagem de líquidos inflamáveis e combustíveis e as propriedades adjacentes, enquanto durar o incêndio; na falta de Corpo de Bombeiros, será aceita a Brigada de Combate a Incêndio da empresa vizinha, desde que equipada, treinada e haja acordo entre as partes.</p> <p><sup>**)</sup> Para tanques de diâmetro acima de 45,7 m usar, conforme o caso “Proteção contra exposição” ou “Sem proteção alguma”.</p>			

**Tabela 10 - Líquidos da Classe IIIB. ABNT 7505-1, 2003.**

<b>Capacidade do tanque (m<sup>3</sup>)</b>	<b>Distância mínima do limite da propriedade onde haja ou possa haver construção, incluindo o lado oposto da via pública (m)</b>	<b>Distância mínima do lado mais próximo de qualquer via pública ou qualquer edificação importante na mesma propriedade (m)</b>
<b>≥380</b>	4,50	4,50

A tabela complementar (Tabela 11) leva em consideração apenas a capacidade do tanque. Ela é usada junto a Tabela 9 acima onde indicada. Vale lembrar que sempre prevalecerá a regra mais restritiva, isto é, a que definir a maior distância de afastamento.

**Tabela 11 - Tabela complementar para ser usada na tabela 9, quando citadas nas mesmas. Fonte: ABNT 7505-1, 2003.**

<b>Capacidade do tanque (m<sup>3</sup>)</b>	<b>Distância mínima do limite da propriedade onde haja ou possa haver construção, incluindo o lado oposto da via pública (m)</b>	<b>Distância mínima do lado mais próximo de qualquer via pública ou qualquer prédio importante na mesma propriedade (m)</b>
<b>380,1 a 1.900</b>	24,00	7,50

A Figura 27 resume de maneira ilustrativa as distâncias de segurança a serem definidas no projeto de acordo com a norma indicada nas tabelas vistas.

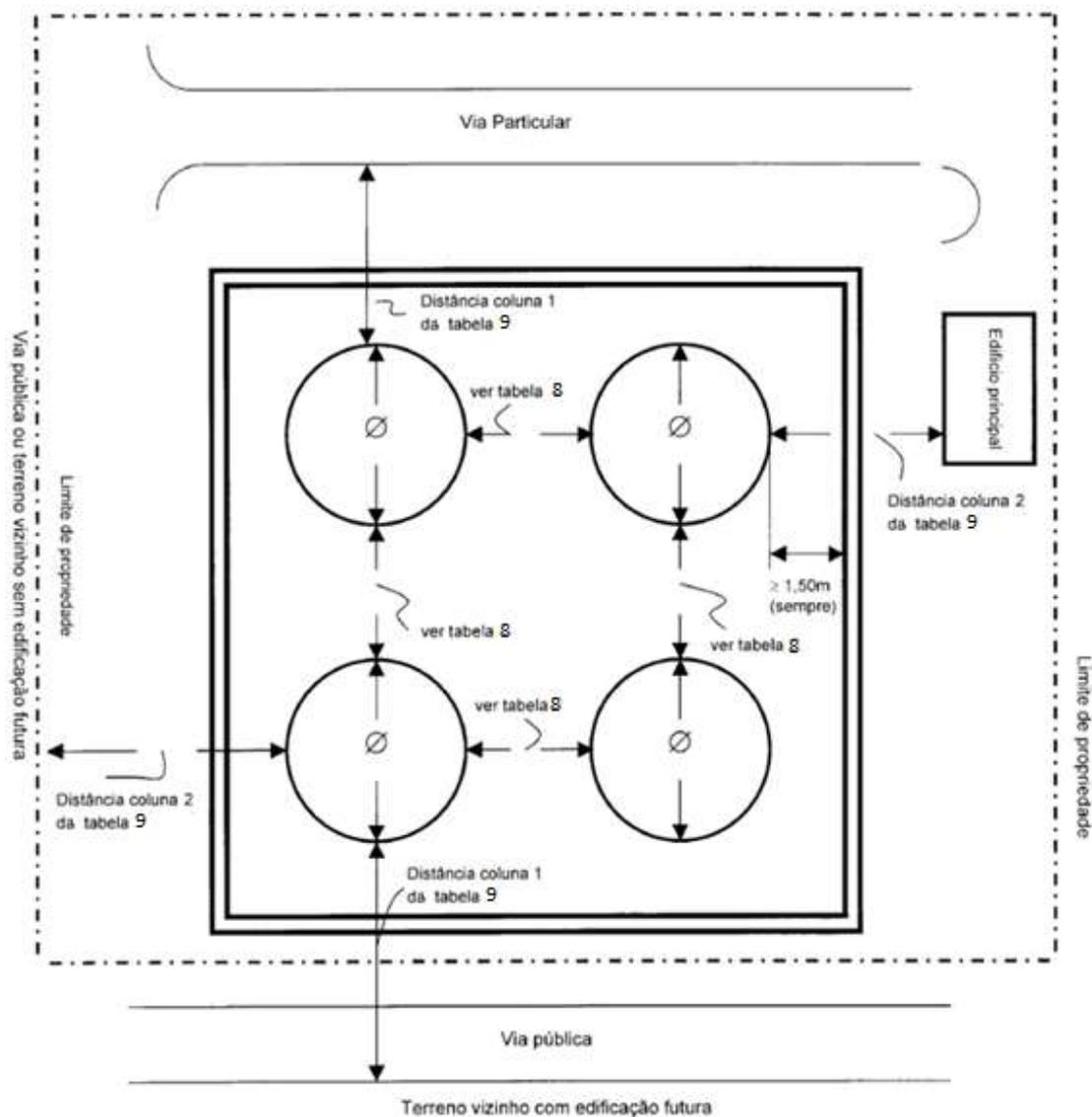


Figura 27 - Ilustrativo para as tabelas 8 a 11. Fonte: ABNT 7505-1, 2003.

## 6.2. Projeto de Contenção para o caso Petrogold

Segundo a autorização concedida pela ANP a capacidade instalada da empresa era de 2048m<sup>3</sup> distribuídos da seguinte forma:

Tabela 12 - Tanques Petrogold. Fonte: [ANP, 2009]

Tanque nº	Diâmetro (m)	Altura (m)	Volume (m <sup>3</sup> )	Produto	Classe
1	9,32	7,45	508	GASOLINA	IA
2	9,32	7,45	508	GASOLINA	IA
3	7,64	7,5	344	AEAC	IA
4	7,64	7,5	344	AEHC	IA
5	7,64	7,5	344	DIESEL	IIIB

AEAC = Álcool Etilico Anidro Combustível, AEHC = Álcool Etilico Hidratado Combustível

Pela imagem do terreno da empresa na Figura 28 observa-se a disposição dos tanques na propriedade. São visíveis seis tanques. Algumas informações indicam que um deles armazenava água. Não há informações de qual tanque armazenava cada um dos líquidos, para a análise do caso foi suposta a distribuição mostrada na Figura 28.



