

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL**

Anderson José Hauser

**SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL DE INCÊNDIO EM
TANQUE CONTENDO ÓLEO COMBUSTÍVEL: AVALIAÇÃO
EM TANQUES ISOLADOS CONFORME NBR 17505-7**

Porto Alegre
julho 2016

ANDERSON JOSE HAUSER

**SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL DE INCÊNDIO EM
TANQUE CONTENDO ÓLEO COMBUSTIVEL: AVALIAÇÃO
EM TANQUES ISOLADOS CONFORME NBR 17505-7**

Trabalho de Diplomação apresentado ao Departamento de
Engenharia Civil da Escola de Engenharia da Universidade Federal
do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do
título de Engenheiro Civil

Orientador: Jean Marie Désir

Porto Alegre

julho 2016

ANDERSON JOSÉ HAUSER

**SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL DE INCÊNDIO EM
TANQUE CONTENDO ÓLEO COMBUSTÍVEL: AVALIAÇÃO
EM TANQUES ISOLADOS CONFORME A NBR 17505-7**

Este Trabalho de Diplomação foi julgado adequado como pré-requisito para a obtenção do título de ENGENHEIRO CIVIL e aprovado em sua forma final pelo Professor Orientador e pela Coordenadora da disciplina Trabalho de Conclusão de Curso II - Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Porto Alegre, jul. de 2016

Jean Marie Désir
Dr pela Universidade Federal do Rio de Janeiro
Orientador

Luciani Somensi Lorenzi
Dra. pela Universidade do Rio Grande do Sul
Coordenadora

BANCA EXAMINADORA

Prof. Jean Marie Désir
(UFRGS)
Dr. pela Universidade Federal do Rio de Janeiro

Profa. Luciani Somensi Lorenzi
(UFRGS)
Dra. pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Juliane Natalia Dolvitsch
(UFRGS)
Eng. Civil pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Jacinto Manuel Antunes de Almeida
(UFRGS)
Mestre pela Universidade de Coimbra / PT
(FCTUC)

Dedico este trabalho a meus pais e noiva, que sempre me apoiaram e especialmente durante o período do meu Curso de Graduação estiveram ao meu lado.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, pela fé e perseverança em não desanimar diante das dificuldades encontradas.

Agradeço ao Prof. Jean Marie Désir, orientador deste trabalho, pela orientação, sugestões e críticas de melhoria para a realização deste estudo.

Agradeço à Eng. Civil Juliane Natalia Dolvitsch por ministrar o curso de manuseio do programa PyroSim, no qual fui aluno, e por prestar consultoria de forma gratuita para sanar todas as dúvidas pertinentes ao uso do programa que surgiram durante a execução deste trabalho.

À *Thunderhead Engineering* pelo fornecimento das licenças educacionais do Pyrosim.

Agradeço a REFAP, por permitir o acesso aos tanques que armazenam gasolina e, deste modo, viabilizar a caracterização do cenário para as simulações.

Agradeço a minha noiva e futura esposa, Aline, pela compreensão de não estar participando tão efetivamente das questões de organização do casamento que há de se realizar em setembro de 2016.

Agradeço as minhas irmãs, Tânia e Gisele, por sempre terem me apoiado e encorajado nesta jornada de estudos.

Agradeço ao cunhado e Mestre Sérgio Luiz Telles Bartex, pelas discussões de transferência de calor e massa realizadas de maneira informal.

Agradeço a família de forma em geral, pela compreensão pelas ausências em algumas confraternizações em função de trabalho e estudo.

Por último, mas nunca menos importante, agradeço aos meus pais, Neli e João, pela importância que dão para educação, segundo eles: a educação é a maior herança que os pais podem deixar para os filhos. Eles, mesmo sem terem grandes condições, sempre me apoiaram no que diz respeito ao estudo, principalmente durante a minha primeira graduação de Química Industrial.

Apreende que não importa aonde já chegou, mas para onde está indo... mas, se você não sabe para onde está indo, qualquer caminho serve.

William Shakespeare

RESUMO

Este trabalho versa sobre a condição a que se está exposto um tanque adjacente mediante um incêndio em uma área de tancagem, nas condições em que possivelmente estariam sujeitos em uma área industrial. Pensar em prevenção contra incêndio é sinônimo de economia. Os incêndios, embora muitas vezes com baixa probabilidade de ocorrer, mas muitas vezes, com grande potencial de dano e prejuízo, seja material ou pessoal, deve ser encarado como uma possibilidade iminente, mesmo que não desejada. A segurança está em implementar dispositivos definitivos que visam atenuar ou até mesmo evitar que incêndios ocorram ou implementar dispositivos paliativos, na expectativa de que um cenário não atinja proporção catastrófica, e para isso, os incêndios não precisam fazer parte de nossa história. Com o avanço da tecnologia e das ferramentas computacionais, é possível realizar simulações para as situações mais críticas de um incêndio, mesmo sem ter ocorrido o incidente propriamente dito, e prever com antecedência os dispositivos necessários para manter a segurança conforme os possíveis cenários de emergência. O armazenamento de óleos combustíveis, em caso de incêndio, possui grande impacto financeiro, ambiental, social e de risco pessoal, portanto a prevenção é fundamental. As simulações deste trabalho foram realizadas com uso do programa FDS e PyroSim em um computador com características de uso pessoal, ou seja, não necessitando de supercomputador para viabilizar o estudo. No presente trabalho foram realizadas simulações computacionais para quatro situações e avaliada a condição a que o tanque adjacente está submetido. Para isto, foram observadas as elevações das temperaturas atingidas durante o incêndio e feitas considerações quanto ao tipo de produto armazenado de acordo com as propriedades físico-químicas do líquido.

Palavras-chave: NBR 15707. Incêndio. Tanque. Simulação. Computacional. FDS. PyroSim. Armazenamento de Líquidos Inflamáveis e Combustíveis.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Esquema das etapas.....	17
Figura 2 – Tanque e acessórios - terminologia.....	20
Figura 3 – Características térmicas de incêndios para líquidos, sólidos e auto-oxidantes	26
Figura 4 – Influência do mecanismo de transmissão.....	28
Figura 5 – Identificação de pontos de fulgor, combustão e auto-ignição para líquidos....	31
Figura 6 – Condições atmosféricas adotadas nas simulações realizadas no PyroSim	41
Figura 7 – Temperaturas atingidas na simulação de incêndio do tanque de 7,5 metros de diâmetro	45
Figura 8 – Temperatura em escala colorimétrica obtida durante a simulação do tanque de 7,5 metros de diâmetro	46
Figura 9 – Temperaturas atingidas para a simulação de incêndio do tanque de 7,5 metros de diâmetro, sem os termopares de parede	47
Figura 10 – Temperaturas atingidas para a simulação de incêndio do tanque de 7,5 metros de diâmetro, a um metro de altura	48
Figura 11 – Temperaturas durante a simulação de incêndio no tanque de 7,5 metros de diâmetro, a um metro de altura – removido pico em 43,4s de 0,25 D para melhor visualização dos patamares	49
Figura 12 – Ilustração do momento em que ocorre o aumento repentino da temperatura no ponto 0,25D. Ao lado a tabela, em excel, que indica o exato momento do máximo de temperatura atingida.....	50
Figura 13 – Primeira tentativa para simulação de incêndio em tanque de 20 metros de diâmetro – tentativa com forma geométrica convencional.....	51
Figura 14 – Recurso utilizado para viabilizar a simulação de incêndio em tanque de 20 metros de diâmetro - <i>Vent/mirror</i>	52
Figura 15 – Temperaturas atingidas nos termopares para a simulação de incêndio do tanque de 20 metros de diâmetro.....	53
Figura 16 – Imagem ilustrativa da disposição dos tanques e da parede.....	54
Figura 17 – Temperaturas atingidas nos termopares para a simulação de incêndio do tanque de 20 metros de diâmetro – com parede em 7,5 metros	54
Figura 18 – Comparativo das temperaturas para o tanque de 20 metros de diâmetros com e sem parede intermediária, na distância de 15 metros.....	57
Figura 19 – Evolução das temperaturas atingidas nas distâncias para os tanques isolados.....	59

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Configuração do computador utilizado nas simulações.....	40
Quadro 2 – Quadro representativo das quatro simulações realizadas e suas respectivas distâncias para tanque isolado.....	44
Quadro 3 – Quadro comparativo dos perfis de temperaturas para as simulações dos tanques com 7,5 metros de diâmetro	50
Quadro 4 – Temperaturas atingidas nos termopares para as simulações de incêndio do tanque de 20 metros de diâmetro.....	56
Quadro 5 – Comparativo das temperaturas atingidas para os casos simulados.....	58

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Características físico-químicas da gasolina.....	32
Tabela 2 – Mistura explosiva de alguns gases e líquidos.....	33
Tabela 3 – Taxa de liberação de calor por área de alguns líquidos e gases.....	42

LISTA DE SIGLAS

LIE – Limite Inferior de Explosividade

LSE – Limite Superior de Explosividade

NBR – Norma Brasileira

NR – Norma Regulamentadora

PAE – Plano de Atendimento à Emergência

PAM – Plano de Auxílio Mútuo

PIE – Ponto Inicial de Ebulição

PFE – Ponto Final de Ebulição

UFRGS – Universidade Federal do Rio Grande do Sul

LISTA DE SÍMBOLOS

e – espessura (mm)

m – metros

s – segundos

D – diâmetro nominal do tanque, entendendo-se como tal o diâmetro medido na linha de centro das chapas do costado quando todas as chapas tiverem uma linha de centro comum, ou o diâmetro interno do tanque quando as chapas tiverem a face interna comum (m)

H – distância entre a linha do centro da junta inferior do anel considerado à cantoneira de reforço da borda superior do costado, ou à parte inferior de qualquer ladrão que limite o enchimento do tanque, em metros (m)

G – densidade do líquido a ser estocado

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	13
2 DIRETRIZES DA PESQUISA	15
2.1 QUESTÃO DE PESQUISA	15
2.2 OBJETIVOS DA PESQUISA.....	15
2.2.1 Objetivo principal	15
2.2.2 Objetivo secundário	15
2.3 PRESSUPOSTO.....	16
2.4 PREMISA.....	16
2.5 DELIMITAÇÕES.....	16
2.6 LIMITAÇÕES.....	16
2.7 DELINEAMENTO.....	17
3 DESENVOLVIMENTO DO PROJETO	19
3.1 DISPOSIÇÃO DO CENÁRIO DE TANQUES.....	19
3.2 CARACTERISTICAS DOS MATERIAIS.....	25
3.3 CARACTERISTICAS DO PRODUTO.....	29
3.4 CARACTERISTICAS DO FOGO.....	34
3.4.1 Boilover	36
3.4.2 BLEVE – Boiling Liquid Expanding Vapor Explosion	37
3.4.3 Fireball	37
3.5 SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL.....	37
4 MATERIAIS E MÉTODOS	40
5 COLETA DE DADOS E ANÁLISE	45
5.1 DIÂMETRO 7,5 METROS - INCÊNDIO EM TANQUE INTEGRO.....	45
5.2 DIÂMETRO 7,5 METROS - INCÊNDIO EM TANQUE A UM METRO.....	48
5.3. DIÂMETRO 7,5 METROS - ANÁLISE E CONSIDERAÇÕES.....	50
5.4 DIÂMETRO 20 METROS - INCÊNDIO EM TANQUE INTEGRO.....	51
5.5 DIÂMETRO 20 METROS - INCÊNDIO COM PAREDE INTERMEDIÁRIA.....	53
5.6. DIÂMETRO 20 METROS - ANÁLISE E CONSIDERAÇÕES.....	55
6 CONSIDERAÇÕES FINAIS E CONCLUSÕES	58
6.1 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	58
6.2. CONCLUSÕES.....	60
REFERÊNCIAS.....	62

1 INTRODUÇÃO

O fogo sempre foi objeto de domínio e fascinação. Sua aplicabilidade é bastante versátil e é utilizado em vários campos de desenvolvimento, como é o caso de fundição do aço, fabricação de cimento, refino de petróleo e transporte de veículos através da combustão. Porém, o descontrole durante o uso, seja por falha ou falta de segurança, pode e certamente conduzirá a sinistros, que acarretaram em perdas econômicas e possivelmente perdas humanas.

Os incêndios, de forma geral, quando estudados, promovem grandes avanços principalmente em nível de legislação, impondo maiores critérios de segurança. Segundo Carlo (2008, p. 11):

Todos os países têm aprendido com os grandes incêndios, com o Brasil não foi diferente. A urbanização alucinante de São Paulo provocou um aumento brutal do risco de incêndios na cidade, que culminou com os incêndios dos edifícios Andraus e Joelma, com um grande número de vítimas humanas, não apenas as que morreram, mas com todas as pessoas envolvidas diretamente nesses incêndios que tiveram suas vidas afetadas, causando mudanças comportamentais e traumas psicológicos pós-incêndio. Indiretamente, toda a população brasileira foi afetada, pois a televisão apresentou ao vivo essas tragédias.

Seguiram-se outras tragédias com vítimas na cidade do Rio de Janeiro, de Porto Alegre, entre outras.

Essas tragédias provocaram mudanças na legislação, nas corporações de bombeiros, nos institutos de pesquisa e, principalmente, foi iniciado um processo de formação de técnicos e pesquisadores preocupados com essa área de conhecimento.

Em janeiro de 2013, o incêndio ocorrido na Boate Kiss, em Santa Maria, deixou 242 mortes e mais de 630 feridos (APÓS..., 2015). Diante a este cenário foi aprovado o Decreto n. 51.803, que “Regulamenta a Lei Complementar n. 14.376, de 26 de dezembro de 2013, e alterações, que estabelece normas sobre segurança, prevenção e proteção contra incêndio nas edificações e áreas de risco de incêndio no estado do Rio Grande do Sul.”. (RIO GRANDE DO SUL, 2014).

Em abril de 2015, o incêndio no Porto de Santos, em São Paulo, vindo a incendiar seis tanques de óleos combustíveis ao longo dos dias dois a dez de abril, não resultou em fatalidades humanas. No entanto, o impacto ambiental foi de alto grau. Nos dias que se

sucederam, cerca de sete toneladas de peixes, foram retirados do rio Casqueiro, em Cubatão (SP). (SETE..., 2015).

Conforme observado, as exigências de segurança são impostas posteriormente aos eventos de grande impacto. Porém, com o avanço da tecnologia e das ferramentas computacionais, é possível realizar simulações para as situações mais críticas, sem ter ocorrido o incidente propriamente dito, e prever com antecedência os dispositivos necessários para manter a segurança conforme os possíveis cenários de emergência.

Com base no exposto acima, este trabalho busca estudar, por meio de simulação computacional, um sinistro em tanque contendo óleo combustível e avaliar o efeito da temperatura que este provoca em tanques adjacentes considerados isolados conforme a NBR 17505-7: Armazenamento de Líquidos Inflamáveis e Combustíveis (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2015).

2 DIRETRIZES DA PESQUISA

As diretrizes para desenvolvimento do trabalho são descritas nos próximos itens.

2.1 QUESTÃO DE PESQUISA

Os tanques considerados isolados pela NBR 17505-7: Armazenamento de Líquidos Inflamáveis e Combustíveis (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2015) não estão sujeitos a temperaturas provenientes de um tanque adjacente em chamas a ponto de apresentar riscos à segurança?

2.2 OBJETIVOS DA PESQUISA

Os objetivos da pesquisa estão classificados em principal e secundário e são descritos a seguir.

2.2.1 Objetivo principal

O objetivo principal do trabalho é: avaliar através de simulação computacional a influência, que um tanque em chamas, tem sobre outro tanque adjacente considerado isolado pela NBR 17505-7: Armazenamento de Líquidos Inflamáveis e Combustíveis (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2015).

2.2.2 Objetivo secundário

O objetivo secundário do trabalho é a obtenção, através de simulação computacional, dos patamares de temperatura atingidos na parede de um tanque adjacente considerado isolado quando o incêndio encontra-se já desenvolvido.

2.3 PRESSUPOSTO

O trabalho tem por pressuposto que são válidas as recomendações da NBR 7821:1983– Tanques Soldados para Armazenamento de Petróleo e Derivados, relativas ao dimensionamento de tanques verticais. Também são admitidas válidas as considerações da NBR 17505-7:2015 – Armazenamento de Líquidos Inflamáveis e Combustíveis.