**Figura 28 - Disposição dos tanques. Foto: Pablo Jacob/ Agência O GLOBO**

Analisando o terreno da Petrogold segundo as normas apresentadas anteriormente, as distâncias mínimas são aquelas apresentadas na Figura 29 conforme segue:

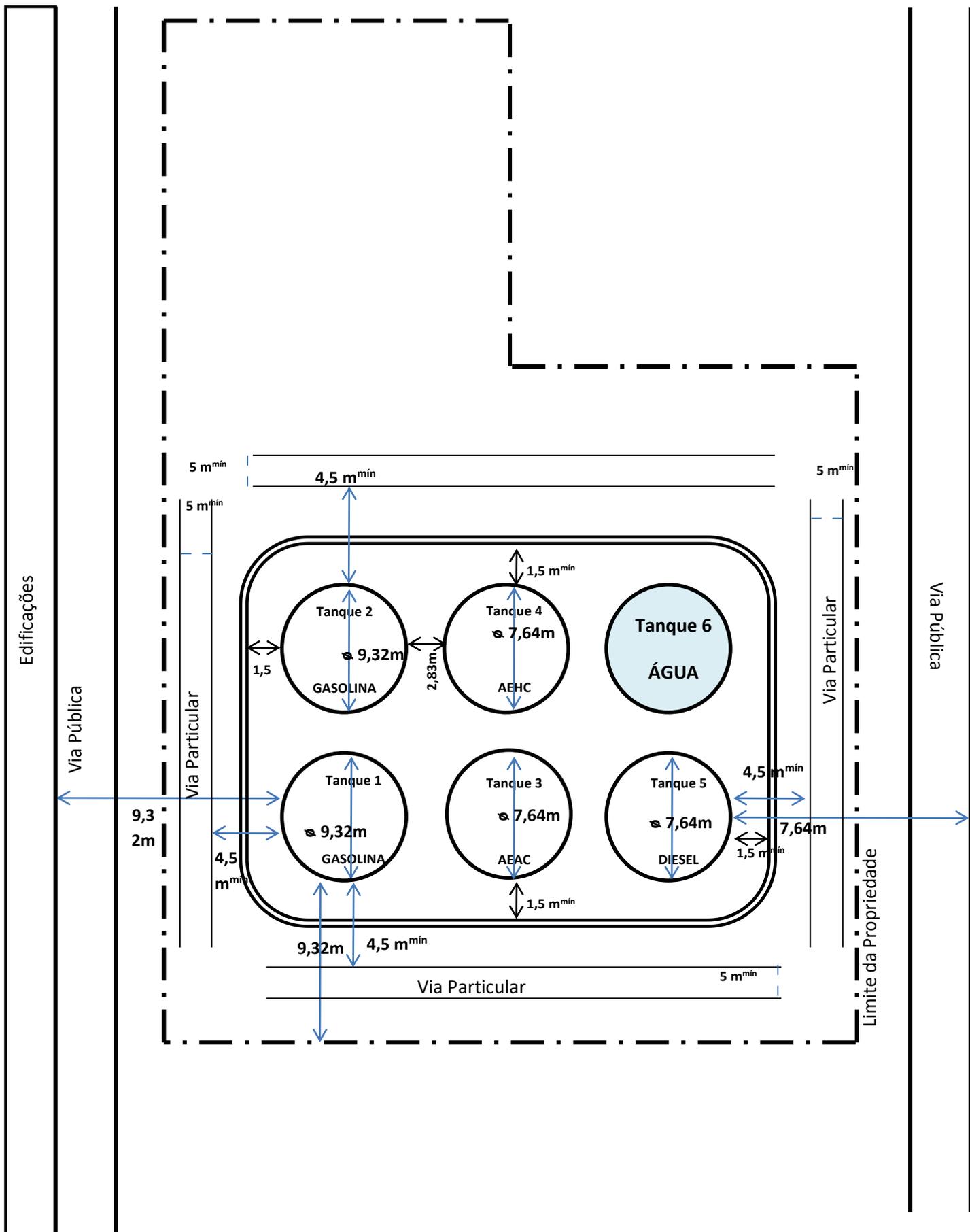


Figura 29 - Distâncias mínimas para o terreno da Petrogold de acordo com a ABNT NBR 7505-1.

## 7) Combate a Incêndio

Deve-se sempre prezar por evitar o incêndio, porém, em um projeto de segurança é preciso também estar preparado para ocorrências fora do esperado. Caso ocorra um incêndio em uma unidade de armazenagem de líquidos inflamáveis, a empresa deve estar equipada de dispositivos capazes de extinguir a chama o mais rápido possível. O meio de extinção de incêndio mais apropriado para líquidos inflamáveis é espuma para hidrocarbonetos. Ela forma um “lençol” sobre o líquido em chamas, extinguindo o fogo por abafamento. Deve-se ainda resfriar com neblina d’água, os recipientes que estiverem expostos ao fogo, garantindo que sua temperatura não atinja a auto-ignição.

No âmbito de possíveis incêndios a ABNT e o IBP regulamentam como um parque de armazenamento de líquidos inflamáveis e combustíveis deve estar equipado. As regulamentações visam prover capacidade para a empresa de extinguir fogo o mais rapidamente possível, ou ao menos controlá-lo até que apoio externo chegue ao local. As exigências e recomendações de encontram na Norma ABNT NBR 7505-4.

### 7.1. Definições

Para a compreensão desta Norma é necessário esclarecer algumas definições: [ABNT 7505-4, 2003.]

- Risco isolado: *“Tanque ou conjunto de tanques instalados em bacias de contenção não adjacentes, cujas distâncias de segurança excedam aos requisitos da NBR 7505-1”*;
- Maior risco: *“Risco isolado que requer a maior demanda de água para combate a incêndio”*;
- Produto: *“Líquido inflamável ou combustível”*;
- Sistema de espuma: *“Conjunto de equipamentos que, associados ao sistema de água de incêndio, são capazes de produzir e aplicar espuma”*.

### 7.2. Projeto de Sistemas de Contenção contra Incêndio

Nos projetos de sistemas de contenção contra incêndio o dimensionamento da rede de equipamentos e tubulações associadas é feito *“sempre pelo maior risco isolado e considera-se a não simultaneidade de eventos, ou seja, baseando-se na ocorrência de apenas um evento.”* [ABNT 7505-4, 2003]

#### 7.2.1. Suprimento de Água

Embora não se use diretamente água para conter incêndio em líquidos, o projeto prevê a utilização de grande quantidade de água, pois é a partir da mistura água e líquido gerador de espuma (LGE) que se produzirá a espuma para abafar o incêndio. O suprimento desta água deve vir preferencialmente de uma fonte inesgotável (mar, rio, etc). Não é obrigatório tratá-la, desde que esteja isenta de óleo ou quaisquer outras

substâncias que atrapalhem a formação da espuma. Como a rede de hidrantes deve estar pressurizada com a água, dá-se preferência à utilização de água doce e sem material sólido em suspensão, reduzindo depósitos, obstruções e corrosão. Caso não haja alternativa, usa-se água salgada com tubulação apropriada, mas deve-se sempre retirar o material sólido em suspensão a fim de evitar obstruir os aspersores. [ABNT 7505-4, 2003]