2.4 PREMISSA

O trabalho tem por premissa de que, a determinação das condições em que um conjunto de tanques estão expostos em uma situação de incêndio, reforçará o entendimento da importância do emprego de sistemas de segurança necessários para manter a integridade dos bens materiais e minimizar os riscos aos usuários.

2.5 DELIMITAÇÕES

O trabalho delimita-se ao estudo de incêndio em óleo combustível contido em tanque terrestre vertical sob pressão atmosférica usualmente empregado em área industrial.

2.6 LIMITAÇÕES

São limitações do trabalho:

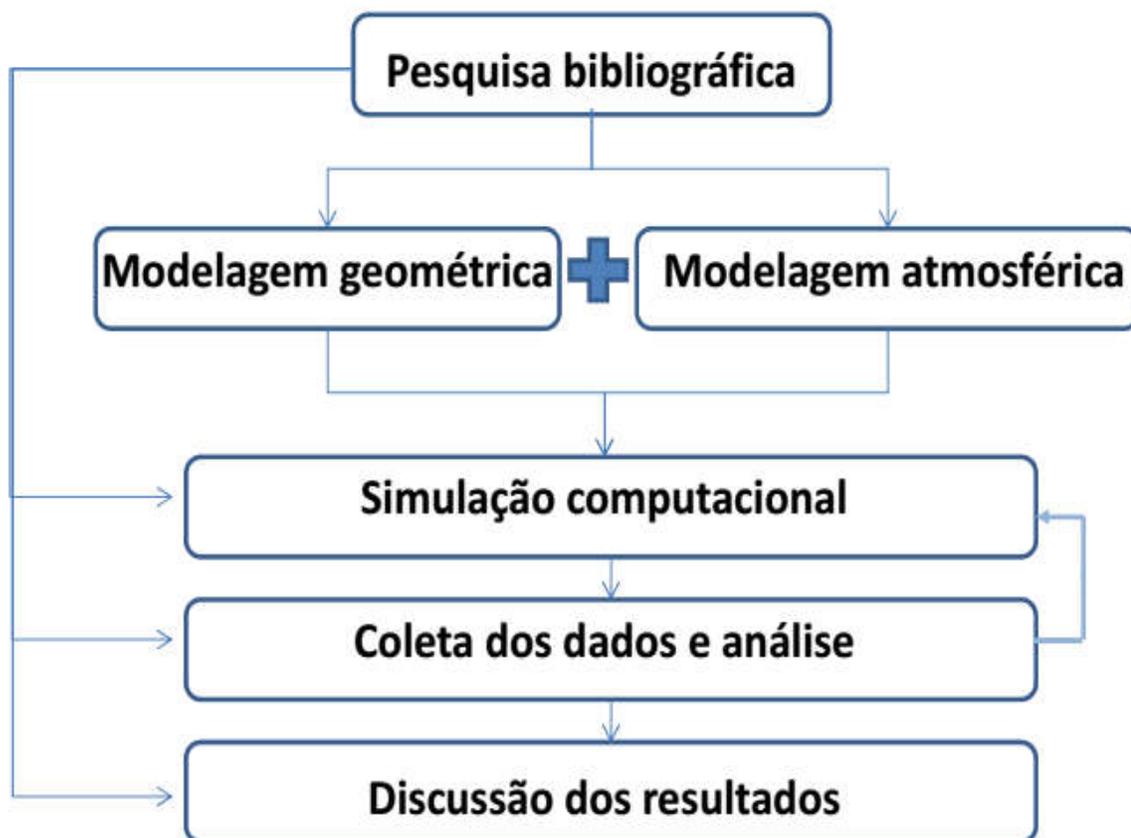
- a) os dados foram obtidos apenas por simulação computacional;
- b) o conteúdo do tanque simulado no incêndio foi única e exclusivamente gasolina, esta apresentando os padrões de produto especificado;
- c) os parâmetros atmosféricos foram considerados constantes;
- d) as simulações de incêndio foram sem a presença do teto do tanque, ou seja, considerando um incêndio já desenvolvido.

2.7 DELINEAMENTO

O trabalho foi realizado através das etapas apresentadas a seguir, que estão representadas na figura 1, e são descritas nos próximos parágrafos:

- a) pesquisa bibliográfica;
- b) modelagem atmosférica e geométrica do tanque;
- c) simulação computacional de incêndio;
- d) coleta dos dados e análise;
- e) discussão dos resultados.

Figura 1– Esquema das etapas



(fonte: elaborado pelo autor)

A primeira etapa consiste na pesquisa bibliográfica, quando foram feitas consultas a normas, livros, artigos, trabalhos acadêmicos e demais materiais a respeito de incêndios em tanques. Esta etapa está conectada a todas outras, pois se torna base para nortear as demais fases do trabalho.

A segunda etapa, que diz respeito à modelagem geométrica, se detém às dimensões propriamente ditas do tanque a ser utilizado na simulação de incêndio. Admite-se que o tanque está dimensionado conforme a NBR 7821:1983 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1983) para o tipo de óleo combustível previamente determinado.

A fase de modelagem atmosférica é atribuída às condições climáticas nas quais serão realizadas as simulações de incêndio. Para a simulação, as condições de vento foram consideradas nulas e para o valor de umidade do ar foi estipulado um valor constante ao longo de toda simulação, foi empregado situações de tempo seco, ou seja, sem ocorrência de chuva. De forma geral, foram adotadas as condições padrões do programa PyroSim.

A simulação computacional, especificada como terceira etapa foi realizada mediante utilização do *software* PyroSim. Para a realização desta etapa, o tipo de produto contido no tanque bem como os parâmetros das fases de geometria e condição atmosférica estavam previamente determinados.

A coleta dos dados e análise foi feita observando a evolução da temperatura ao longo da simulação. O *software* é capaz de apontar a temperatura atingida em diversos pontos do tanque e também em tanques adjacentes distantes conforme caracterizados na NBR 17505-7: Armazenamento de Líquidos Inflamáveis e Combustíveis (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2015). Esta etapa possui caráter iterativo, podendo retornar ao fim da mesma para a fase anterior, até se considerar satisfatório a verificação de como o incêndio em um tanque contendo óleo combustível se desenvolve.

Por fim, a última etapa ocorreu através da discussão dos resultados e determinação das temperaturas atingidas nos patamares considerados constantes para o incêndio desenvolvido. Foi realizada a discussão dos resultados quanto aos fatores de segurança focando o tanque adjacente, que é considerado isolado. A falta ou falha de segurança pode acarretar em incêndios nos tanques próximos.

3 DESENVOLVIMENTO DO PROJETO

3.1 DISPOSIÇÃO DO CENÁRIO DE TANQUES

Os tanques, de modo geral, são peça fundamental na logística de produtos existentes em áreas industriais. O tipo de tanque frequentemente empregado é o terrestre (ou aéreo) vertical, assim chamado pelo fato de estar posicionado no nível do solo e cujo eixo da circunferência formada pelas paredes do tanque cilíndrico é perpendicular à linha terrestre.

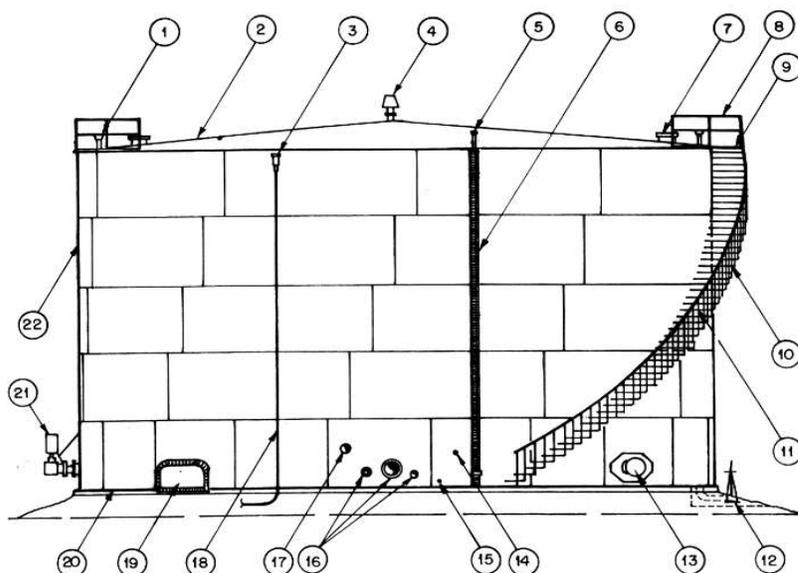
Os tanques podem armazenar produtos que serão processados, ou seja, servirão de matéria prima, assim como podem conter produtos processados, ou seja, especificados para venda, ou ainda, produtos intermediários, quando se necessitam realizar manobras de mistura para atingir a especificação requerida ou que ainda devem passar por algum tipo de tratamento secundário para atingir a devida especificação.

Sabe-se que a alta capacidade de armazenamento industrial proporciona conforto nos tempos de manobras operacionais, mas por outro lado, produto parado em tanque é sinônimo de redução de lucro. Sistemáticas aprimoradas são cada vez mais empregadas para aperfeiçoar a capacidade de logística de unidades operacionais. Estas técnicas focam na otimização dos tempos de produtos armazenados nos tanques em operação evitando o tempo ocioso, que é caracterizado por tanques sem envio ou recebimento. Sendo assim, o modelo industrial a ser atingido é aquele em que não ocorre o desperdício de recursos ao utilizar tanques em demasia em unidades de processo para armazenamento.

Para o projeto de um tanque de derivados de petróleo, o tipo de produto a ser estocado é de suma importância. Com base nas características do líquido, é escolhido o tipo de teto para o tanque, a densidade do líquido é parâmetro para dimensionamento das paredes e o ponto de congelamento abaixo da temperatura ambiente determina a necessidade de agitadores e aquecimento no interior do tanque para manter a fluidez do produto. Estes são alguns exemplos referentes ao projeto que diz respeito ao tipo de líquido a ser condicionado. Desta forma, se observa a baixa flexibilidade de logística, uma vez que os produtos produzidos

possuem tanques pré-definidos em projeto e o envio para outro tipo de tanque torna-se possível somente mediante avaliação de um especialista. A troca do tipo de produto condicionado em um tanque não é uma prática comum. Uma breve descrição de tanque e seus acessórios estão apresentados na figura 2, conforme dispõe a Associação Brasileira de Normas Técnicas (1989, p. 4).

Figura 2– Tanque e acessórios - terminologia



(fonte: ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1989)

Sendo:

- | | |
|--------------------------------------|---|
| 1 - Escotilhas de medição | 12 - Dreno de fundo |
| 2 - Chapa do teto | 13 - Boca de visita no costado |
| 3 - Câmara de espuma | 14 - Termômetro |
| 4 - Respiro | 15 - Saída de condensado |
| 5 - Caixas de selagem de gases | 16 - Bocais de entrada e saída de produto |
| 6 - Régua externa do medidor de bóia | 17 - Entrada de vapor de aquecimento |
| 7 - Bocas de visita no teto | 18 - Tubulação de espuma |
| 8 - Corrimão do teto | 19 - Porta de limpeza |
| 9 - Plataforma da escada | 20 - Chapa do fundo |
| 10 - Escada helicoidal de costado | 21 - Misturador |
| 11 - Corrimão | 22 - Costado |

O armazenamento de produtos é uma etapa importante e a prevenção quanto a possíveis riscos é fundamental, assim é possível evitar possível indisponibilidade de estocagem. A Norma regulamentadora n. 13 (BRASIL, 2014, p. 2), mesmo dispensando dos requisitos específicos contidos na norma NR 13, estabelece a necessidade do cumprimento da inspeção para “[...] tanques e recipientes para armazenamento e estocagem de fluidos [mesmo estes] não [estando] enquadrados em normas e códigos de projeto relativos a vasos de pressão[...]”.

Durante esta etapa, em que os tanques atmosféricos devam passar por inspeções, o referido tanque estará impossibilitado de receber ou enviar produto. O fato de se trabalhar com o mínimo de tanques possíveis, mesmo levando em consideração tanques em manutenção e liberados para inspeções internas, assume que a falta de qualquer equipamento por motivos não previstos, acarretará em remanejamento de estoque e transferências de produtos em tempo menor, podendo até mesmo afetar a produção.

O incêndio além dos impactos ambientais, perdas financeiras, risco a segurança e a saúde de pessoas, quando ocorrido, muitas vezes indisponibiliza o equipamento por longo prazo de tempo, visto que o tanque deverá passar por perícias, avaliações estruturais e reparos ou substituição. Portanto, além das perdas financeiras diretas causadas no incêndio, ocorrem perdas indiretas observadas pela indisponibilidade do tanque após ter ocorrido o sinistro.

O correto tratamento para o possível incêndio vai desde a etapa de projeto até a manutenção periódica dos equipamentos de prevenção instalados para combate em possível sinistro. A falha em qualquer destas etapas pode, e certamente acarretará, em cenários de incêndio mais perigosos, que podem evoluir para cenários catastróficos onde mais tanques estarão sujeitos a combustão por conta de um ineficaz combate e tratamento da emergência.

Segundo Santiago (2003, p. 67):

O correto entendimento do comportamento de estruturas presentes em plantas industriais, através de critérios adequados à realidade dos cenários de risco aos quais elas estão expostas, tanto quanto o uso de ferramentas de análise estrutural modernas, beneficiam tanto o analista de riscos quanto o projetista industrial no sentido de evitar possíveis acidentes já na fase de projeto de uma nova planta industrial.

Quanto ao dimensionamento dos tanques, segundo a Associação Brasileira de Normas Técnicas (1983, p. 10):

[...] a espessura das chapas de cada um dos anéis do costado deve ser, em qualquer caso, o maior dos três valores seguintes:

- a) espessura calculada pela fórmula [...] a seguir, em função da densidade do líquido a ser estocado, acrescida da sobre espessura para corrosão, definida para cada anel, nos casos em que essa sobre espessura for indicada;
- b) espessura calculada pela mesma fórmula [...] considerando-se a densidade do produto igual a um, sem o acréscimo da sobre espessura para corrosão;
- c) espessura mínima [...] em função do diâmetro do tanque.

A fórmula para dimensionamento dos anéis do costado está descrita abaixo conforme determina a (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1983, p. 10):

$$e = 0,040 D (H - 0,3) G$$

Sendo:

e = espessura mínima, em mm;

D = diâmetro nominal do tanque, entendendo-se como tal o diâmetro medido na linha de centro das chapas do costado quando todas as chapas tiverem uma linha de centro comum, ou o diâmetro interno do tanque quando as chapas tiverem a face interna comum, em metros;

H = distância entre a linha do centro da junta inferior do anel considerado à cantoneira de reforço da borda superior do costado, ou à parte inferior de qualquer ladrão que limite o enchimento do tanque, em metros;

G = densidade do líquido a ser estocado.

O tipo de material utilizado na confecção do costado está descrita na norma NBR 7821:1983, podendo ser empregado chapas grossas ou finas (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1983, p. 2).

As paredes de um tanque são fundamentais para segurança, pois segundo Souza Júnior (2004, p. 3):

As paredes deverão funcionar como uma barreira de contenção do fogo ao ambiente incendiado e os elementos estruturais deverão ser projetados de forma a resistir por determinado tempo, impedindo a instabilidade e o colapso estrutural, evitando assim danos à vida ou perdas financeiras maiores.

Geralmente, em áreas industriais, a área de estocagem é composta por tanques que contenham o mesmo produto, isto devido ao fato de minimizar os gastos com tubulações. Esta distribuição facilita a elaboração do mapa de risco da empresa e reduz os custos para implementação de componentes de segurança exigidos conforme o tipo de produto armazenado.

A NBR 17505-7 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2015, p. 2), define tanques isolados como:

[São] aqueles considerados isolados para fins de proteção contra incêndio, quando distanciarem entre si no mínimo duas vezes o diâmetro do maior tanque vertical ou duas vezes a maior dimensão do tanque horizontal, considerando a maior das duas distâncias, e quando estiverem em bacias de contenção isoladas.

NOTA: a distância entre tanques calculada pode ser reduzida a um terço, respeitando a distância mínima de 15 m entre tanques, com a interposição de uma parede corta-fogo com resistência mínima ao fogo de 120 min, que ultrapasse em 1 m todas as dimensões do maior tanque.

Levando em consideração que, durante o incêndio altas temperaturas serão atingidas, é de suma importância a existência de distâncias apropriadas para que não haja incidência de calor em equipamentos adjacentes suficiente para causar novos focos de incêndio. Como medida alternativa, pode se utilizar o resfriamento no costado do tanque para reduzir a temperatura.