Caso não esteja disponível uma fonte de água inesgotável, o projeto do parque de tanques deve prever um reservatório de água capaz de atender à demanda do sistema de contenção contra fogo. A reserva de água deve ser suficiente, independente da época do ano ou condição climática. A capacidade é proporcional à vazão necessária e ao tempo mínimo que os hidrantes/aspersores tem de estar em operação caso ocorra um incêndio. Este tempo, segundo a norma, depende da capacidade de armazenagem do parque de tanques de acordo com a Tabela 13:

**Tabela 13 - Capacidade de Armazenagem. Fonte: ABNT 7505-4, 2003**

<b>Capacidade de Armazenagem (m<sup>3</sup>)</b>	<b>Tempo (h)</b>
<b>≥ 40.000</b>	<b>6</b>
<b>Entre 10.000 e 40.000</b>	<b>4</b>
<b>≤ 10.000</b>	<b>2</b>

Para o caso da Petrogold, a armazenagem total era de 2048m<sup>3</sup>, então bastaria um projeto capaz de manter os hidrantes/aspersores ativos por duas horas. Quando é possível reabastecer o reservatório de água simultaneamente ao evento de um incêndio, o volume deste reservatório pode ser reduzido proporcionalmente a esse abastecimento, desde que o tanque seja capaz de suprir o combate por no mínimo 2h. [ABNT 7505-4, 2003]

### **7.2.2. Cálculo da Vazão**

Para o projeto da vazão de água a norma ABNT-NBR 7505-4 prevê dois tipos de sistemas fixos para combate a incêndio em Tanques Verticais Atmosféricos:

- Resfriamento do tanque em chamas e dos tanques vizinhos;
- Aplicação de espuma a um tanque, acrescida da necessidade de aplicação de espuma para a bacia (dique) e ainda o resfriamento dos tanques vizinhos;

Deve-se sempre usar o projeto que conferir a maior vazão.

#### **7.2.2.1. Resfriamento de Tanques**

Aspersores de água para resfriamento devem ser dispostos de forma a gerar uma lâmina d'água contínua sobre a superfície do costado do tanque. [ABNT 7505-4, 2003]

O cálculo da vazão de água necessária ao resfriamento, segundo a Norma, determina:

- 4L/min por m<sup>2</sup> do costado do tanque em chamas;
- 2L/min por m<sup>2</sup> da área determinada na Tabela 14 para os tanques vizinhos; ou
- Canhões monitores ou linhas manuais conforme a Tabela 15.

**Tabela 14 – Aspersores. Fonte: ABNT 7505-4, 2003**

N <sup>1)</sup>	Área a ser Resfriada
1	Área do costado
>1	Soma das áreas dos costados

1) N é o número de tanques verticais vizinhos

**Tabela 15 - Canhões monitores ou Linhas Verticais. Fonte: ABNT 7505-4, 2003**

N <sup>1)</sup>	Distância entre Costados (m)	Taxa <sup>2)</sup>
	≤8	8
≤2	Entre 8 e 12	5
	≥12	3
N <sup>1)</sup>	Distância entre Costados (m)	Taxa <sup>3)</sup>
	≤8	8
>2	Entre 8 e 12	5
	≥12	3

1)N = Número de tanques verticais vizinhos  
2)L/min por m<sup>2</sup> de ½ do ∑ das áreas do teto e costado do tanque vizinho  
3)L/min por m<sup>2</sup> de ⅓ do ∑ das áreas do teto e costado do tanque vizinho

#### 7.2.2.2. Sistema de Espuma

*“Em todos os locais sujeitos a derrame ou vazamento de produto ou onde o produto possa estar exposto à atmosfera em condições de operação, deve haver um sistema de lançamento de espuma”.* [ABNT 7505-4, 2003]

A dosagem do líquido gerador de espuma (LGE) depende de cada fabricante. Ela deve ser sempre suficiente para atender as vazões e tempo de ação conforme informado na metodologia a seguir apresentada. No projeto da vazão de solução de espuma considera-se apenas a água e o LGE, não se considera ar na mistura.

Tanques atmosféricos verticais de teto fixo que armazenem substâncias de classe I ou II e que possuam diâmetro superior a 9m ou altura superior a 6m (os tanques aqui analisados possuíam altura de 7,45m) são obrigados a ter um sistema fixo de aspersores de espuma para combate a incêndio.

A norma indica que o número de câmaras de espuma a ser instalado por vaso depende do seu diâmetro. Para diâmetros menores que 24m, apenas uma câmara por tanque é suficiente.

Além da quantidade de câmaras de espuma, a Norma define ainda a taxa e o tempo mínimo que a espuma deve ser aplicada sobre o tanque – conforme a Tabela 16.

**Tabela 16 - Taxa de aplicação e tempo de espuma nos tanques verticais com hidrocarbonetos.**

Fonte: ABNT 7505-4, 2003

Tipo	Taxa mínima de aplicação L/min por m <sup>2</sup>	Tempo mínimo (min)	
		Hidrocarbonetos Classe I	Classe II
Câmara de espuma	4,1	55	30
Aplicadores manuais de espuma	6,5	65	30

### 7.2.3. Proteção da Bacia de Contenção

Por também estarem diretamente expostas ao risco, as bacias de contenção (diques) também são contempladas pela norma de segurança. Elas devem ser equipadas com aplicadores manuais. Caso o maior tanque tenha menos de 10,5m de diâmetro, basta um aplicador manual de espuma com volume suficiente para operar por 10 minutos.

### 7.2.4. Proteção das Plataformas de Carregamento

Assim como os tanques, as áreas onde são feitas as cargas e descargas de caminhões-tanques também estão sujeitas ao risco de incêndio. A própria operação de carga e descarga de materiais combustíveis e inflamáveis já gera uma série de condições de risco.

A NBR 7505-4 prevê para essas áreas uma proteção semelhante àquela aplicada aos tanques, podendo ser feita com aplicadores manuais, canhões monitores ou com sistema fixo de aspersores de espuma. As taxas de aplicação de espuma nessas áreas devem obedecer à Tabela 17:

**Tabela 17 - Taxas de aplicação de espuma e tempos para plataformas de carregamento. Fonte: ABNT 7505-4, 2003**

Tipo de Espuma	Taxa mínima de Aplicação (L/min.m <sup>2</sup> )	Tempo mínimo de aplicação (min)	Produto armazenado
Proteínica, fluorproteínica	6,5	15	Hidrocarbonetos
AFFF, FFFP, & para solventes polares AFFF ou FFFP <sup>2)</sup>	4,1 <sup>1)</sup>	15	Hidrocarbonetos
Espumas para solventes polares	Consultar os fabricantes de espuma.	15	Líquidos inflamáveis e combustíveis que requeiram espuma para solventes polares.