A NBR 17505-7 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2015, p. 4) define para condição de resfriamento:

Para efeito de cálculo, são considerados vizinhos os tanques que atendam a um dos seguintes requisitos:

- a) quando o tanque em chamas for vertical e a distância entre o seu costado e o costado (ou parede externa) do tanque vizinho for menor que 1,5 vez o diâmetro do tanque em chamas ou 15 m, o que for maior;
- b) quando o tanque considerado em chamas for horizontal e a distância entre o costado (ou parede externa) do tanque vizinho for menor que 15 m.

A vazão necessária calculada segundo a Associação Brasileira de Normas Técnicas (2015, p. 4) para tanques verticais atmosféricos devem atender um dos dois critérios:

- a) tanque em chamas: 2 L/min/m² da área do costado, utilizando aspersores, canhões-monitores ou mangueiras a partir de hidrantes;
- b) tanques vizinhos:

- utilizando aspersores: 2 L/min/m² da área determinada [...]; ou
- utilizando canhões-monitores (fixos ou móveis) ou mangueiras a partir de hidrantes [...].

De acordo com a NBR 17505-7, os tanques devem possuir os requisitos previstos de segurança contra incêndio de acordo com a classificação quanto ao ponto de fulgor (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2015, p. 8).

A Associação Brasileira de Normas Técnicas (2015, p. 8), determina exigências de segurança também levando em consideração o tipo de teto do tanque, como é o caso para os tanques de teto flutuante, que devem:

Tanques construídos [...] com teto do tipo *Double deck ou pontoon*, devem ser protegidos por sistema fixo de aplicação de espuma, com aplicadores instalados no costado dimensionados, no mínimo, para proteger a coroa formada pela área de vedação teto/costado, considerando a taxa de aplicação de 12,2 L/min/m², durante 20 min.

O Plano de Atendimento à Emergência (PAE) é elaborado mediante determinação dos cenários mais prováveis e suas situações mais críticas. Para o sucesso da abordagem elaborada previamente no planejamento, é necessário que todos os componentes previstos para combate à emergência estejam disponíveis e operacionais.

Segundo Ruzzarin (2011, p. 21):

[o] Plano de Atendimento à Emergência (PAE) é a síntese de todo estudo realizado até este momento e tem por objetivo determinar as ações e meios de controle para garantir a minimização das consequências do incêndio, através da otimização dos recursos humanos e materiais.

Além do Plano de Atendimento à Emergência (PAE), geralmente em pólos industriais é estabelecido o Plano de Auxílio Mútuo (PAM), onde cada indústria se compromete em prestar auxílio, contribuindo com recursos materiais e de mão de obra (brigadistas) para combate em caso de sinistro em qualquer uma das empresas participantes.

3.2 CARACTERÍSTICAS DOS MATERIAIS

Durante um incêndio, as altas temperaturas alcançadas fazem com que, as resistências dos materiais empregados na construção sejam reduzidas gradativamente à medida que o incêndio se propaga. Segundo Ruzzarin (2011, p. 14):

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

Os materiais, de modo geral, possuem temperaturas características em que suas resistências são afetadas. Em *Center for Chemical Process Safety*¹ (2003 apud RUZZARIN, 2011, p.15) encontra-se uma relação de temperaturas de interesse para início de falha para alguns materiais:

- a) pintura começa a amolecer em 204°C;
- b) falha em estruturas de PVC em 250°C;
- c) tintas normais começam a amolecer em 310°C;
- d) óleo lubrificante sofre auto-ignição em 421°C;
- e) aço inoxidável começa a descolorir entre 427 e 482°C;
- f) compensado de madeira sofre auto-ignição em 482°C;
- g) mangueiras de borracha sofrem auto-ignição em 510°C;
- h) aço carbono enfraquece em aproximadamente 575°C;
- i) ligas de alumínio derretem entre 610 e 660°C;
- j) vidro derrete entre 750 e 850°C.

As temperaturas atingidas durante um incêndio são altíssimas e estas temperaturas aquecem equipamento nas mediações do incêndio. Segundo *Center for Chemical Process Safety*² (2011 apud RUZZARIN, 2011, p. 14):

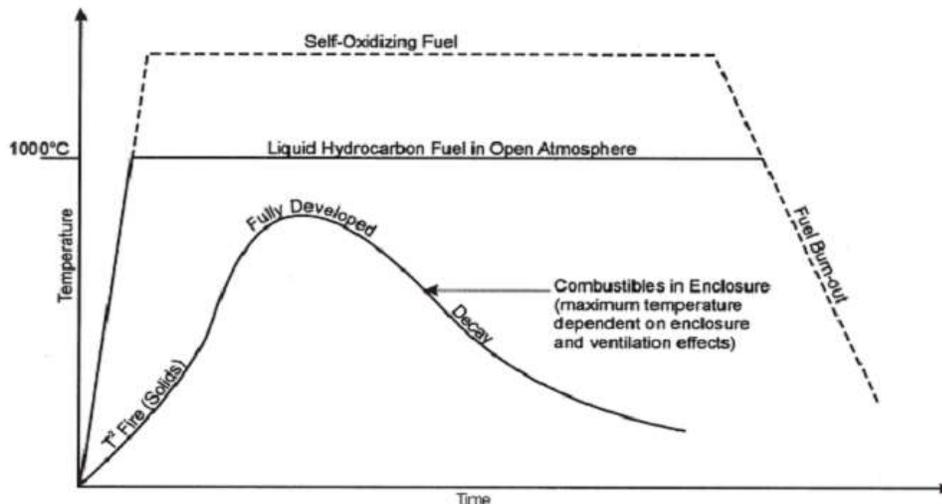
¹ Center for Chemical Process Safety, Fire Protection in Chemical, Petrochemical, and Hydrocarbon Processing Facilities, American Institute of Chemical Engineers AIChE, 2nd ed., New York, 2003.

² op cit.

Sendo que a pior consequência de um incêndio é o seu alto fluxo térmico, devido às altíssimas temperaturas atingidas no centro de um incêndio de líquido inflamável, que podem chegar a valores próximos de 1.000°C para incêndios sem limitação de oxigênio disponível para a combustão (CCPS, 2003) e por meio de processos de transferência de calor convectivo e radiativo produzem fluxos térmicos incidentes altíssimos sobre alvos próximos.

Conforme *Center for Chemical Process Safety*³ (2011 apud RUZZARIN, 2011, p. 14), a figura 3 mostra o perfil do desenvolvimento da temperatura de chama que pode ser atingida em um incêndio:

Figura 3 – Características térmicas de incêndios para líquidos, sólidos e auto-oxidantes.



(fonte: CENTER FOR CHEMICAL PROCESS SAFETY, 2003)

A temperatura crítica do aço, que sugere a falha devido à redução da resistência encontra-se na faixa de 500 e 550 °C. Esta afirmação é reforçada por Ruzzarin (2011, p. 14-15):

O efeito da radiação térmica em estruturas depende se eles são combustíveis ou não, a natureza e a duração da exposição. Assim, materiais de madeira irão falhar devido à combustão, enquanto o aço irá falhar devido à redução térmica da tensão de escoamento. Muitas estruturas de aço sob carga normal falharão rapidamente quando elevado a uma temperatura na faixa de 500 a 550 °C, enquanto que estruturas de concreto irão resistir por muito mais tempo. É importante lembrar que chamas diretas sobre uma estrutura são mais graves do que a radiação térmica.

³ Center for Chemical Process Safety, Fire Protection in Chemical, Petrochemical, and Hydrocarbon Processing Facilities, American Institute of Chemical Engineers AIChE, 2nd ed., New York, 2003..

Ainda segundo Ruzzarin (2011, p. 15), “Considera-se seguro um projeto em que o aço seja calculado para resistir a 60% do valor de escoamento, e isto ocorreria numa faixa de temperatura de 500 a 550°C.”.

O limitante de temperatura também é indicado por Souza Júnior (2004, p. 4):

Uma abordagem, proposta para dimensionar a proteção usada na estrutura, é impedir que a temperatura no elemento estrutural atinja 550°C [...]. Em tal nível de temperatura, o limite último de resistência do aço reduz-se quase pela metade. Dessa forma, a margem de segurança adotada no projeto poderia anular-se, o que poderia levar ao colapso do elemento.

O aço possui grande vulnerabilidade a temperaturas extremas e comportamento distinto da alvenaria e do concreto, que é geralmente empregado na base do tanque, abaixo da chaparia de fundo.

O concreto após exposto a altas temperaturas apresenta mudança em sua coloração de forma associada a perda de resistência. Segundo Cánovas⁴ (1998 apud LIMA 2005, p 83):

[...] se o agregado utilizado for rico em sílica, num patamar de temperatura próximo a 200°C, a coloração do concreto torna-se acinzentada, sem que ocorram mudanças significativas em termos de redução da resistência à compressão.

A partir daí a resistência começa a se reduzir, gradativamente, até que, em cerca de 300°C, tem-se uma perda média de cerca de 10%. O fenômeno se acelera a partir deste nível de temperatura. Quando aquecido entre 300 a 600°C, a coloração do concreto muda de rosa a vermelho, e ocorrem perdas de resistência à compressão da ordem de 50%, sendo que o módulo de deformação pode decrescer até 20% e a resistência à tração pode atingir valores desprezíveis.

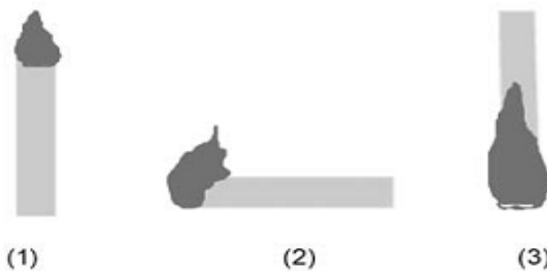
Entre 600 e 950°C, ocorre uma nova mudança de cor no concreto, que passa a apresentar um tom acinzentado com pontos avermelhados. Neste estágio o mesmo se mostra bastante friável e registra uma alta sucção de água, pelo incremento da fissuração. Isto tem fortes reflexos sobre a resistência à compressão.

De 950 a 1000°C, a cor modifica- se para amarelo alaranjado e o concreto começa a sofrer um processo de sinterização. Entre 1000 e 1200°C, a sinterização se intensifica, com o material assumindo uma tonalidade amarelada clara. Neste ponto a resistência residual é praticamente nula, restando apenas um material calcinado e mole.

A transmissão do calor entre as partes constituintes de um equipamento podem ser através de três formas: condução, convecção e/ou radiação. Para Seito (2008, p. 36) “Cada modo de transmissão da energia irá influenciar na manutenção e no crescimento do fogo.”.

⁴CÁNOVAS, M.F. Patologia e terapia do concreto armado. São Paulo: Pini, 1988.

Figura 4 – Influência do mecanismo de transmissão



(fonte: SEITO, 2008)

Segundo Seito (2008, p. 36), as formas de transmissão podem ser descritas, para cada circunstância, da seguinte forma:

Em (1) a condução do calor é preponderante, a radiação de energia contribui e a convecção praticamente não contribui.

Em (2) a radiação de energia e a condução do calor são preponderantes, a convecção do calor participa pouco.

Em (3) a condução do calor, convecção do calor e a radiação de energia contribuem proporcionalmente.

A condução é caracterizada pela transmissão de calor através do meio sólido, sem a troca de volumes e massas. Esta transmissão depende do tipo de material que constitui o sólido. Em incêndios, a condução é muitas vezes, a forma de transferência com maior representatividade em cenários com geometria pequena.

A convecção é caracterizada pela transmissão de calor que envolve meios líquidos e gasosos, ocorre principalmente pela troca de material e volumes regidos pela diferença de densidade. Neste processo, o componente aquecido, com menor densidade sobe trocando de lugar com o componente mais denso, mais frio, que tende a descer. Em incêndios, a convecção é muitas vezes, a forma de transferência com maior representatividade em cenários com transferência de calor envolvendo fluídos e de forma vertical, sendo esta transferência de baixo para cima.

A radiação é caracterizada pela transmissão de calor através de ondas eletromagnéticas sem necessitar de um meio de propagação, podendo se propagar até mesmo no vácuo. Esta forma de transmissão se propaga de forma igualitária e radial em todas as direções, tendo como centro a chama. Em incêndios, a radiação é muitas vezes, a forma de maior representatividade em cenários com geometria grande.

3.3 CARACTERÍSTICAS DO PRODUTO

Para Ruzzarin (2011, p 13), os efeitos térmicos de um incêndio apontam:

As principais consequências diretas de um incêndio são a liberação de gases, chamas, calor e fumaça. Os materiais envolvidos no incêndio irão definir a proporção com que estas consequências irão ocorrer, para materiais com cadeias de hidrocarbonetos pesadas, ocorrerá uma grande emissão de fumaça, escura e espessa, já para materiais leves será um chama clara com pouca ou nenhuma fumaça [...].

Para efeitos de classificação dos líquidos capazes de sofrer combustão, a Associação Brasileira de Normas Técnicas (2013, p. 19) divide em dois tipos os líquidos, esta diferença se dá pela distinção de valor do ponto de fulgor. Os líquidos são considerados inflamáveis ou combustíveis. De acordo com a NBR 17505-1 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2013, p. 10): “**Líquido inflamável:** qualquer líquido que tenha ponto de fulgor, em vaso fechado, abaixo de 37,8 °C [...]. **Líquido combustível:** qualquer líquido que tenha ponto de fulgor, em vaso fechado, igual ou superior a 37,8 °C [...]”.

A Associação Brasileira de Normas Técnicas (2013, p. 19) aponta também a distinção das classes conforme o ponto de ebulição e a pressão de vapor do líquido. A pressão de vapor é a pressão máxima atingida por um líquido em recipiente fechado e que se mantém constante a uma dada temperatura.

Segundo Associação Brasileira de Normas Técnicas (2013, p. 23):

A pressão de vapor é a medida da pressão que o líquido exerce contra a pressão atmosférica acima dele. Da mesma forma que a atmosfera exerce pressão contra a superfície do líquido, o líquido reage contra ela. A pressão de vapor é normalmente menor que a pressão atmosférica e é uma medida da tendência do líquido de evaporar para passar do estado líquido para o gasoso. Esta tendência também é chamada de volatilidade, portanto o termo “volátil” é usado para descrever os líquidos que evaporam com muita facilidade. Quanto maior a pressão de vapor, maior é a taxa de evaporação.

Ponto de ebulição é a temperatura em que a pressão de vapor do líquido atinge a pressão atmosférica, a partir deste ponto o líquido entra em ebulição proporcionando a mudança de fase. Em líquidos puros, a temperatura se mantém constante ao longo de toda mudança de fase e o calor consumido é devido ao calor latente necessário para este processo.

Para a Associação Brasileira de Normas Técnicas (2013, p. 23):

No ponto de ebulição, a pressão atmosférica circundante não pode manter o líquido neste estado físico e este começa a ferver. Um ponto de ebulição baixo indica alta pressão de vapor e alta taxa de evaporação. Para misturas que não têm um ponto de ebulição constante, deve ser considerado como ponto de ebulição o ponto 20 % evaporado de uma destilação [...].

É importante esclarecer algumas temperaturas para tornar mais perceptível o entendimento das formas de como um líquido pode entrar em combustão, para isto, segue a discriminação de três temperaturas, características de cada líquido, onde se observa fenômenos ligados ao fogo.

Ponto de fulgor: é a temperatura em que o líquido volatiliza, e que na presença de uma fonte de ignição, por exemplo, faísca ou centelha, faz com que os vapores entrem em combustão, mas a chama não se mantém e logo em seguida se extingue.

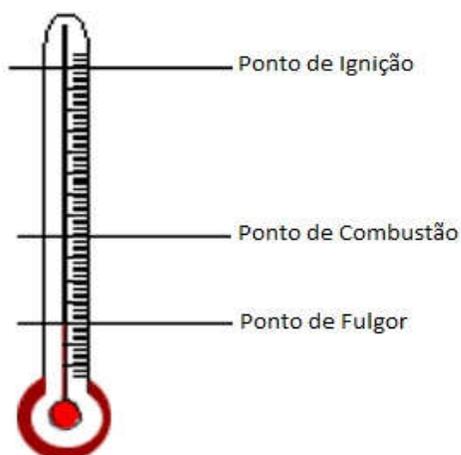
O ponto de fulgor é definido de acordo com a NBR 17505-1 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2013, p. 13) como: “[...] menor temperatura corrigida para uma pressão barométrica de 101,3 kPa (760 mmHg), na qual a aplicação de uma fonte de ignição faz com que os vapores da amostra se inflamem, porém não mantendo a combustão, sob condições específicas de ensaio.”.

Ponto de combustão: é a temperatura em que o líquido volatiliza, e que na presença de uma fonte de ignição, como por exemplo, faísca ou centelha, faz com que os vapores entrem em combustão e a chama se mantém, gerando a partir deste ponto energia suficiente para que o líquido permaneça em chamas e a reação em cadeia do fogo se propague.

O ponto de combustão é definido de acordo com a NBR 17505-1 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2013, p. 13) como: “[...] menor temperatura corrigida para uma pressão barométrica de 101,3 kPa (760 mmHg), na qual a aplicação de uma chama de ensaio causa a ignição e sustentação da queima dos vapores da amostra por no mínimo 5 s sob as condições específicas do ensaio.”.

Ponto de auto-ignição: é a temperatura em que, o líquido volatiliza e sem a presença de fonte de ignição entra em combustão. Este ponto também é conhecido como ponto de ignição espontânea. Estes pontos de temperatura estão identificados na figura 5 de forma ilustrativa:

Figura 5 – Identificação de pontos de fulgor, combustão e auto-ignição para líquidos



(fonte: adaptado de curso de formação para brigadistas⁵, 2015)

Segundo Seito (2008, p. 37), o combustível líquido tem o seguinte comportamento:

Quando exposto a um determinado grau de calor, não sofre decomposição térmica, mas, sim, o fenômeno físico denominado evaporação, que é a liberação dos vapores, os quais, em contato com o oxigênio do ar, forma a mistura inflamável (ou mistura explosiva). Essa mistura na presença de uma fonte de energia ativante (faísca, chama, centelha) se inflama.

Considerando-se que os vapores volatilizados esteja em concentrações ideais, para o caso em que o líquido atinja a temperatura de combustão, ocorre o flash ou explosão e o líquido permanecerá em combustão após a explosão. Caso o líquido esteja abaixo da temperatura de combustão, porém acima da temperatura de fulgor, ocorrerá apenas a explosão.

A tabela 1 mostra algumas propriedades físico-químicas da gasolina, considerada padrão, em uma Ficha de Informação de Segurança de Produto Químico:

⁵ Curso de formação para brigadistas – Teórico de Combate a Incêndio, realizado na Petrobrás, em Canoas, em 12 maio 2015.

Tabela 1 – Características físico-químicas da gasolina.

Propriedade	Quantificação
Faixa de destilação a 101,325 kPa (760 mmHg):	30 a 215 °C
Ponto de fulgor:	< -43 °C
Temperatura de auto-ignição:	257 °C
Densidade relativa fase vapor:	4
Densidade relativa fase líquida:	0,75
Pressão de vapor a 37,8 °C [g]:	0,60 kgf/cm ²

(fonte: adaptado de FISPQ⁶, 2002)

Importante salientar que as características físico-químicas podem ter leves variações dependendo da especificação da gasolina avaliada.

Além do fator temperatura para o tipo de início de combustão em um determinado líquido, outra característica importante é a concentração na qual os gases estão dispostos no ambiente. Os gases para formarem uma atmosfera explosiva, devem estar em uma faixa de concentração considerada ideal para que haja o *flash* ou explosão. Portanto se determina o LIE - limite inferior de explosividade e o LSE - limite superior de explosividade para cada produto.

Para valores de concentração dos gases volatilizados abaixo do limite inferior, a mistura é considerada pobre e não ocorre explosão. Para valores de concentração de gases volatilizados acima do limite superior, a mistura é considerada rica e também não ocorre explosão. Para valores intermediários aos limites, a mistura é considerada ideal e para que ocorra a explosão do ambiente contendo os vapores e o oxigênio, é necessária apenas a contribuição de uma fonte de calor, por exemplo, fâisca ou centelha. A tabela 2 indica a propriedade de LIE e LSE para alguns produtos:

⁶ FISPQ - Ficha de Informação de Segurança de Produto Químico - Disponível em: <<http://www.higieneocupacional.com.br/download/gasolina-padrao-petrobras.pdf>>. Acesso em: 26 maio. 2016.

Tabela 2 – Mistura explosiva de alguns gases e líquidos

SUBSTÂNCIA	LIE (% em volume)	LSE (% em volume)
Acetona - CH ₃ CO CH ₃	2,6	12,8
Acetonitrila - CH ₃ CN	4,4	16
Benzeno - C ₆ H ₆	1,3	7,1
Butano - C ₄ H ₁₀	1,9	8,5
Dissulfeto de carbono - C S ₂	1,3	50
Monóxido de carbono - CO	12,5	74
Ciclo hexano - C ₆ H ₁₂	1,3	8
Etano - C ₂ H ₆	3	12,5
Etanol - C ₂ H ₅ OH	3,3	19
Éter - (C ₂ H ₅) ₂ O	1,1	5,9
Gás natural	3,8	13
Gasolina	1,4	7,6
Metano - C H ₃	5	15
Metanol - C H ₂ OH	6,7	36
Nafta	0,9	6
Pentano - C ₅ H ₁₂	1,5	7,8
Propano - C ₃ H ₈	2,2	9,5
Querosene	0,7	5
Toluene C ₆ H ₅ CH ₃	1,2	7,1

(fonte: SEITO, 2008)

Para os valores de gasolina, é possível observar que este produto possui sua faixa de explosividade bem baixa, desta forma uma possível explosão está mais sujeita a ocorrer no lado de fora do tanque, uma vez que os vapores emanados pelo líquido no interior do tanque, atingem valores de concentração acima do LSE, portanto estando na forma de uma mistura rica.

3.4 CARACTERÍSTICAS DO FOGO

O incêndio pode ter origem de várias formas em uma área industrial, para realização da árvore de causas – técnica de investigação de acidentes/incidentes – é necessário conhecer conceito do triângulo do fogo.

O triângulo do fogo é composto por três itens fundamentais para que o incêndio inicie, são eles: Combustível, Comburente e Fonte de calor. Para este último, caso a temperatura atinja o ponto de auto-ignição, a fonte de calor ocorre sem a existência de fonte de ignição propriamente dita, o calor é gerado pela própria agitação das moléculas.

O combustível pode ser sólido, líquido ou gasoso. O comburente é o oxigênio. A fonte de calor pode ser centelha, faísca ou chama.

O fogo depende de vários fatores, tanto dos materiais quanto do meio em que se encontram. Segundo Seito (2008, p. 36):

O fogo para ser iniciado e se manter no material combustível sofre influência de vários fatores tais como: estado da matéria (sólido, líquido ou gás), massa específica, superfície específica, calor específico, calor latente de evaporação, ponto de fulgor, ponto de ignição, mistura inflamável (explosiva), quantidade de calor, composição química, quantidade de oxigênio disponível, umidade, etc..

Portanto, em um exemplo de árvore de causas, pode-se apontar origem para cada um dos 3 vértices do triângulo do fogo, sem a existência de um dos três, o fogo não tem início.

Quanto ao vértice combustível:

- a) armazenamento de produto em temperatura elevada fazendo com que vapores saiam do suspiro e se acumulem nas mediações do tanque;
- b) vazamentos provenientes de flanges, poro ou furo do tanque;
- c) falha ou falta de membrana em caso de tanque com selo. Esta podendo se ramificar em: falha humana e/ou de instrumento;
- d) mal estado do selo do tanque devido formação de goma.

Tratando-se do vértice comburente: entrada de ar pelo respiro ou laterais, visto que o tanque possui pressão atmosférica.

Em relação ao vértice fonte de calor, esta pode se dividir em interna ou externa:

a) fonte de calor interna,

- faísca gerada pelo colapso/queda da estrutura do teto, mais provável quando utilizado teto flutuante;
- descarga eletrostática gerada na membrana. Possibilidade de cabo anti-estático cortado/avariado;
- faísca gerado durante operação de amostragem;

b) fonte de calor externa,

- ponto aquecido. Superfície aquecida acima da temperatura de auto-ignição;
- fonte de ignição centelha. Ex.: proveniente de luminária;
- fonte de ignição faísca. Serviço que gere faísca, por exemplo, os que utilizam martelete, lixadeira, furadeira, etc...
- eletricidade estática. Proveniente de carregamento ou descarregamento em caminhão sem aterramento ou aterramento avariado.
- fonte de ignição chama. Proveniente de serviço de solda;
- negligência. Cigarro;
- sabotagem;
- operação incorreta;
- circulação de veículo nas mediações.

Observa-se que o comburente está sempre presente, visto que a pressão do tanque é atmosférica. Portanto, em caso de um sinistro, um item do vértice combustível e outro do vértice fonte de calor devem ter ocorridos simultaneamente e faz parte da perícia do local cercar as possíveis hipóteses para apontar as prováveis falhas de segurança.

Atualmente com a existência de sistemas informatizados é possível obter dados de nível, tempo, temperatura, entre outros dados, que ficam armazenados em bancos de dados, podendo ser consultados em momento de interesse.

Para realização da extinção do fogo, após a descoberta do extintor “halon” foi possível incorporar a teoria do tetraedro do fogo (SEITO, 2008, p. 36). O tetraedro do fogo é composto pela reação em cadeia e pelos demais componentes do triângulo do fogo. Desta forma, para que o incêndio seja encerrado, é necessário que um dos componentes seja retirado.

Em incêndios em tanques, o principal agravante é que, devido às altas temperaturas atingidas, o incêndio ao ser extinto através da quebra da reação em cadeia com uso de produtos químicos, a situação recai na condição inicial do triângulo do fogo e volta-se a iniciar a

combustão devido ao fato do fluido ter atingido a temperatura de auto ignição durante o incêndio.

Outro agravante é a rapidez com que evolui o incêndio em um tanque. De acordo com Ruzzarin (2011, p. 32):

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

O incêndio em um tanque, ou numa piscina de gasolina, possui em pequenos diâmetros, oxigênio em abundância, propiciando queima com grande quantidade de oxigênio, a medida que se aumenta o diâmetro do tanque a altura de chama também aumenta, porém em um determinado valor de diâmetro, o oxigênio não consegue “alimentar” as chamas localizadas no centro da piscina. A partir deste valor, a taxa de queima incompleta aumenta e ocorre maior formação de fuligem. Portanto, existe um valor de diâmetro em que a queima é favorecida pelo valor máximo de área de combustível exposto e pelo oxigênio disponível. Para McGRATTAN et al. (2000, p. 9, tradução nossa): “[...] No geral, a máxima altura da zona luminosa de chamas em piscina é dada por $H_{\max}=6,4 \times 10^{-3} \cdot \dot{p}_f$, onde \dot{p}_f é a taxa de liberação de calor por unidade de área expressa em kW/m^2 .”. O autor aponta que o valor máximo de altura das chamas para gasolina ocorre quando o diâmetro é igual a 20 metros e corresponde ao valor máximo de 15,6 metros de altura.

Alguns fenômenos podem ocorrer durante o incêndio em um tanque contendo óleo combustível, dentre os principais, pode-se destacar os seguintes:

- a) Boilover;
- b) Bleve;
- c) Fireball.

3.4.1 Boilover

Este fenômeno ocorre quando além do hidrocarboneto presente no tanque, existe na parte inferior, no lastro do tanque, água. À medida que o incêndio se desenvolve o calor aumenta, o produto é consumido e a camada de líquido que “protege” a água do calor extremo diminui.

Até o ponto em que, a água contida no lastro, possui energia suficiente para mudança de fase. Neste momento a água expande aproximadamente 1700 vezes⁷ e propulsiona grande parte do hidrocarboneto em chamas para fora do tanque, caracterizando assim uma imensa bola de fogo gerada pela combinação entre o produto em chamas e o oxigênio do ar.

3.4.2 BLEVE - Boiling Liquid Expanding Vapor Explosion

O Bleve é caracterizado pela explosão de equipamento fechado proveniente de aquecimento externo, o aquecimento externo faz com que a pressão interna aumente devido à vaporização do produto. Como visto anteriormente, o líquido sob maior temperatura apresenta maior pressão de vapor. Caso a chama não seja controlada ou ocorra resfriamento eficaz, a pressão interna aumenta indefinidamente até o limite de resistência do vaso ou equipamento. Este fenômeno pode ocorrer em tanque em chamas antes da perda do teto, visto que o respiro pode não atender à quantidade de produto volatilizado e a pressão interna irá aumentar, podendo atingir o limite de resistência do equipamento. Quando este fenômeno ocorre, é acompanhado de explosão devido à ruptura repentina.

3.4.3 Fireball

Este fenômeno é caracterizado pela explosão causada pela mistura de hidrocarboneto e ar, dentro da faixa de explosividade do produto, quando encontra uma fonte de ignição. Em incêndios em tanques, pequenas explosões podem ocorrer devido à volatilização nos tanques próximos causada pelo aquecimento oriundo do tanque em chamas.

3.5 SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL

Atualmente com o desenvolvimento de programas computacionais e gráficos, é possível determinar situações de emergência e obter dentre os cenários, as circunstâncias mais críticas.

⁷ Curso de formação para brigadistas – Teórico de Combate a Incêndio, realizado na Petrobrás, em Canoas, em 12 maio 2015.

Desta forma, pode-se precaver e implementar dispositivos de segurança capazes de amenizar ou até mesmo evitar estes eventos.

A sistemática para Souza Junior (2004, p, 5) para avaliação é:

A modelagem do comportamento estrutural sob incêndio envolve três partes distintas [...]. Uma parte consiste em avaliar os possíveis cenários de incêndio e, para cada cenário, determinar a evolução do incêndio, a energia desprendida e os níveis de temperaturas atingidos. O estágio seguinte é a simulação da resposta dos elementos estruturais, submetidos a tais condições de aquecimento.

Segundo Ruschel (2011, p. 53)

O Pyrosim, desenvolvido pela *Thunderhead Engineering*, fornece uma interface gráfica [...] ao usuário para inserir tanto a geometria do ambiente a ser simulado, como todos os demais dados de entrada necessários para a simulação (carga de incêndio, propriedades dos materiais e critérios adotados).

Existem disponíveis no mercado diversos programas, muitos destes aplicados a incêndios em edificações, inclusive programas gratuitos como é salientado por Mazzoni (2010, p. 35):

O *Smokeview* é um programa de visualização que é usado para mostrar os resultados da simulação do FDS. É importante salientar que ambos os programas são gratuitos e livres, permitindo sua adaptação à realidade brasileira, inserindo padrões de materiais para construção adequados ao local onde o edifício será implantado.

Devido à complexidade de avaliação em diversos pontos do local a ser avaliado uma solução é o desenvolvimento de simulações computacionais. Para Mazzoni (2010, p. 11):

A alternativa que surge é o estudo com o uso de simulações computacionais que permitem analisar o comportamento do fogo e testar hipóteses para suas causas. O uso da simulação computacional é uma ferramenta para analisar a dinâmica do fogo, assim como os efeitos causados pela elevada temperatura. É possível obter de forma rápida e econômica importantes dados como temperatura, concentração de gases, tempo para acionamento dos detectores de fumaça e calor e dos sprinklers, tempo de queima, entre outros.

As simulações de incêndio realizadas para os cenários foram feitas com o uso do programa *Fire Dynamics Simulator* (FDS), desenvolvido pelo *National Institute of Standards and Technology* (NIST). A versão utilizada é a 6.3.2., este software é um programa com modelo de incêndio de dinâmica de fluidos computacional (CFD) com fluxo de fluido dirigido. O FDS resolve numericamente uma forma de equações Navier-Stokes apropriadas para baixa velocidade. Termicamente dirigido com fluxo da fumaça e do calor na propagação do fogo (MCGRATTAN et al., 2016, p. 3, tradução nossa).