1) Se a área a ser protegida puder formar uma camada combustível superior a 2,5cm, a taxa de aplicação deve subir para 6,5 L/min.m<sup>2</sup>

2) AFFF = Sigla em inglês para Espuma Formadora de Filme Aquoso  
FFFP = Sigla em inglês para Espuma de Fluoroproteína Formadora de Filme

A área considerada nos cálculos da Tabela 17 é toda a região onde ocorrem as operações de carga e descarga, inclusive os braços de carregamento, medidores, canaletas para captação de derrame de produto e demais equipamentos associados com a operação. [ABNT 7505-4, 2003]

### 7.3. Projeto de Proteção contra Incêndio para o caso da Petrogold analisado

Esta seção propõe um projeto de segurança para o caso em análise baseando-se nas normas e recomendações da ABNT NBR 7505-4.

Conforme apresentado anteriormente, os tanques possuíam as seguintes dimensões:

**Tabela do Anexo I**

Tanque n°	Produto	Classe	Diâmetro (m)	Altura (m)	Volume (m <sup>3</sup> )	Área do teto (m <sup>2</sup> )	Área do Costado (m <sup>2</sup> )
1	GASOLINA	IA	9,32	7,45	508	68,22	218,13
2	GASOLINA	IA	9,32	7,45	508	68,22	218,13
3	AEAC	IA	7,64	7,5	344	45,84	180,01
4	AEHC	IA	7,64	7,5	344	45,84	180,01
5	DIESEL	III	7,64	7,5	344	45,84	180,01

Para o projeto do sistema de combate a incêndio foi considerado como maior risco o incêndio em um dos dois tanques de gasolina (Tanques 1 ou 2). Lembrando que não se projeta com simultaneidade de eventos.

### 7.3.1. Projeto para Aspersores

Calculou-se o projeto para duas situações: utilizando aspersores de espuma como equipamento de combate a incêndio, e utilizando Canhões Aplicadores ou Linhas Manuais.

Para a utilização de aspersores de espuma, o número necessário de câmaras de espuma é de apenas um por tanque para os diâmetros dos tanques avaliados. Já a Taxa Mínima de Aplicação de Espuma é determinada pela Tabela 16 apresentada. Utilizando os dados dimensionais dos tanques e as exigências da Norma ABNT NBR 7505-4 chegou-se a um projeto conforme apresentado na Tabela 18:

**Tabela 18 - Projeto para aspersores nos tanques**

<b>Aspersores</b>			
Vazão de água para resfriamento do tanque em chamas (4L/min por área do costado)	Vazão de água para resfriamento dos tanques vizinhos (2L/min por área do costado)	Número mínimo de câmaras de espuma	Taxa mínima de Aplicação de espuma (4,1 L/min por m <sup>2</sup> )
872,53		1	894,33
	436,26	1	894,33
	360,03	1	738,05
	360,03	1	738,05
	360,03	1	738,05
SubTotal: 872,53	SubTotal: 1516,35	5	894,33    3108,48
2388,88 L/min de água para resfriamento		4002,81 L/min de espuma	

### 7.3.2. Projeto para Canhões Monitores ou Linhas Manuais

Já para a utilização de Canhões Monitores ou Linhas Manuais, a vazão mínima para resfriamento dos tanques segue a Tabela 15 e a Taxa Mínima de Aplicação de Espuma é determinada pela Tabela 16 apresentada. Utilizando os dados dimensionais dos tanques e as exigências da Norma ABNT NBR 7505-4 para canhões monitores e linhas manuais chegou-se a um projeto conforme apresentado na Tabela 19:

**Tabela 19 - Projeto para Canhões Monitores ou Linhas Manuais**

<b>Canhões monitores ou linhas manuais</b>			
Vazão para Resfriamento do Tanque em chamas (4L/min por m <sup>2</sup> do costado)	Vazão para resfriamento dos tanques vizinhos (Com N > 2 e distância entre costados < 8)	Taxa mínima de Aplicação de espuma conforme tabela 16 (6,5 L/min por m <sup>2</sup> )	
872,53		1417,85	
	= 8L/min * 1/3*∑área do teto e costado dos tanques vizinhos		1417,85
			1170,09
			1170,09
			1170,09
SubTotal 872,53	SubTotal 2022,72	SubTotal 1417,85	SubtoTal 4298,12
2895,25 L/min de água para resfriamento		6345,97 L/min de espuma	

### 7.3.3. Fornecimento de Água

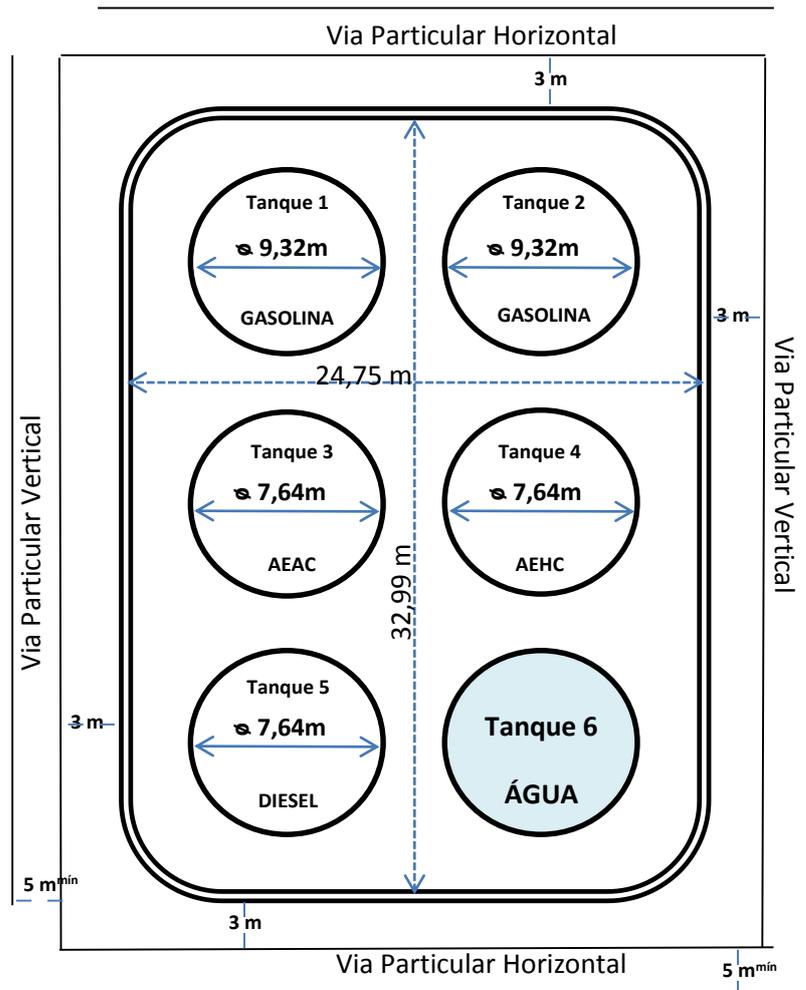
Nota-se que é requerida uma alta vazão de água e de espuma para os dois tipos de projeto, por isso recomenda-se a utilização de uma fonte inesgotável de água para abastecimento do sistema fixo de combate a incêndio. Caso não esteja disponível esse tipo de fonte, o reservatório de água teria de ter uma capacidade muito grande, conforme mostra a Tabela 20:

**Tabela 20 - Armazenagem de Água**

<b>Capacidade de armazenagem de água (m<sup>3</sup>)</b>	
A capacidade de armazenagem do maior risco é a do Tanque 1 ou 2 = 508 m <sup>3</sup> . Então, o Tempo de Aplicação da espuma conforme tabela 13 é de 2h (120 min)	
A armazenagem de água deve então ser capaz de suprir 2h da soma das vazões requeridas para resfriamento e geração de espuma do maior risco e dos tanques vizinhos	
Aspersores	Canhões Monitores
767,003 m <sup>3</sup>	1108,95 m <sup>3</sup>

### 7.3.4. Proteção da Bacia de Contenção e das Plataformas de Carregamento

Para o projeto de contenção de incêndio no dique e nas plataformas de carregamento foram consideradas as medidas do projeto de distanciamento seguro da área conforme a Figura 29. A Figura 30 exhibe as distâncias necessárias aos cálculos de área exposta.



**Figura 30 - Medidas do Parque de Tancagem Petrogold**

Como não foi observada nenhuma área específica para carga e descarga de caminhões no terreno, para o projeto de combate a incêndio foi considerada como Plataforma de Carregamento toda a área que compreende as vias internas particulares (Chamadas na figura de “Horizontal” e “Vertical”).

Como comentado, a proteção da Bacia de Contenção depende do diâmetro do maior tanque contido nela que armazene produto. Lembrando que a pior situação corresponde a situação de incêndio em qualquer um dos dois vasos de gasolina (Tanques 1 ou 2). Desta forma, a disposição de apenas um aplicador manual que atenda à proteção da área por 10 minutos é suficiente para esta área em análise.

Quanto às Vias Particulares usadas como Plataformas de Carregamento, a Tabela 17 apresenta o cálculo das taxas de aplicação de espuma. Aplicando ao caso da Petrogold temos o seguinte resultado:

**Tabela 21 - Taxa de Aplicação de espuma para as Plataformas de Carregamento**

<b>2x Vias Verticais</b>	<b>2x Vias Horizontais</b>
Área = $(32,99+3+3)*5 = 199,95\text{m}^2 \times 2$	Área = $(24,75+3+3)*5 = 153,75\text{m}^2 \times 2$
Taxa mínima de aplicação = 6,5 L/min por área	Taxa mínima de aplicação = 6,5 L/min por área
Taxa mínima de aplicação = 1299,675 L/min por via	Taxa mínima de aplicação = 999,375 L/min por via
Tempo de aplicação = 15min em cada via	Tempo de aplicação = 15min em cada via
Capacidade = 19,50 m <sup>3</sup> por via	Capacidade = 14,99 m <sup>3</sup> por via

Os cálculos para um projeto de segurança que atenda às Normas Brasileiras são simples, porém seu projeto de fato encarece a instalação, pois reserva uma grande área para a contenção de derramamentos e afastamento entre tanques, além de acrescentar uma série de equipamentos, tubulações e considerável suprimento de água. Porém, todo esse custo torna-se justificado diante de eventos como este incêndio em tela, que afetou toda a instalação aqui avaliada.

## 8) Conclusão

O presente trabalho permitiu analisar, a partir de informações públicas, um evento real de incêndio em parque de tancagem de combustíveis. O modelo escolhido para avaliar o caso foi aquele indicado pelo laboratório NIST, que demonstrou ser de fácil utilização com resultados confiáveis devido à grande experiência deste laboratório.

Segundo a modelagem feita para incêndio em poça de diâmetro de até 5 metros, poça com diâmetro menor que 20 metros, e poça com diâmetro maior que 20 metros, foram obtidos os seguintes resultados para a radiação térmica:

- D (= 4,7m):  $Q_{total} = 38341,9 \text{ kW}$ ;  $Q_{irradiado} = 10.620,71 \text{ kW}$ ;  $X_r = 0,277$
- D (= 9,32m):  $Q_{total} = 163.731,76 \text{ kW}$  ;  $Q_{irradiado} = 36.021 \text{ kW}$  ;  $X_r = 0,22$ ; Altura da Chama (H) =12,28 m
- D (= 31,59m):  $Q_{total} = 1.880.736 \text{ kW}$  ;  $Q_{irradiado} = 658.257,6 \text{ kW}$ ;  $X_r = 0,35$  ;  
Altura da Chama (H) = 15,36 m

Conforme esperado pode-se observar que o diâmetro de poça interfere significativamente na quantidade do calor total gerado e quantidade de calor irradiado, afinal, quanto maior a poça maior é a chama e, então, mais calor será irradiado. Porém, o diâmetro não apresenta tanta influência sobre a altura da chama. É possível que a altura da chama luminosa esteja mais relacionada à volatilidade do líquido queimando e de sua taxa de queima. Afinal, a partir do diâmetro de 20m, considerado máximo, o tamanho da base da chama já não interfere mais em sua altura mas a taxa de queima continua sendo um parâmetro importante para sua determinação.

Utilizando ainda o modelo NIST foi possível determinar afastamentos seguros (ASD) para os níveis de radiação térmica emitidos pelo incêndio analisado.

- Caso de incêndio em um único tanque: Seria necessário um afastamento de 10 metros para edifícios e 50 metros para pessoas;
- Caso de incêndio no dique sem barreiras térmicas: Neste caso foi averiguada a distância de separação aceitável para pessoas para dois sentidos Norte-Sul (menor comprimento) e Leste-Oeste (maior comprimento). Norte-Sul: 91,86 metros, Oeste: 112,4 metros.

No caso do dique as radiações Norte-Sul o calor irradiado foi de  $21,7664 \text{ kW/m}^2$ , no sentido Leste-Oeste: o calor irradiado foi de  $20,114 \text{ kW/m}^2$ . Essas radiações já são inferiores ao mínimo aceitável para edificações que é de  $31,5 \text{ kW/m}^2$ , então a distância de 16,7 metros já existente nos sentidos Norte-Sul e Leste-Oeste existentes já satisfaz a ASD.

O modelo prevê uma nova sistemática de cálculo caso existam barreiras térmicas ao redor do fogo. O muro ao redor da propriedade é de 5 metros, que foi considerado como

uma barreira térmica para o incêndio no dique. Com isso calculou-se uma nova distância segura considerando a barreira:

- Afastamento Norte-Sul: 75,61 metros
- Afastamento Leste-Oeste: 98,75 metros

Essas novas distâncias calculadas não são aquelas de fato praticadas na área. Então, calculamos a altura que o muro da propriedade (barreira térmica) deveria ter para que o perímetro de afastamento que já existe ao redor da empresa fosse considerado seguro. Esta altura foi de:

- Barreira Térmica Norte-Sul: 14,68 metros;
- Barreira Térmica Leste-Oeste: 13,14 metros.

Não foi considerada a influência dos muros da propriedade no caso do incêndio no tanque, pois a base do fogo no mesmo já se encontra a 7,5m do chão, ou seja, acima do muro de 5m.