O *software* PyroSim (PYROSIM, 2016), foi utilizado para introdução dos dados no FDS, visto que ele fornece uma interface gráfica facilitando o manuseio do FDS, programa este com ampla utilização em cenários que envolvam sinistros em edificações, sendo que a aplicação vai desde a implementação, na fase de projeto, de sistemas de segurança avaliando a eficiência dos equipamentos, até a análise forense ou investigativa para rastreamento da possível origem e níveis de temperaturas a que as estruturas foram expostas em caso de incêndio.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

O computador utilizado para simulações tem caráter doméstico com a seguinte configuração apresentada no quadro 1:

Quadro 1 – Configuração do computador utilizado nas simulações

Processador	Intel(R) Core(TM) i7 CPU Q720 @ 1,60GHz 1,60GHz
Memória Ram	4 GB
Tipo de sistema	Windows 10 Home – S. O. de 64bits, processador com base em x64
SSD	120 GB
Vídeo	nVidia GT335M – 1GB

(fonte: Elaborado pelo autor)

A modelagem do cenário está baseada na atribuição da NBR 17505-7 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2015), que define tanques isolados como:

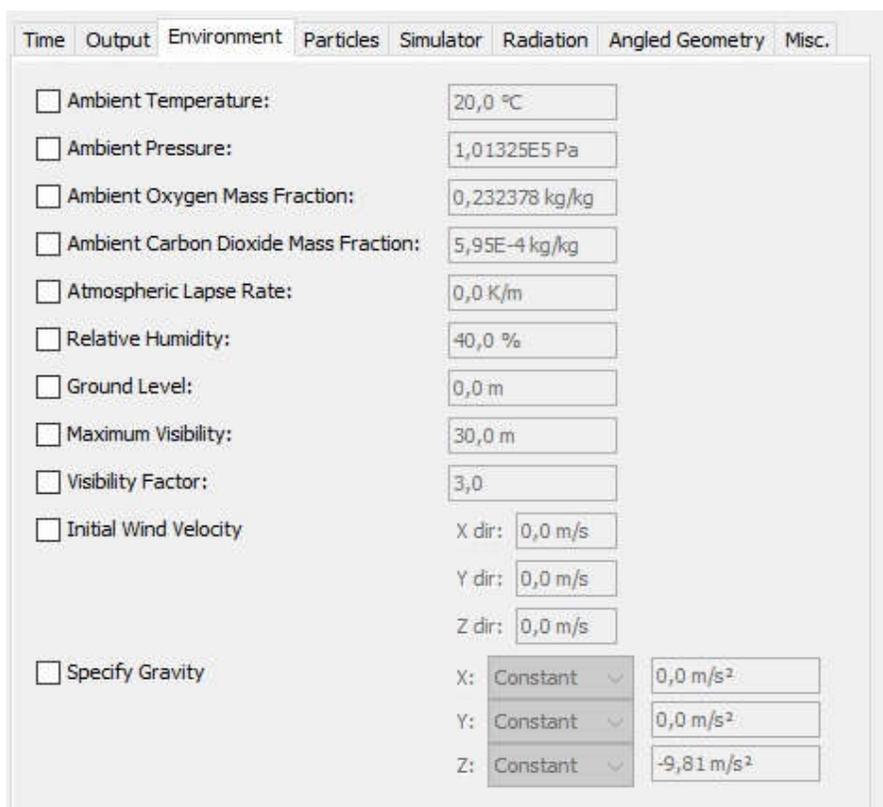
[São] aqueles considerados isolados para fins de proteção contra incêndio, quando distanciarem entre si no mínimo duas vezes o diâmetro do maior tanque vertical ou duas vezes a maior dimensão do tanque horizontal, considerando a maior das duas distâncias, e quando estiverem em bacias de contenção isoladas.

NOTA: a distância entre tanques calculada pode ser reduzida a um terço, respeitando a distância mínima de 15 m entre tanques, com a interposição de uma parede corta-fogo com resistência mínima ao fogo de 120 min, que ultrapasse em 1 m todas as dimensões do maior tanque.

As simulações foram realizadas com cenários considerando o incêndio como evoluído, onde o tanque em chamas encontra-se sem teto, na condição mais desfavorável, ou seja, com toda a superfície do combustível no tanque em chamas exposta para queima.

Para modelagem atmosférica, as condições adotadas foram as mesmas admitidas como padrão para o simulador, estas estão dispostas conforme figura 6:

Figura 6 – Condições atmosféricas adotadas nas simulações realizadas no PyroSim



Parameter	Value
Ambient Temperature	20,0 °C
Ambient Pressure	1,01325E5 Pa
Ambient Oxygen Mass Fraction	0,232378 kg/kg
Ambient Carbon Dioxide Mass Fraction	5,95E-4 kg/kg
Atmospheric Lapse Rate	0,0 K/m
Relative Humidity	40,0 %
Ground Level	0,0 m
Maximum Visibility	30,0 m
Visibility Factor	3,0
Initial Wind Velocity	X dir: 0,0 m/s Y dir: 0,0 m/s Z dir: 0,0 m/s
Specify Gravity	X: Constant 0,0 m/s² Y: Constant 0,0 m/s² Z: Constant -9,81 m/s²

(fonte: PYROSIM, 2016)

O tanque, que armazena gasolina em uma área industrial visitada, apresenta as seguintes características e valores aproximados:

- Altura e diâmetro na ordem de 12 metros e de 42 metros, respectivamente. As simulações foram modeladas para tanques com 12 metros de altura e o diâmetro foi simulado para dois valores distintos, sendo adotados os diâmetros de 7,5 m e 20 m, a fim de discutir as situações da NBR 17505-7;
- O alarme de nível alto é configurado em 10,5 metros. As simulações para o tanque cheio e com chamas foram modeladas em nível de 10 metros;
- O tipo de tanque é terrestre vertical e de teto flutuante, ou seja, o teto acompanha o nível da gasolina;
- Na interface do teto com as paredes do tanque utiliza-se junta de vedação. Portanto, o tanque possui pressão atmosférica.

As simulações são realizadas com uso de *burner*, representando a gasolina com taxa de liberação de calor por área equivalente a 2400 kW/m², a tabela 3 indica valores para alguns

tipos de combustíveis líquidos e gasosos. Para a rampa de aquecimento, foi utilizado o valor de um segundo, para atingir o patamar de queima constante rapidamente e minimizar o tempo de processamento computacional. Importante salientar que a partir do 1 segundo, a queima no tanque atinge caráter de incêndio desenvolvido e fornecendo taxa de liberação de calor por área de 2400 kW/m². Este valor é obtido através da multiplicação da taxa de queima (kg/m²/s) pelo calor de combustão (kJ/kg). Para gasolina estes valores são: 0,055 kg/m²/s e 43.700 kJ/kg, respectivamente.

Tabela 3 – Taxa de liberação de calor por área de alguns líquidos e gases

Líquido	Taxa de liberação de calor por área [kW/m ²]	Líquido	Taxa de liberação de calor por área [kW/m ²]
Ácido acético	400	Gasolina	2.400
Acetona	1.100	Hexano	3.300
Benzeno	2.100	Heptano	4.500
Álcool butílico	1.900	Álcool isobutílico	1.900
m-cresol	2.700	Álcool isopropílico	1.400
Óleo cru	1.900	Querosene	1.700
Ciclo Hexano	5.300	Metanol	340
Óleo Diesel	1.400	Metil-etil-cetona	2.300
Álcool Eílico	400	Pentano	5.700
Etil Benzeno	4.900	Tolueno	4.500
Éter Eílico	3.200	Xileno	3.700
Gases - liquefeitos (Criogenia)		Taxa de liberação de calor por área [kW/m ²]	
H2 Líquido		2.400	
Gás Natural Liquefeito		4.000	
GLP		4.600	

(fonte: MCGRANTTAN, 2000)

O primeiro passo foi realizar simulações de forma a buscar um valor de tempo onde se atingisse um patamar de temperatura que caracterizasse a taxa de transferência de calor constante para as distâncias observadas. A partir desta simulação, foi permitido avaliar a viabilidade do estudo com base na exigência computacional requerida para o mesmo.

Nota: foi considerado patamar o momento em que a temperatura atingisse o valor equivalente a média do patamar menos um desvio padrão, a média e o desvio padrão são calculados considerando todos os pontos a partir do início do patamar. A caracterização do patamar foi obtida de forma iterativa.

O primeiro diâmetro escolhido para a simulação foi de 7,5 metros. A distância mínima entre os tanques corresponde a 15 metros. Portanto $2D = 15$, logo $D = 15/2 = 7,5$ metros. Este valor foi escolhido porque a distância de duas vezes o diâmetro coincide com a distância mínima necessária entre os tanques para serem considerados isolados. Desta forma, os tanques com diâmetros inferiores a 7,5 metros encontram-se em situação mais segura, visto que mesmo que o valor de $2D$ seja inferior a 15 metros, a distância mínima deverá ser adotada entre os tanques para que sejam considerados isolados. Nas simulações contendo o tanque de 7,5 metros, a determinação das temperaturas atingidas foram realizadas para as distâncias de (0,25D; 0,5D; 1D; 1,5D e 2D) através de termopares distribuídos ao longo de uma linha horizontal ao nível da altura do tanque considerado em chamas. Além destes pontos, foram colocados termopares ao longo da parede do tanque em chamas: um localizado na altura da linha horizontal, junto à parede na face interna do tanque e mais dois, localizados no meio e no nível do solo do tanque, ambos junto à face externa da parede. As duas simulações seguiram as seguintes sistemáticas:

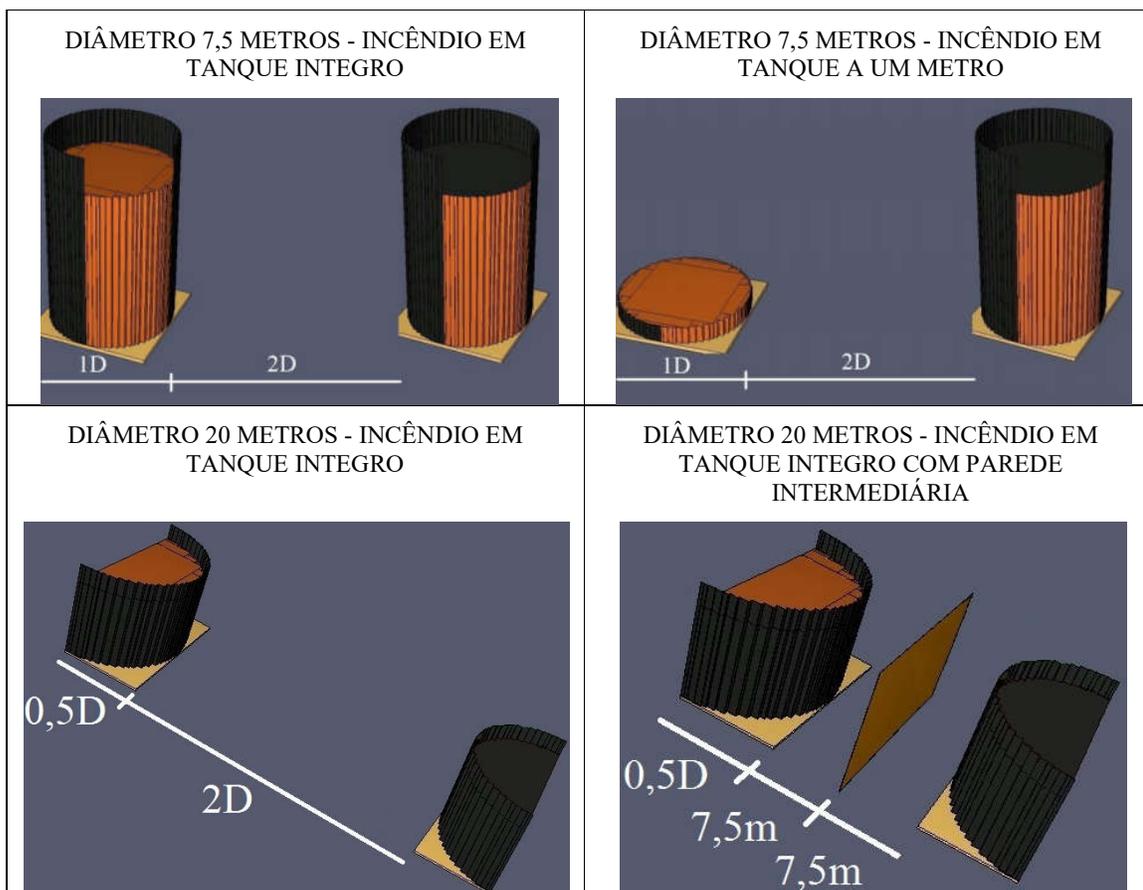
- a) Na primeira situação foi modelado um cenário considerando dois tanques de mesma altura, um em chamas e outro tanque adjacente.
- b) A segunda simulação, para o tanque de 7,5 metros, foi realizada com o tanque em chamas incendiando em uma altura de 1 metro, sendo assim, considerando um colapso lateral parcial do tanque em chamas. Nesta segunda simulação, existe um desnível de 11 metros entre os tanques considerados.

O segundo diâmetro escolhido para a simulação foi de 20 metros. Valor este, que segundo McGRATTAN et al. (2000, p.9) é o valor onde se observa a maior altura de zona luminosa para um tanque contendo gasolina. Neste caso também foram simuladas duas situações, observando as temperaturas nas distâncias de (0,25D; 0,5D; 15m; 1D; 1,5D e 2D):

- a) A primeira simulação para o diâmetro de 20 metros, o tanque em chamas encontra-se íntegro. Nota-se que para esta simulação além dos pontos observados para o tanque de 7,5 metros, está incluso o valor de distância de 15 metros, para fim de comparação com a segunda simulação realizada para este diâmetro de 20 metros, que será explicada no próximo item.
- b) Na segunda simulação para o tanque de 20 metros, foi adotada a colocação de uma parede na posição intermediária de distância que excedesse em de um metro todas as dimensões do maior tanque. Nesta situação, segundo a norma, a distância de $2D$ pode ser reduzida a um terço, portanto, reduzida à 13,33 metros. No entanto, o valor mínimo é de 15 metros, sendo assim, considerando esta última distância como sendo necessária entre os tanques para que sejam considerados isolados

Portanto, no presente trabalho foram realizadas um total de quatro simulações, duas para o tanque de 7,5 metros e duas para o tanque de 20 metros. Estas dispostas no quadro abaixo de forma ilustrativa, onde o tanque em chamas é o tanque da esquerda e o tanque da direita é considerado o tanque adjacente e a distância entre os tanques corresponde ao valor para tanques isolados.

Quadro 2 – Quadro representativo das quatro simulações realizadas e suas respectivas distâncias para tanque isolado



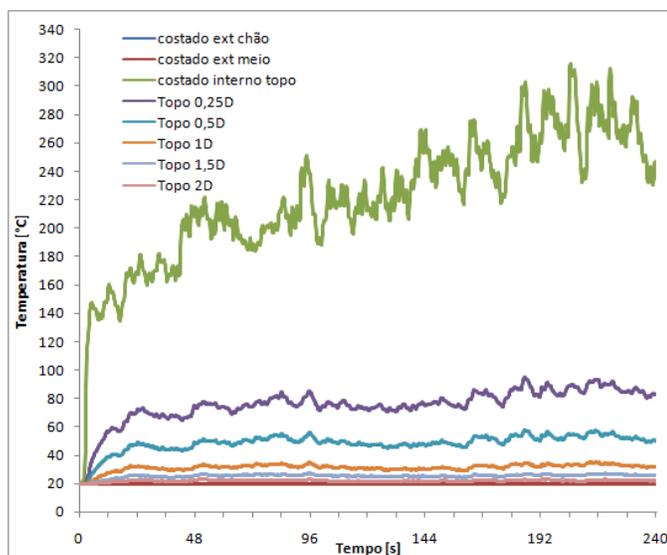
(fonte: elaborado pelo autor)

5 COLETA DE DADOS E ANÁLISE

5.1 DIÂMETRO 7,5 METROS - INCÊNDIO EM TANQUE INTEGRO

O teste da viabilidade do estudo considerando o tempo de processamento de um computador pessoal para os cenários modelados foi realizado juntamente com a primeira simulação para o tanque com 7,5 metros de diâmetro. Com o resultado desta etapa é pertinente o questionamento referente à necessidade da utilização de um supercomputador. Para o processamento de 4 minutos de incêndio foram necessários aproximadamente 71 horas de processamento. Visto que foi atingido o patamar de temperatura para o ponto 2D em aproximados 20 segundos, optou-se por realizar todo o procedimento de pesquisa utilizando-se um computador pessoal. O gráfico, ilustrado pela figura 7, mostra o comportamento da temperatura ao longo das distâncias para o valor de diâmetro do tanque de 7,5 metros e incêndio de quatro minutos.