Os resultados mostram que mesmo as alturas das chamas não sendo muito diferentes (12,28m para o tanque e 15,36m para o dique) a radiação emitida pelo dique é muito maior devido a sua maior área. Portanto, no caso real, os danos do incêndio seriam causados majoritariamente pelo fogo neste local, caso as bolas de fogo e os incêndios em jato fossem desprezados.

Finalmente o projeto de segurança proposto levou em conta todas as recomendações apresentadas pela Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) e pelo Corpo de Bombeiros. O projeto nos mostra que para qualquer empresa do ramo que armazene combustíveis ou líquidos inflamáveis, as exigências das normas brasileiras não são tecnicamente difíceis de serem atendidas. Basta atender aos afastamentos seguros entre os tanques, e ao redor deles, e instalar um sistema simples de combate a incêndio capaz de mitigar o fogo que possa ocorrer. Os maiores empecilhos parecem ser dispor de vastos terrenos para atender às exigências de afastamento entre tanques e o armazenamento de grandes quantidades água para o sistema de combate a incêndio, caso não exista uma fonte inesgotável de água (rio, mar, etc).

Analisando uma imagem de satélite do terreno da Petrogold pudemos estimar as distâncias de separação que a empresa praticava em seu parque de tancagem (Figura 31). Comparando com o projeto apresentado na Figura 29 no *Capítulo 6* averiguamos que a empresa cumpria as distâncias mínimas exigidas pela ABNT para um parque de tanques de líquidos combustíveis.



**Figura 31 - Afastamentos no Parque de Tanques da Petrogold. Fonte: Adaptado de Imagens ©2013 DigitalGlobe, Dados cartográficos ©2013 Google, MapLink**

Dada as proporções que o incêndio atingiu e os seus efeitos sobre a região percebemos que embora a empresa cumprisse as exigências da lei, tais distâncias não foram suficientes para garantir a segurança da população do entorno. Essa constatação abre espaço para uma reflexão quanto à rigidez da regulamentação brasileira sobre parque de tanques de líquidos inflamáveis e combustíveis e ainda quanto ao planejamento urbano. Certas atividades industriais como o armazenamento e distribuição de combustíveis são muito importantes em uma grande cidade como o Rio de Janeiro, porém oferecem grandes riscos a pessoas e construções ao redor. Talvez seja mais prudente reservar áreas da cidade para estes centros de distribuição que sejam consideravelmente afastadas de bairros residenciais garantindo, desta forma, a continuidade das operações desse setor e a segurança da população.

## 9) Referências

[**ABNT 7505-1, 2003**] ABNT – NBR 7505-1. Armazenagem de líquidos inflamáveis e combustíveis. Parte 1: Armazenagem em tanques estacionários. Dezembro 2003.

[**ABNT 7505-4, 2003**] ABNT – NBR 7505-4. Armazenagem de líquidos inflamáveis e combustíveis. Parte 4: Proteção contra incêndio. Dezembro 2003.

[**ANP, 2009**] ANP Brasil Acessado em 09/08/2013 às 20h15: <http://nxt.anp.gov.br/nxt/gateway.dll/leg/autorizacao/2009/abril/aut%20179%20-%202009.xml>

[**CEETEPS, 2008**] Curso Técnico de Segurança do Trabalho – Disciplina: Prevenção e Combate a Incêndio. Professor Flávio Amorim Gomes de Araújo, Centro Estadual de Educação Tecnológica Paula Souza. Governo do Estado de São Paulo. Versão 2, Janeiro/2008.

[**BARBOSA, 2010**] Barbosa, Guilherme de Aquino. Desenvolvimento de uma ferramenta analítica de dimensionamento de parques de tanques – Caso Refinaria Premium/ Guilherme de Aquino Barbosa. – Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, Agosto 2010.

[**BIZZO, 2003**] Apostila Geração, Distribuição e Utilização de Vapor – Prof. Waldir A. Bizzo. UNICAMP, 2003.

[**BOMBEIROS SP, 2004**] INSTRUÇÃO TÉCNICA Nº 27/2004 – Corpo de Bombeiros do Estado de São Paulo – Armazenagem de Líquidos Inflamáveis e Combustíveis.

[**BR Distribuidora - FISQP, 2012**] Ficha de Informação de Segurança de Produto Químico - FISQP – Gasolina Comum; Álcool Etilico Combustível. Petrobrás Distribuidora S.A. Setembro 2012.

[**BROWN, LEMAY & BURSTEN 9ªEd.**] Livro Química – A Ciência Central – Brown/Lemay/Bursten. Editora: Pearson Education - Br 9ª Edição.

[**CAMACHO, 2013**] Carlos Camacho, Graduado e Mestre em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Itajubá, MG. <http://www.camacho.eng.br/RElet.htm>. Julho 2013.

[**ÇENGEL & CHAJAR, 2012**] Livro Transferência de Calor e de Massa, uma Abordagem Prática. – Yunus A. Çengel & Afshin J. Chajar. Editora McGraw Hill Brasil. 4ª Edição, 2012.

[**CETESB, 2003**] Norma Técnica CETESB – P4.261 - Manual de Orientação para a Elaboração de Estudos de Análise de Riscos. 2003.

[**CROWL e LOUVAR, 2002**] CROWL, Daniel A; LOUVAR, Joseph F. *Chemical Process Safety* (Segurança de Processos Químicos). New Jersey, 2002, 2º edição, 650p.

[**DNV, 2006**] APOSTILA DO CURSO SOBRE ESTUDO DE ANÁLISE DE RISCOS E PROGRAMA DE GERENCIAMENTO DE RISCOS - Módulo 5: Modelos de Avaliação de Conseqüência de Acidentes (vazamentos, incêndios, explosões, contaminação ambiental). Det Norske Veritas. 6 de Novembro de 2006.

[**HELRRIGHEL, 2009**] Paulo Rogers Helrighel. Proteção Passiva contra Fogo dentro de uma Unidade de Destilação Atmosférica e à Vácuo. Fevereiro 2010.

[**INCROPERA, DeWITT, BERGMAN & LAVINE, 2007**] Livro Fundamentos de Transferência de Calor e de Massa - Incropera / DeWitt / Bergman / Lavine. Sexta Edição, 2007. Editora Gen, LTC.

[**JOSÉ, 2004**] Apostila Combustão e Combustíveis, Prof. Humberto Jorge José. Agosto 2004.

[**MARTINELLI Jr, 2008**] Apostila: Máquinas Térmicas I, Princípios da Combustão, Luiz Carlos Martinelli Jr. – Unijui. 2008

[**McGRATTAN, BAUM & HAMINS, 2000**] *Thermal Radiation from Large Pool Fires*. Kevin B. McGrattan. Howard R. Baum. Anthony Hamins. *Fire Safety Engineering Division. Building and Fire Research Laboratory. National Institute of Standards and Technology* - NIST. Novembro 2000.

[**MELLO, 2013**] <http://www.segurado.com.br/bloggustavo/?p=498> , O Incêndio na Petrogold – Duque de Caxias (RJ). Publicado em 25 de maio de 2013 - 22:53h. Gustavo Cunha Mello (Economista com MBA em Gerenciamento de Riscos pela COPPE-UFRJ, Pós Graduação em Engenharia de Planejamento e Mestrado em Engenharia de Produção pela UFF-RJ).