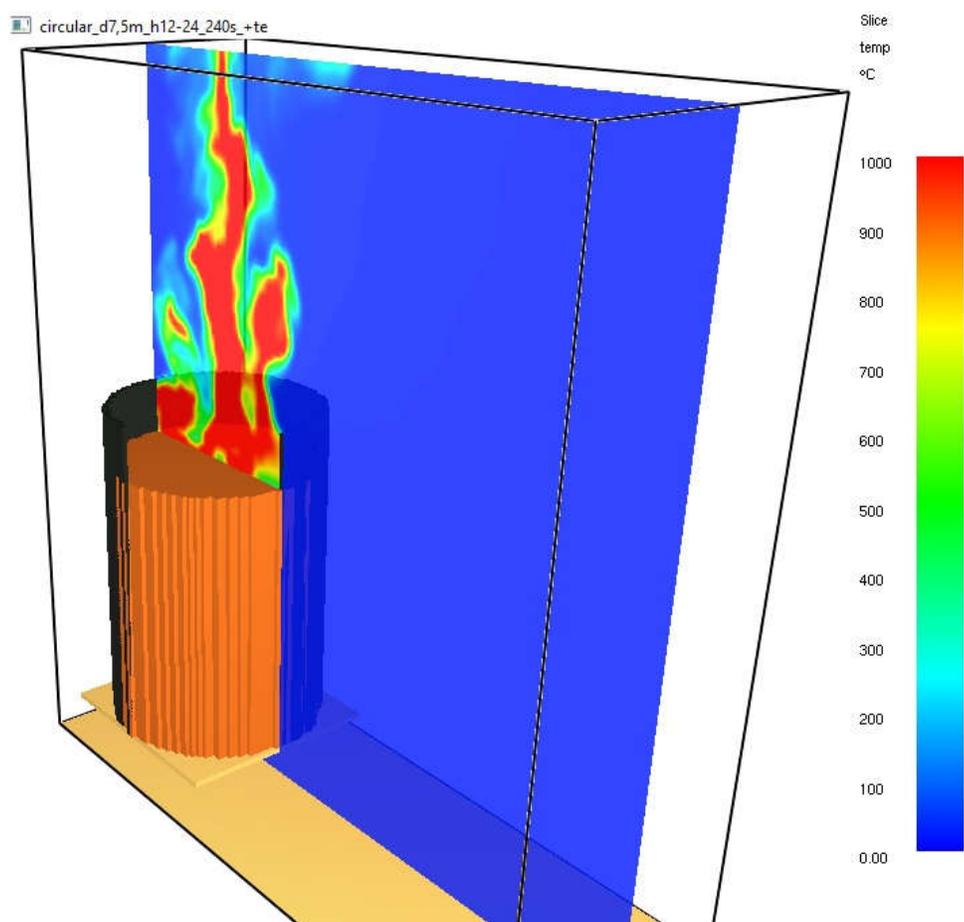
Figura 7 – Temperaturas atingidas na simulação de incêndio do tanque de 7,5 metros de diâmetro



(fonte: elaborado pelo autor)

Embora não tenha sido colocado um termopar no centro do tanque, o incêndio mostra que patamares próximos a 1000°C são atingidos junto à superfície do fluido. A figura 8 mostra, em escala colorimétrica, as temperaturas atingidas conforme um *slice* colocado ao longo de todo o cenário e posicionado na linha central do tanque.

Figura 8 – Temperatura em escala colorimétrica obtida durante a simulação do tanque de 7,5 metros de diâmetro



(fonte: FDS-SMV, 2016)

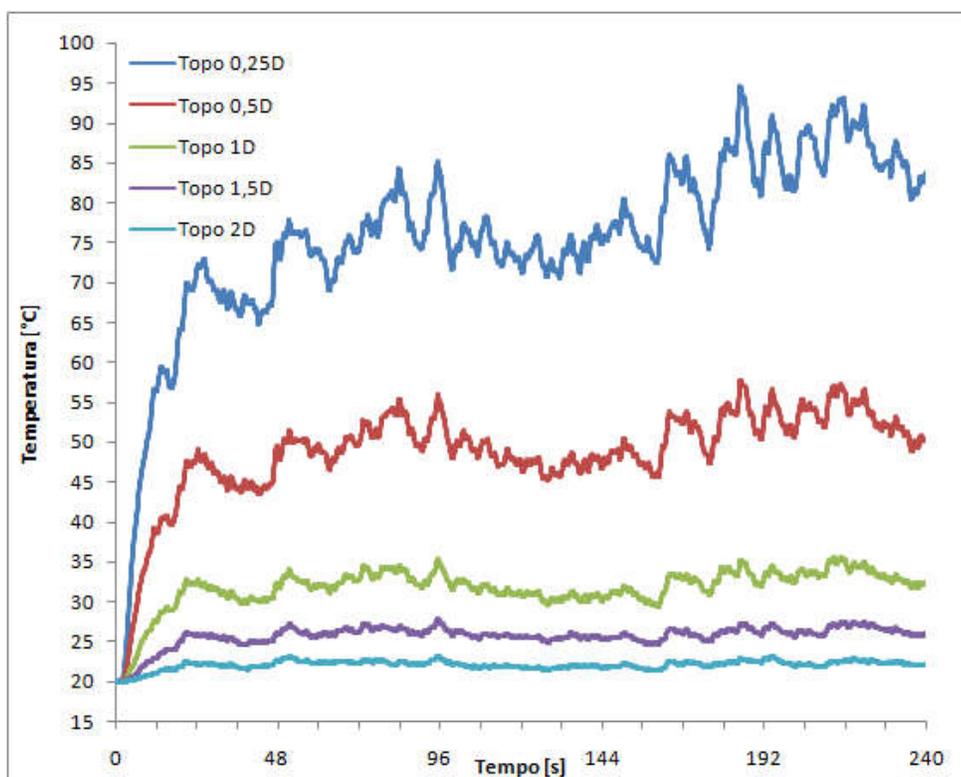
Nota: *Slice* é um recurso do programa PyroSim, representado na figura 8 pelo plano azul, que viabiliza a observação do desenvolvimento da temperatura em escala colorimétrica ao longo deste plano.

Vale ressaltar que a temperatura de auto ignição da gasolina é 257°C , portanto o incêndio deste produto nesta temperatura não é apagado de forma convencional, deve ser realizada

através do uso de espuma. Se o incêndio fosse debelado com água (forma convencional utilizada em edificações), os componentes do cenário estando com temperatura igual ou superior ao ponto de auto ignição da gasolina, favoreceriam a retomada do incêndio sem mesmo a presença de uma fonte de ignição.

Os termopares localizados ao longo da parede junto à face externa, posicionados no meio e junto ao solo, não apresentaram delta de temperatura. Por outro lado, o termopar junto à parede, mas posicionado na face interna do tanque, apresentou valores expressivos de temperatura. Para melhor a visualização do perfil de temperatura ao longo das distâncias, foram removidos os termopares junto à parede. A figura 9 ilustra as temperaturas atingidas:

Figura 9 – Temperaturas atingidas para a simulação de incêndio do tanque de 7,5 metros de diâmetro, sem os termopares de parede



(fonte: elaborado pelo autor)

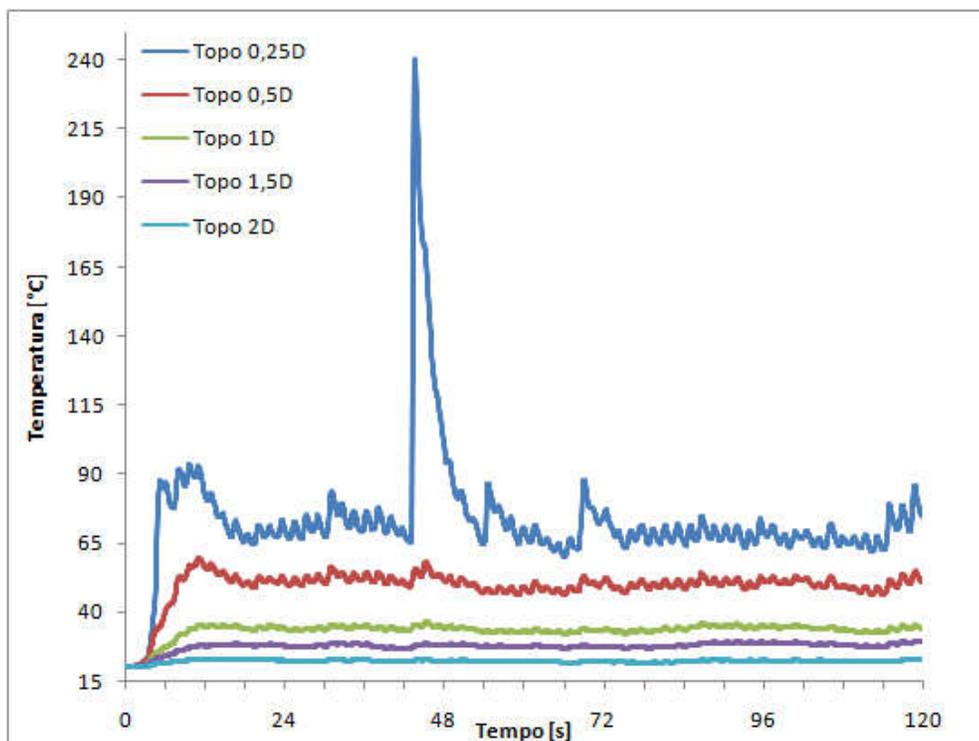
Pode-se observar o decréscimo de temperatura à medida que se distância do tanque aumenta. Para este incêndio no tanque de 7,5 metros, a temperatura apresentou patamar para o valor de

2D de distância em aproximadamente em 20 segundos de incêndio. Os valores de temperatura observados a partir do tempo de 20 segundos e na distância de 2D apresentaram os seguintes valores: máximo de 23,23°C; média de 22,20°C e desvio padrão de 0,37°C.

5.2 DIÂMETRO 7,5 METROS - INCÊNDIO EM TANQUE A UM METRO.

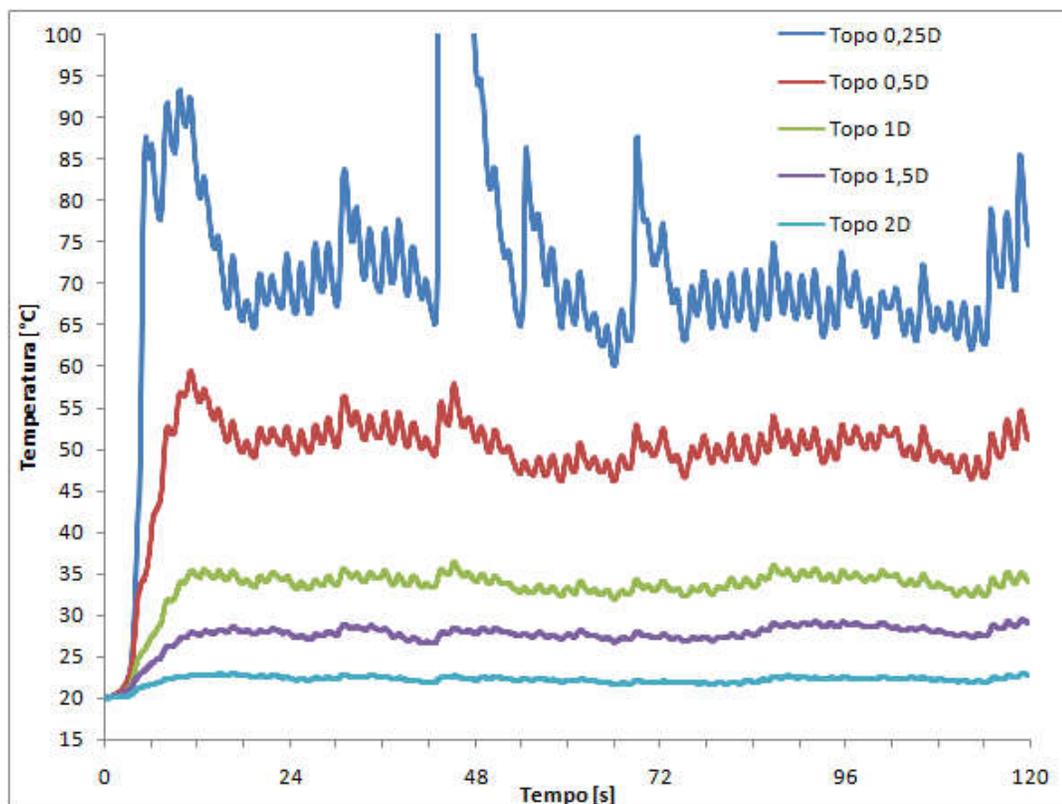
Na segunda simulação realizada para o tanque de 7,5 metros de diâmetro. Desta forma, considerando um colapso lateral parcial do tanque em chamas. Nesta segunda simulação, existe um desnível de 11 metros entre os tanques considerados. O objetivo desta simulação é averiguar se a diferença de altura entre os tanques, onde proporcionaria maior exposição da chama, causaria maior contribuição para o aumento da temperatura. Os dados obtidos para as distâncias mensuradas encontram-se nas figuras 10 e 11. Para esta segunda simulação, o tempo de incêndio foi reduzido para 2 minutos, de forma a minimizar o tempo de simulação.

Figura 10 – Temperaturas atingidas para a simulação de incêndio do tanque de 7,5 metros de diâmetro, a um metro de altura



(fonte: elaborado pelo autor)

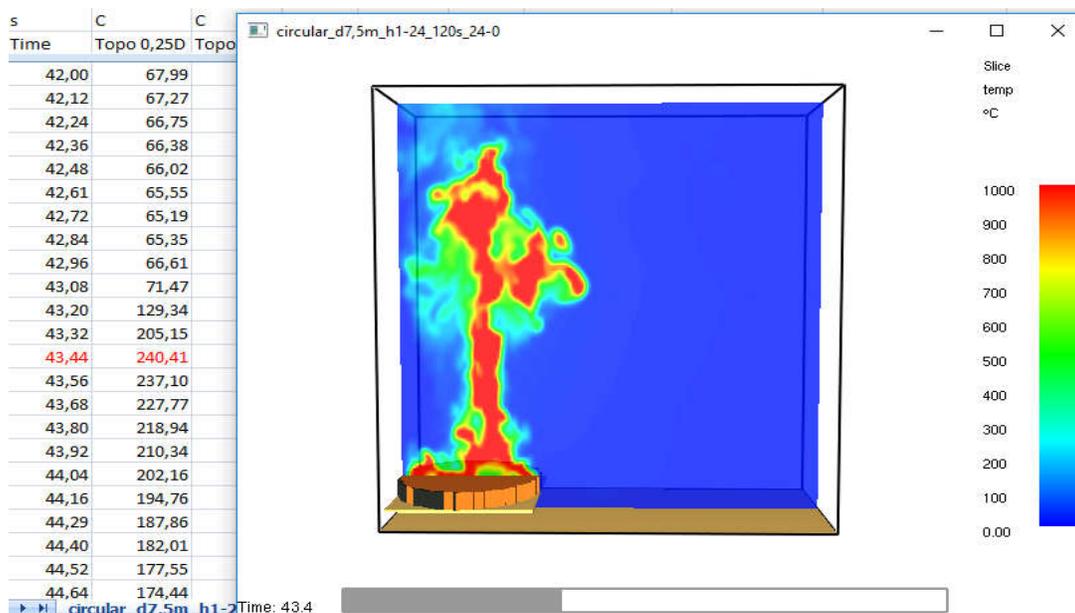
Figura 11 – Temperaturas durante a simulação de incêndio no tanque de 7,5 metros de diâmetro, a um metro de altura – removido pico em 43,4s de 0,25 D para melhor visualização dos patamares



(fonte: elaborado pelo autor)

A temperatura para a distância muito próxima do tanque (0,25D) teve bastante variabilidade de resultados de temperatura, isto devido à pequena distância do incêndio. No momento 43,44 segundos, ocorre um pico de temperatura melhor observado na figura 12, pois neste instante uma labareda do fogo atinge as proximidades do termopar conforme indica a figura 12, imagem do *slice* no momento citado. Observa-se que a temperatura atinge o patamar em tempo menor (em aproximadamente 7,5 segundos), possivelmente devido ao fato de que, neste caso, não possui barreira física entre o incêndio e o ponto de observação. Os valores de temperatura observados a partir do tempo de 7,5 segundos e na distância de 2D apresentaram os seguintes valores: máximo de 22,92°C; média de 22,26°C e desvio padrão de 0,30°C.