[**MORISHITA, 2004**] Livro Princípios Fundamentais de Transferência de Calor – Hélio Morishita. Agosto 2004.

[**Pablo Jacob/ Agência O GLOBO**] <http://oglobo.globo.com/rio/o-rescaldo-do-incendio-em-duque-de-caxias-8487670>. 24 de Maio 2013.

[**Revista Geográfica da América Central, 2011**] Revista Geográfica de América Central, Número Especial EGAL, 2011- Costa Rica

[**SESI BA, 2008**] Legislação comentada: NR 20 - Líquidos Combustíveis e Inflamáveis/ Serviço Social da Indústria - SESI. Departamento Regional da Bahia. Salvador, 2008.

[**SIQUEIRA, 2010**] Prof. MSc. Robério Alves Siqueira, Curso: ENGENHARIA DE PETRÓLEO E GÁS, Ano: 2010. Centro Universitário Jorge Amado. Disponível

em <http://xa.yimg.com/kq/groups/24400912/1315070801/name/AULA2+-TANQUES.ppt>

[Site **CIMI, 2013**] CIMI, Sistema Contra Incêndio. Acessado 11 de Junho de 2013, às 9h06. <http://www.cimi.com.br/Site/conceitos/Combustao.htm>

[Site **MASHI, 2013**] MASHI, Acessado 11 de Junho de 2013, às 10h06Acessado dia Técnicas Ambientais [http://www.mashi.com.br/boletins\\_ant\\_016.htm](http://www.mashi.com.br/boletins_ant_016.htm)

[**TAKASHI, KOSEKI & HIRANO 1999**] N. Takahashi, H. Koseki, e T. Hirano. *Temporal and Spatial Characteristics of Radiation from Large Pool Fires. Bulletin of Japanese Association of Fire Science and Engineering*, 49(1):27–33, 1999.

[**VAZ Jr., 2012**] Carlos André Vaz Júnior, D.Sc. Notas de Aula: Segurança de Processos e Prevenção de Perdas – UFRJ Escola de Química.

## Anexos

### ○ Anexo I

#### **“AUTORIZAÇÃO ANP Nº 179, DE 6.4.2009 – DOU 7.4.2009**

O SUPERINTENDENTE DE ABASTECIMENTO da AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS – ANP, no uso das atribuições que foram conferidas pela Portaria ANP nº 92, de 26 de maio de 2004 e considerando as disposições da Portaria ANP nº 29, de 9 de fevereiro de 1999, e o que consta do Processo nº 48610.011012/2000-16, torna público o seguinte ato:

Art. 1º Fica a PETROGOLD DISTRIBUIDORA DE DERIVADOS DE PETRÓLEO LTDA., CNPJ nº 02.909.866/0001-45, registrada na ANP como distribuidora de combustíveis líquidos derivados de petróleo, álcool combustível, biodiesel, mistura óleo diesel/biodiesel sob o número nº 3024, autorizada a operar as instalações localizadas na Rua Emílio Gomes, nº 1070, Quadra 42 – Vila Maria Helena, Campos Elysios – Município de Duque de Caxias – RJ.

A Base de Distribuição em tela, com capacidade de 2.048m<sup>3</sup>, cuja autorização para operação está sendo solicitada, é constituída pelos tanques verticais apresentados na tabela abaixo.

<b>Tanque nº</b>	<b>Diâmetro (m)</b>	<b>Altura (m)</b>	<b>Volume (m<sup>3</sup>)</b>	<b>Produto</b>
01	9,32	7,45	508	GASOLINA
02	9,32	7,45	508	GASOLINA
03	7,64	7,50	344	AEAC
04	7,64	7,50	344	AEHC
05	7,64	7,50	344	DÍESEL

Art. 2º O objeto da presente Autorização deve ser executado em conformidade com as normas técnicas pertinentes.

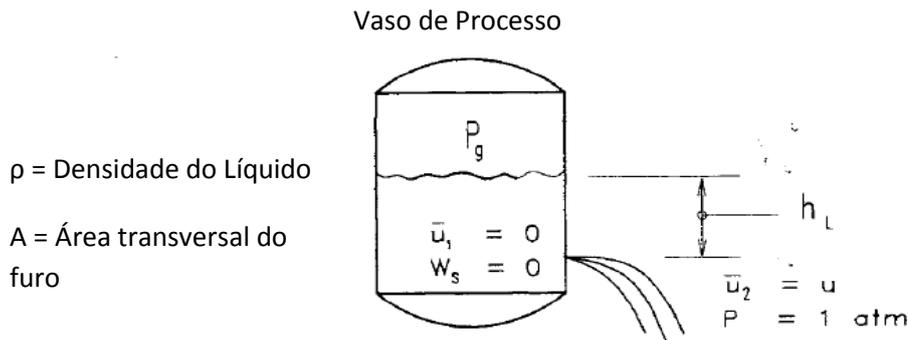
Art. 3º Fica revogada a Autorização ANP nº 76, de 31 de março de 2006, publicada no DOU de 3 de abril de 2006.

Art. 4º Esta Autorização entra em vigor na data de sua publicação.

EDSON MENEZES DA SILVA”

○ **Anexo II – Vazamento do líquido do tanque e geração da poça no solo.**

Os modelos de fonte são fundamentados em equações que, a partir das propriedades da substância e das características do escoamento, descrevem a velocidade e a taxa de liberação do líquido. Determinando o tipo de material inflamável e levando em consideração as dimensões do tanque que explodiu da Petrogold, obtivemos o diâmetro da poça desejado para o estudo.



**Figura 32 - Representação de um furo em um tanque com líquido vazando. Fonte: Adaptado de Crowl e Louvar, 2002.**

A figura ilustra um furo situado em uma altura  $h$  abaixo da altura do líquido no tanque cuja pressão manométrica é  $P_g$ . A pressão interna do tanque mantém-se constante ao longo do escoamento, pois o tanque é equalizado com a atmosfera ou constantemente inertizado. Baseando-se nas notas de aula do Prof. Carlos André Vaz Jr e no artigo *Thermal Radiation* (NISTIR 6546), fizemos os seguintes cálculos:

O balanço de Energia Mecânica associado ao escoamento nos fornece a seguinte equação:

$$\int \frac{dP}{\rho} + \Delta \left( \frac{u^2}{2\alpha g_c} \right) + \frac{g}{g_c} \Delta z + F = - \frac{W_s}{\dot{m}}$$

**Equação 13**

Onde:

$P$  = Pressão

$\rho$  = Densidade do fluido

$u$  = Velocidade instantânea média do fluido

$\alpha$  = Fator de correção relacionado ao perfil da velocidade

$g$  = Aceleração da gravidade

$g_c$  = constante gravitacional =  $1 \text{ kg.m.N/s}^2$

$z$  = Altura acima da referência

$F$  = Termo de perda por atrito

$W_s$  = Trabalho de eixo

$\dot{m}$  = Taxa mássica

$\alpha$  = Fator de correção para perfil de velocidade  $\begin{cases} = 0,5 \text{ (escoamento Laminar)} \\ = 1 \text{ (escoamento empistonado)} \\ \rightarrow 1 \text{ (escoamento turbulento)} \end{cases}$