Figura 12 – Ilustração do momento em que ocorre o aumento repentino da temperatura no ponto 0,25D. Ao lado a tabela, em excel, que indica o exato momento do máximo de temperatura atingida



(fonte: elaborado pelo autor)

5.3 DIÂMETRO 7,5 METROS - ANÁLISE E CONSIDERAÇÕES

Comparando as temperaturas atingidas na distância de 2D para as duas situações de incêndios simulados no tanque de 7,5 metros, encontram-se valores muito semelhantes conforme o quadro 3:

Quadro 3 – Quadro comparativo dos perfis de temperaturas para as simulações dos tanques com 7,5 metros de diâmetro

	Tanque inteiro	Tanque ao nível de um metro
Temperatura máxima	23,23 °C	22,92 °C
Temperatura média do patamar	22,20 °C	22,26 °C
Desvio padrão da temperatura do patamar	0,37 °C	0,30 °C
Tempo para atingir o patamar	20 segundos	7,5 segundos

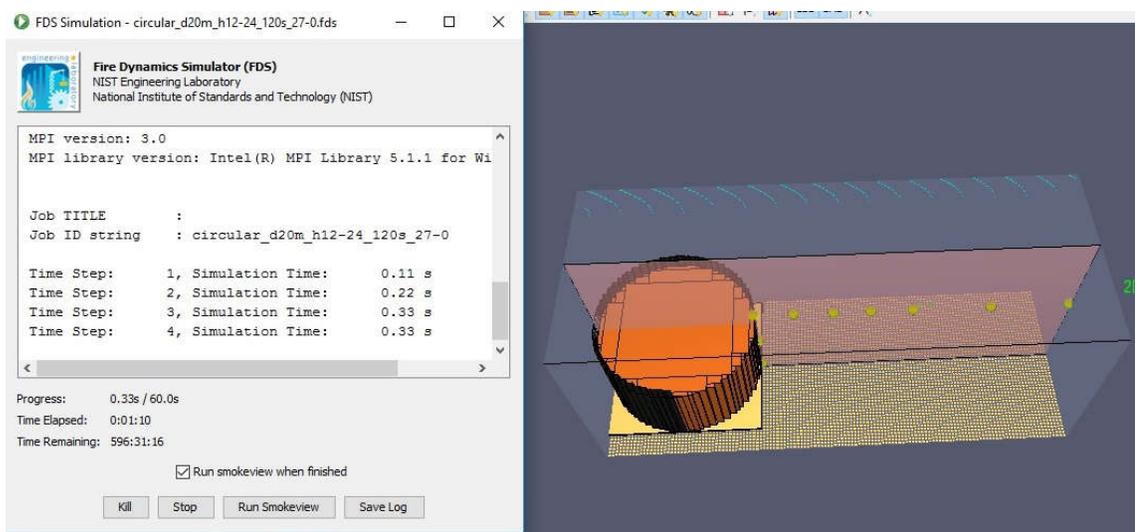
(fonte: elaborado pelo autor)

Considerando atingido o patamar de temperatura para os cenários com incêndios de 4 minutos e em tanque de 7,5 metros de diâmetro, o FDS mostra que os deltas de temperatura são pequenos, na ordem de 2 a 3°C, tomando como referência 20°C, que é a temperatura admitida como ambiente. Inclusive estes valores encontram-se dentro da faixa que podem ser considerados valores decorrentes de amplitudes térmicas diárias. Importante salientar que este é apenas um cenário dentre inúmeros e outras considerações podem ser relevantes como, por exemplo, a incidência de vento, a mudança da umidade atmosférica e temperatura ambiente maior que 20°C.

5.4 DIÂMETRO 20 METROS - INCÊNDIO EM TANQUE INTEGRO.

Na simulação de incêndio para o tanque de 20 metros apresentou a estimativa inicial aproximada de 600 horas para o tempo de processamento necessário para a simulação de apenas 60s de incêndio, mostrando-se inviável para o estudo do cenário na forma convencional e com a configuração do computador utilizada. A figura 13 ilustra os valores observados:

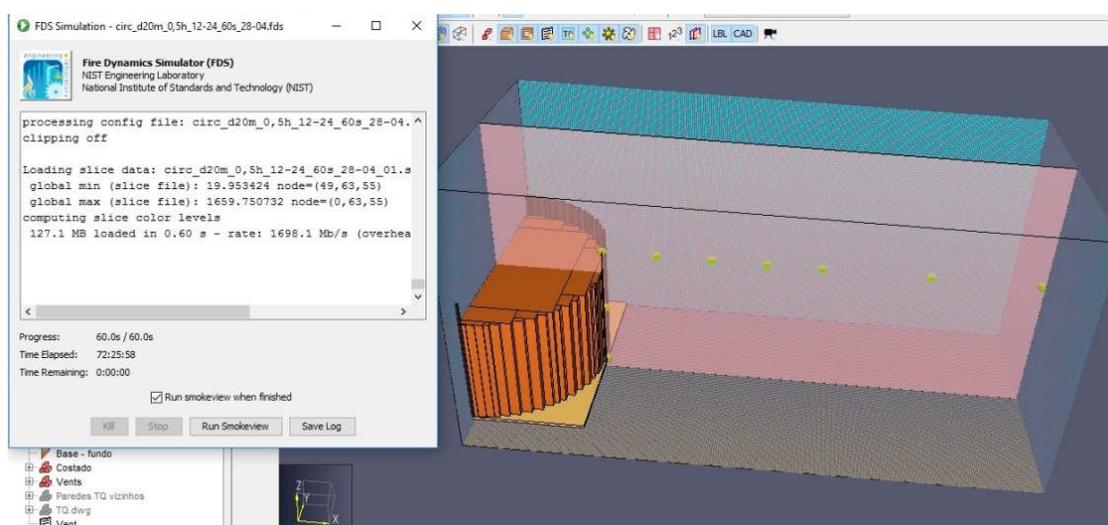
Figura 13 – Primeira tentativa para simulação de incêndio em tanque de 20 metros de diâmetro – tentativa com forma geométrica convencional



(fonte: PYROSIM, 2016)

Para contornar esta situação e permitir que o estudo continuasse sendo realizado com uso do computador pessoal, foi inserido na parte central do tanque um *vent* chamado *mirror*. O *mirror* (espelho) pôde ser empregado porque existe um eixo de simetria entre as superfícies. Nesta situação, as exigências computacionais foram reduzidas e a simulação pode ser realizada. Apresentou tempo aproximado de 73 horas para processamento dos mesmos 60 segundos de incêndio, a figura 14 ilustra os valores de tempo de simulação.

Figura 14 – Recurso utilizado para viabilizar a simulação de incêndio em tanque de 20 metros de diâmetro - *Vent/mirror*



(fonte: PYROSIM, 2016)

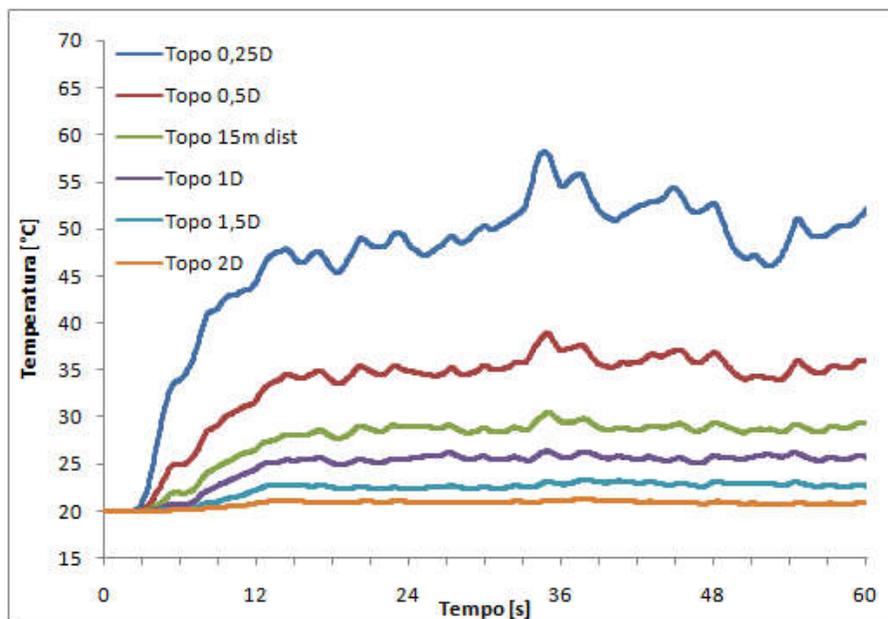
Nota: *Vent* é o recurso do programa PyroSim que permite caracterizar os limites do volume de controle da simulação. O tipo de *vent mirror* é denominado um plano limite onde o programa espelha os dados de volta para o volume de controle. Pode ser empregado em caso de existência de simetria de geometria do cenário.

Este recurso de *vent/mirror* foi testado na simulação de 7,5 metros de diâmetro e apresentaram resultados compatíveis com os realizados na forma convencional sem o seu emprego.

O patamar de temperatura para esta simulação foi atingido em aproximadamente 12 segundos. Os valores de temperatura observados a partir do patamar e na distância de 2D apresentaram os seguintes valores para o tanque de 20 metros de diâmetro: máximo de 21,29°C; média de

20,94°C e desvio padrão de 0,13°C. Os valores de temperaturas obtidos nas distâncias para esta simulação estão expostos na figura 15:

Figura 15 – Temperaturas atingidas nos termopares para a simulação de incêndio do tanque de 20 metros de diâmetro



(fonte: elaborado pelo autor)

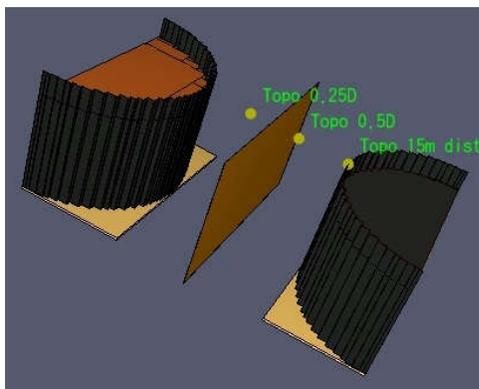
Comparando os valores de temperatura encontrados para estas distâncias no tanque de 7,5 metros de diâmetro com os valores encontrados para a simulação com o tanque de 20 metros de diâmetro, observa-se que as de temperaturas atingem valores menores de patamar.

5.5 DIÂMETRO 20 METROS - INCÊNDIO EM TANQUE INTEGRO COM PAREDE INTERMEDIÁRIA

Nesta simulação foi colocada uma parede intermediária que excedesse em um metro a todas as dimensões do maior tanque. Na figura 16 está ilustrada a disposição dos tanques e da parede intermediária, imagem meramente ilustrativa. Foi considerado, para este caso, que o tanque isolado estivesse posicionado a 15 metros de distância, sendo assim, a parede posicionada em 7,5 metros de distância. Na simulação, a parede foi caracterizada como inerte,

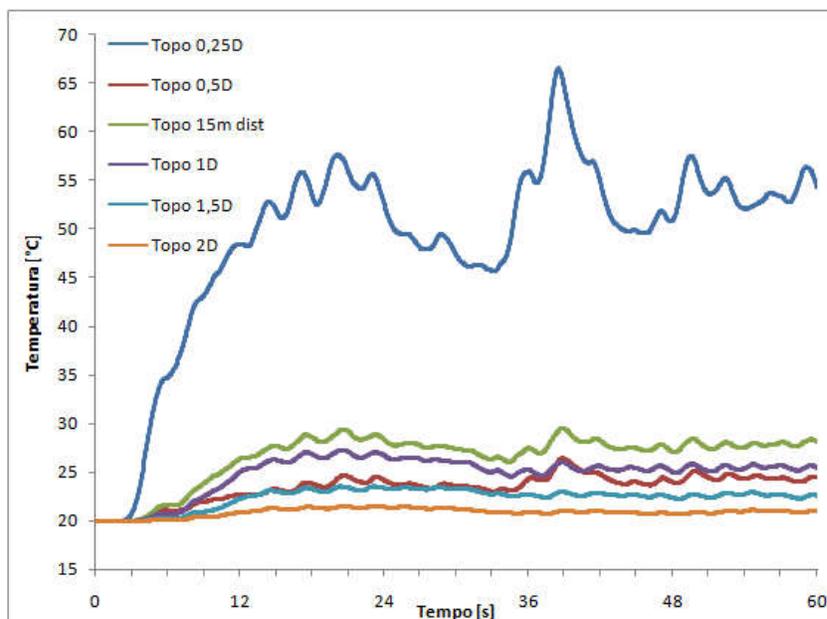
ou seja, sem qualquer transferência de calor pelo material que a compõe. Para a simulação de 60 segundos foram necessárias 78 horas de processamento. Os valores de temperaturas encontrados para este caso estão dispostos na figura 17.

Figura 16 – Imagem ilustrativa da disposição dos tanque e da parede



(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 17 – Temperaturas atingidas nos termopares para a simulação de incêndio do tanque de 20 metros de diâmetro – com parede em 7,5 metros



(fonte: elaborado pelo autor)

Para esta simulação, na distância de 15 metros, distância que se considera os tanques isolados, os valores de temperaturas foram: máximo de 29,52 °C, média de 27,80 °C e desvio padrão de 0,67 °C.

O fato de armazenar um produto acarreta em ter a precaução de que os valores de ponto inicial de ebulição não sejam atingidos pelo líquido, caso o líquido seja aquecido até esta temperatura, a pressão de vapor do líquido se iguala a pressão atmosférica e nesta situação, como o tanque é aberto e está sob pressão atmosférica, os vapores do líquido irão sair do tanque.

Como os vapores de gasolina possuem densidade maior que a do ar, irão se acumular nas mediações, junto ao chão no lado de fora do tanque. A faixa de explosividade da gasolina vai de 1,4 a 7,6% em volume, este valor é facilmente atingido em um vazamento. Portanto, a gasolina estando dentro da concentração considerada ideal, basta que a nuvem de vapor encontre uma fonte de ignição para que ocorra o fenômeno chamado *fireball*, descrito no item 3.4.3 deste trabalho.

Para que se tenha maior segurança nos armazenamentos dos produtos não só em incêndios, em regiões quentes, onde a temperatura ambiente pode atingir estes valores, os tanques deveriam possuir sistemas de arrefecimento para que a volatilização seja evitada.

5.6 DIÂMETRO 20 METROS - ANÁLISE E CONSIDERAÇÕES

A principal diferença entre a comparação do incêndio sem e com a parede é a queda de temperatura que ocorre na distância de 0,5D, localizada a 10 metros de distância (primeiro ponto de medição depois da parede). O quadro 4 compara os valores com e sem parede para o tanque de 20m de diâmetro:

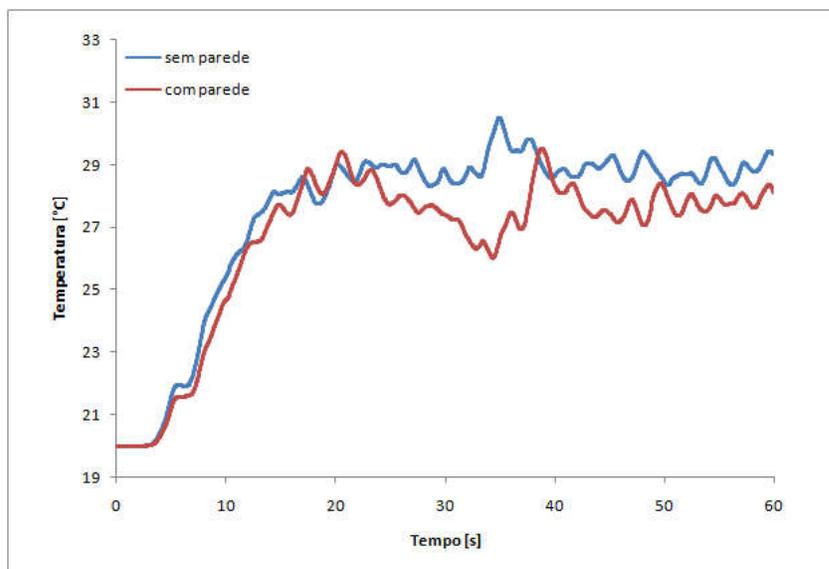
Quadro 4 – Temperaturas atingidas nos termopares para as simulações de incêndio do tanque de 20 metros de diâmetro

Sem parede	10 m = 0,5D	15m	30m = 1,5 D	40m = 2D
Temperatura máxima	38,89 °C	30,50 °C	23,33 °C	21,29 °C
Temperatura média do patamar	35,43°C	28,87 °C	22,75 °C	20,94 °C
Desvio padrão da temperatura do patamar	1,09 °C	0,45 °C	0,25 °C	0,13 °C
Tempo para atingir o patamar	14 segundos	16 segundos	12 segundos	12 segundos
Com parede	10 m = 0,5D	15m	30m = 1,5 D	40m = 2D
Temperatura máxima	26,42 °C	29,52 °C	23,52 °C	21,51 °C
Temperatura média do patamar	24,15°C	27,80 °C	22,86 °C	21,04 °C
Desvio padrão da temperatura do patamar	0,64 °C	0,67 °C	0,33 °C	0,23 °C
Tempo para atingir o patamar	17 segundos	14 segundos	13 segundos	12 segundos

(fonte: elaborado pelo autor)

Com base no quadro 4, é importante salientar que na prática, somente um ponto teve redução significativa de temperatura com a colocação da parede, sendo este ponto o localizado em 0,5D, o primeiro ponto após a parede. Os demais pontos tiveram pequenas alterações, ou seja, com pouca ou nenhuma influência de proteção por parte da parede colocada na posição intermediária entre os tanques. Salienta-se que o ponto de distância 15 metros pertence a um destes pontos sem alteração significativa de temperatura. A figura 18 mostra o comparativo do desenvolvimento da temperatura, na distância de 15 metros para com e sem parede intermediária.