Considerando que o fluido seja incompressível,  $\rho$  é constante, e que a pressão no interior do taque pode ser considerada constante, pode usar a Equação 14.

$$\int \frac{dP}{\rho} = \frac{\Delta P}{\rho} = \frac{P_g}{\rho}$$

**Equação 14**

O fator de perda por atrito,  $F$ , é o resultado do somatório do atrito do fluido escoando através do comprimento do duto e de cada conexão/acidente ao logo dele (válvulas, orifícios, juntas, etc).

$$F = K_f \cdot \left( \frac{u^2}{2 \cdot g_c} \right)$$

**Equação 15**

Para líquidos escoando através de dutos,

$$K_f = \frac{4 \cdot f \cdot l}{d}$$

**Equação 16**

$f$  = fator de Fanning;

$l$  = comprimento do duto;

$d$  = diâmetro do duto

Fazendo a consideração de que vazamento acontece através de um furo pequeno, quando o fluido escapa para a energia se transforma em energia cinética (velocidade do fluido) e energia térmica devido ao atrito entre o líquido e a borda do furo.

Como não há trabalho de eixo, chega-se na Equação 17.

$$\Delta \left( \frac{u^2}{2\alpha} \right) = -\frac{\Delta P}{\rho} - g\Delta z - F$$

**Equação 17**

Aproximando o atrito por uma constante adimensional,  $C_1$ , e definido uma nova constante  $C_0 = \sqrt{\Delta\alpha C_1}$  se tem a Equação 19 a partir da Equação 18.

$$-\frac{\Delta P}{\rho} - g\Delta z - F = C_1^2 \left( -\frac{\Delta P}{\rho} - g\Delta z \right)$$

**Equação 18**

$$u = C_0 \sqrt{2 \left( \frac{P_g}{\rho} + gh_L \right)}$$

**Equação 19**

A vazão mássica instantânea,  $Q_m$ , resultante do vazamento através de um furo de área  $A$  é dada pela Equação 20.

$$Q_m = \rho u A = \rho u C_0 \sqrt{2 \left( \frac{P_g}{\rho} + gh_L \right)}$$

**Equação 20**

Essa equação é função da altura do líquido no tanque e da área do orifício. Enquanto o tanque esvazia a altura diminui, assim como velocidade e a vazão. Para um tanque com seção transversal constante,  $A_t$ , a massa de líquido acima do furo é dada pela Equação 21 e a vazão é representada pela Equação 22

$$m = \rho A_t h_L$$

**Equação 21**

$$\frac{dm}{dt} = -Q_m$$

**Equação 22**

Substituindo a Equação 21 e a Equação 22 na Equação 20 chega-se a equação diferencial que representa a variação da altura do líquido com o tempo (Equação 23).

$$\frac{dh_L}{dt} = -\frac{C_0 A}{A_t} \sqrt{2 \left( \frac{P_g}{\rho} + gh_L \right)}$$

**Equação 23**

Integrando a equação de  $h_L^0$  até um  $h_L$  qualquer e isolando  $h_L$  chega-se a Equação 24.

$$Q_m = \rho C_0 A \sqrt{2 \left( \frac{P_g}{\rho} + gh_L^0 \right) - \frac{\rho g C_0^2 A^2}{A_t}} t$$

**Equação 24**

O valor do coeficiente de atrito,  $C_0$ , depende do tipo de furo. Para furos onde a perda de carga é maior devido ao maior atrito, usa-se  $C_0 = 0,61$ . Já para orifícios sem arestas ou quando deseja-se ser mais conservador, é usado  $C_0 = 1$

Base de dados para os cálculos:

**Tabela 22 - Base de cálculo. Fonte: Exxon**

	<b>Volume (m<sup>3</sup>)</b>	<b>Diâmetro Interno (m)</b>
<b>Tanque</b>	508	0,05
<b>Mangueira</b>	20	9,32

Dados da Gasolina: Ver Tabela 1 e Tabela 3

Densidade: 730 kg/m<sup>3</sup> a 20°C

Pressão de Vapor: 55 kPa a 37,8°C

Área do furo do Tanque (Conexão da mangueira ao tanque):

$$A = \pi D^2 / 4$$

**Equação 25**

$$A = 3,14 \cdot 0,05^2 / 4 = 0,0019625 \text{ m}^2$$

Vazão de Saída do Furo:

$$Q = AC_0 \sqrt{2\rho g_c(P - P_{sat})}$$

**Equação 26**

$$Q = 0,0019625 * 0,61 * \sqrt{2 * 730 * 1 * (1,4 * 10^6 - 55000)}$$
$$Q = 54,016 \text{ kg/s}$$

P [N/m<sup>2</sup>]

$\rho$  [kg/m<sup>3</sup>]

A [m<sup>2</sup>]

C<sub>0</sub> = 0,61 (constante)

Cálculo do diâmetro da Poça:

$$D = 10\sqrt{V}$$

**Equação 27**

$\rho$  [kg/m<sup>3</sup>]

$$V(\text{m}^3) = Q \times \text{tempo} / \text{densidade} = 54,016 \times 3 / 730 = 0,22198 \text{ m}^3$$

Tempo : 3 seg (Tempo de vazamento do tanque)

$$D (\text{m}) = 10 \times (0,22198)^{(1/2)} = 4,7 \text{ m}$$

**Obtivemos então o diâmetro da poça de 4,7 metros.**

○ Anexo III

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

Anexo III - Fatores de visão de um Cilindro para um Elemento Recebendo Radiação Máxima. Note que H é a altura do cilindro, D é o seu diâmetro e S é a distância entre a borda do fogo e o ponto em análise. O ponto em análise está ao mesmo nível da base

○ Anexo IV

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	0.001	0.002	0.002	0.004	0.006	0.008	0.010	0.012	0.014	0.015	0.017	0.019
5.0	0.000	0.000	0.000	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.003	0.004	0.005	0.006	0.008	0.009	0.010	0.011	0.012
6.0	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.002	0.003	0.004	0.004	0.005	0.006	0.007	0.008	0.009
7.0	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001	0.001	0.001	0.001	0.002	0.003	0.003	0.004	0.005	0.005	0.006	0.006
8.0	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001	0.001	0.002	0.002	0.003	0.003	0.004	0.004	0.005
9.0	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001	0.001	0.002	0.002	0.002	0.003	0.003	0.004	0.004
10.0	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001	0.001	0.001	0.002	0.002	0.002	0.003	0.003	0.003

Anexo IV - Fatores de visão de uma Placa Vertical Plana para um Elemento Recebendo Radiação Máxima. Note que H é a altura da Placa, W é o comprimento da placa e S é a distância entre o centro da borda do fogo e o ponto em análise. O ponto em análise

○ Anexo V – Fotos do Acidente.

Fonte: Agência O GLOBO, 24 de Maio 2013.

<http://oglobo.globo.com/rio/o-rescaldo-do-incendio-em-duque-de-caxias-8487670>