Figura 18 – Comparativo das temperaturas para o tanque de 20 metros de diâmetros com e sem parede intermediária, na distância de 15 metros



(fonte: elaborado pelo autor)

A alternativa de colocar a parede para o caso da distância de 15 metros, onde o tanque passa a ser considerado isolado, não apresentou grande redução nos valores de temperatura, porém isto não significa que a colocação de parede não seja uma alternativa a ser adotada para reduzir os patamares de temperaturas a que está exposto um tanque adjacente em virtude de um incêndio próximo. Os resultados medidos em 0,5D (10 metros) expressam a redução significativa dos valores de temperatura. Portanto, existe uma altura apropriada para que o tanque, considerado isolado, também seja protegido das temperaturas provenientes do tanque em chamas. O estudo de avaliar as diferentes alturas e seu conseqüente efeito na transmissão do calor não fez parte do foco deste trabalho.

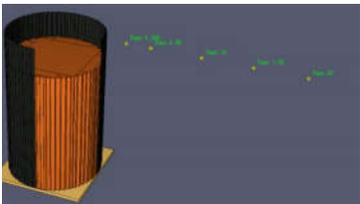
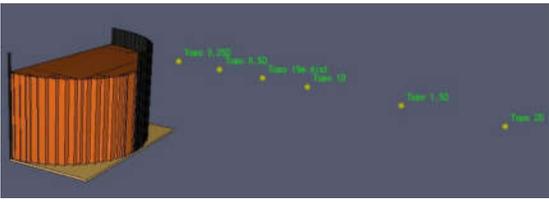
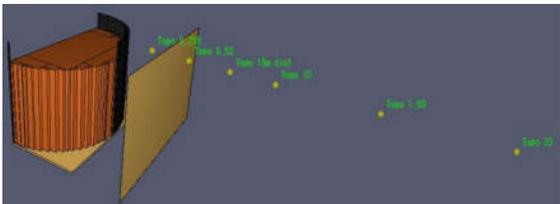
Posteriormente a estas simulações, seria conveniente realizar a simulação para o tanque construído realmente, o qual possui diâmetro de 42 metros. Porém, com a mesma sistemática adotada para o tanque de 20 metros de diâmetro, o computador acusou memória insuficiente com aproximadamente uma hora de simulação, tendo que ser abortada. Mesmo não sendo possível realizar esta simulação, pelo menos não com o computador pessoal, as outras simulações mostraram valores satisfatórios para reflexão da condição de segurança em caso de incêndio em tanques.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS E CONCLUSÕES

6.1 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O quadro 5 mostra as temperaturas atingidas para as quatro simulações realizadas nas distâncias em que a NBR 17505-7 considera o tanque adjacente isolado.

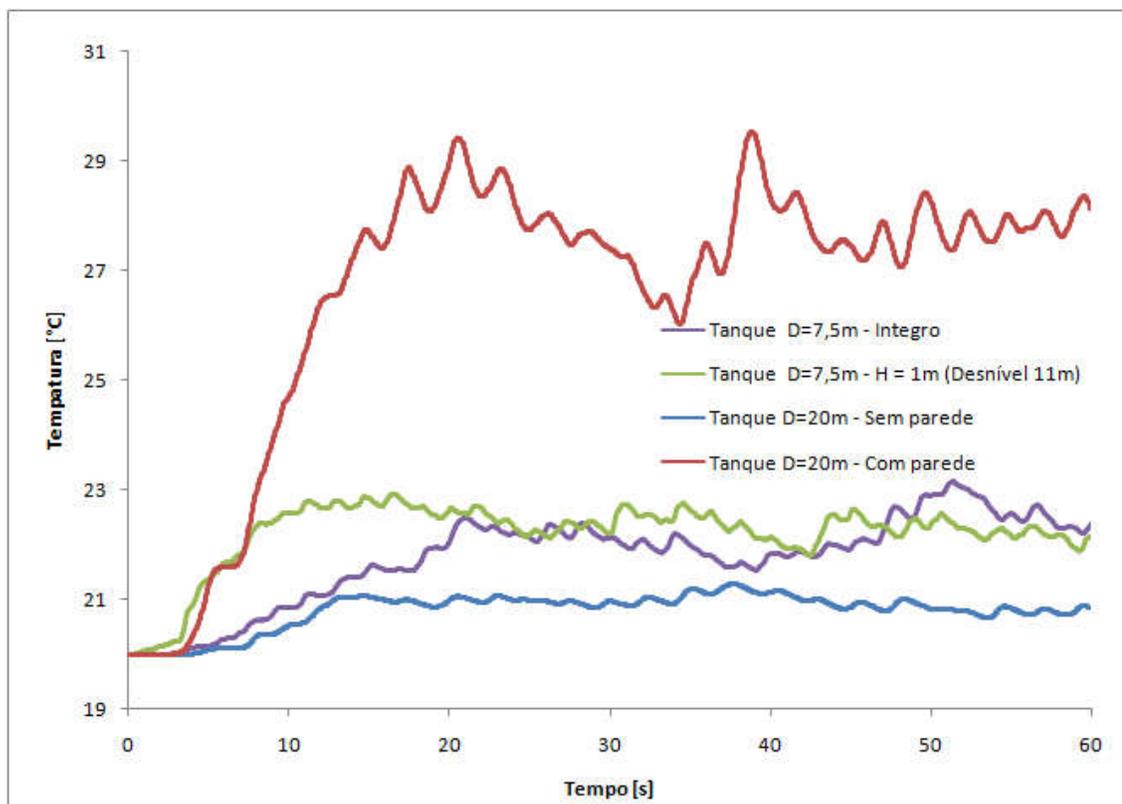
Quadro 5 – Comparativo das temperaturas atingidas para os casos simulados

Ilustração e Distância para considerar Isolado segundo a NBR17505-7		Temperaturas atingidas [°C]	
	2 Diâmetros	Média	22,20
	= 15 metros	Máxima	23,23
	2 Diâmetros	Média	22,26
	= 15 metros	Máxima	22,92
	2 Diâmetros	Média	20,94
	= 40 metros	Máxima	21,29
	2 Diâmetros x (1/3)	Média	27,80
	= 13,3 metros (Adotado Mínimo 15 metros)	Máxima	29,52

(fonte: elaborado pelo autor)

O fato de a norma colocar as distâncias em função do diâmetro do tanque e não apenas inferir um valor fixo é muito pertinente. Pois, de acordo com o aumento de diâmetro, são necessárias distâncias maiores para manter a segurança. Este fato é comprovado através da observação das temperaturas na distância de 15 metros. Na simulação com o tanque de 7,5 metros de diâmetro os deltas de temperatura medidos em virtude do incêndio foram pequenos, por outro lado na simulação com o tanque de 20 metros de diâmetro, os deltas de temperatura foram bem maiores. Desta forma, os tanques maiores apresentam maior transferência de calor e necessitam maiores distâncias para manter a segurança. Um comparativo das evoluções das temperaturas para as distâncias onde a norma considera o tanque isolado pode ser observado na figura 19.

Figura 19 – Evolução das temperaturas atingidas nas distâncias para os tanques isolados



(fonte: elaborado pelo autor)

6.2 CONCLUSÕES

Os valores de temperatura mensurados em 2D para os dois tanques (7,5 metros e 20 metros) atingiram valores pequenos de delta. Considerando a temperatura ambiente de 20°C, os valores atingiram o máximo de 23,23°C, esta temperatura pode ser facilmente atingida devido à amplitude térmica diária. Portanto, a determinação da NBR 17505-7 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2015), que define tanques isolados:

[São] aqueles considerados isolados para fins de proteção contra incêndio, quando distanciarem entre si no mínimo duas vezes o diâmetro do maior tanque vertical ou duas vezes a maior dimensão do tanque horizontal, considerando a maior das duas distâncias, e quando estiverem em bacias de contenção isoladas.

Está de acordo com os valores observados pelo FDS, para condições sem vento e parâmetros constantes. Desta forma, podem ser considerados isolados. Estes tanques não estão sujeitos, de forma significativa, às temperaturas oriundas de um tanque adjacente contendo gasolina em chamas.

Porém, estudos mais aprofundados devem ser feitos quanto à nota que permite a redução a um terço da distância conforme a na NBR 17505-7 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2015):

NOTA: a distância entre tanques calculada pode ser reduzida a um terço, respeitando a distância mínima de 15 m entre tanques, com a interposição de uma parede corta-fogo com resistência mínima ao fogo de 120 min, que ultrapasse em 1 m todas as dimensões do maior tanque.

As temperaturas na distância de 15 metros atingiram valores próximos a 30°C. Conforme a simulação, na distância em que deveria ser considerado o tanque isolado, a parede teve pouca ou quase nenhuma influência na redução de temperatura. Os valores atingidos na parte superior do tanque, para as simulações com e sem parede, foram muito parecidos.

Sendo que a parede não atenuou a temperatura no topo do tanque para o ponto 15 metros, o termo isolado vai de encontro com a primeira afirmação, que recomenda 40 metros para ser considerado o tanque isolado. O agravante neste caso, em que se armazena gasolina, é que a temperatura está próxima da temperatura inicial de ebulição (PIE) para algumas especificações de gasolina. Nesta circunstância, a volatilização no tanque adjacente iria ocorrer e exposto à fonte de ignição, provavelmente iria ocorrer o fenômeno *fireball* que

coloca em risco a segurança dos usuários e pode vir a favorecer o início de novos focos de incêndio.

Embora o emprego de paredes não seja adotado com grande frequência, um estudo mais aprofundado deveria ser realizado para viabilizar esta flexibilidade de reduzir as distâncias entre os tanques adjacentes. No estudo se observa valores na ordem de 30°C chegando à parte superior do tanque mesmo com parede intermediária, isto em simulações considerando 20°C de temperatura ambiente e sem vento. Em climas mais quentes ou cenários com vento na direção de tanques adjacentes, este cenário seria certamente agravado, pois as temperaturas poderiam atingir valores maiores.

O FDS e o PyroSim são programas consolidados na construção civil podendo ser largamente empregado em edificações e construções, com o estudo realizado neste trabalho se observa que, os programas mostraram-se também viáveis para aplicação de simulações em outras demandas existentes em indústrias. O emprego dos programas demonstrou desempenho satisfatório para as simulações realizadas considerando uma avaliação de cenário petroquímico, sem a necessidade de computador de grande porte, pois o estudo foi desenvolvido com uso de computador pessoal de caráter doméstico.

REFERÊNCIAS

APÓS limpeza do prédio da boate Kiss, Fepam apresenta relatório. **G1**: Rio Grande do Sul, 27 mar. 2015. Disponível em: <<http://g1.globo.com/rs/rio-grande-do-sul/noticia/2015/03/apos-limpeza-do-predio-da-boate-kiss-fepam-apresenta-relatorio.html>>. Acesso em: 04abr. 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7821**: tanques soldados para armazenamento de petróleo e derivados. Rio de Janeiro, 1983.

_____. **NBR 17505-1**: armazenamento de líquidos inflamáveis e combustíveis. Parte 1: Disposições Gerais. Rio de Janeiro, 2013.

_____. **NBR 17505-7**: armazenamento de líquidos inflamáveis e combustíveis. Parte 7: proteção contra incêndio para parques de armazenamento com tanques estacionários. Rio de Janeiro, 2015.

BRASIL. Ministério do Trabalho e Emprego. **Portaria MTE n.º 594**, de 28 de abril de 2014. NR-13: caldeiras, vasos de pressão e tubulação. Brasília, DF, 2014. Disponível em: <<http://www.mtps.gov.br/images/Documentos/SST/NR/NR13.pdf>> Acesso em: 27 maio 2016.

CARLO, U. D. A Segurança Contra Incêndio no Brasil: dores do crescimento. In: SEITO, A. I.; GILL, A. A.; PANNONI, F. D.; ONO, R.; SILVA, S. B.; CARLO, U. D.; SILVA, V. P (Coord.). **A Segurança Contra Incêndio no Brasil**. São Paulo: Projeto, 2008. p. 9-17. Disponível em: <<http://www.lmc.ep.usp.br/people/Valdir/SCI.pdf>>. Acesso em: 05 abr. 2016.

FDS-SMV, **version 6.3.2: Fire Dynamics Simulator and Smokeview**. [S.l.]: National Institute of Standards and Technology (NIST), 2016.

LIMA, R. C. A. de. **Investigação do Comportamento de Concretos em Temperaturas Elevadas**. 2005. 241 f. Tese (Doutorado em Engenharia) – Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2005.

MAZZONI, F. **Simulação Computacional de Incêndios**: aplicação no caso do condomínio edifício Cacique em Porto Alegre. 2010. 66 f. Trabalho de Diplomação (Graduação em Engenharia Civil) – Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2010.

MCGRATTAN, K.B.; BAUM, H. R.; HAMINS, A. **Thermal Radiation from Large Pool Fires**, Gaithersburg: NIST, 2000. (NISTIR 6546 Tecnology Report). Disponível em: <http://www.nist.gov/customcf/get_pdf.cfm?pub_id=909967>. Acesso em: 27 maio 2016.

MCGRATTAN, K.; MCDERMOTT, R.; WEINSCHENK, C.; OVERHOLT, K.; HOSTIKKA, S.; FLOYD, J. **Fire Dynamics Simulator User's Guide (Sixth Edition)** – NIST Special Publication 1019. Gaithersburg, Maryland, USA, 2013. Disponível em: <http://www.thunderheadeng.com/wp-content/uploads/2013/08/FDS_User_Guide.pdf>. Acesso em 29 maio 2016.

PYROSIM, **Revision 2015.4.1214: a model construction tool for Fire Dynamics Simulator (FDS)**. [S.l.]: Thunderhead Engineering Consultants, Inc., 2016. Disponível em: <<http://www.thunderheadeng.com/php/trial.php?product=pyrosim>>. Acesso em: 15 mar. 2016.

RIO GRANDE DO SUL. **Decreto Lei 50.803**, de 10 de setembro de 2014. Regulamenta a Lei Complementar n. 14.376, de 26 de dezembro de 2013, e alterações, que estabelece normas sobre segurança, prevenção e proteção contra incêndio nas edificações e áreas de risco de incêndio. Porto Alegre, 2014. Disponível em: <http://www.sinduscon-rs.com.br/wp-content/uploads/2014/09/upload-2014091118251451803__regulamenta_lc_14.376_13_prevencao_contra_incendio.pdf>. Acesso em: 05 abr.2016.

RUSCHEL, F. **Avaliação da Utilização de Ferramentas de Simulação Computacional para Reconstituição de Incêndio em Edificações de Concreto Armado**: aplicação ao caso Shopping Total em Porto Alegre. 2011. 131 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2011.

RUZZARIN, N. **Determinação dos Efeitos Térmicos Causados por Incêndio em um Tanque de Armazenamento de líquido Inflamável de Grandes Proporções e suas Relações com o Plano de Atendimento de Emergência (PAE)**. 2011. 63 f. Monografia (Especialização em Engenharia de Segurança do Trabalho) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2011.

SANTIAGO, G. F. **Efeitos de Explosão de Nuvem de Vapor Inflamável**. 2003. 79 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2003.

SEITO, A. I. Fundamentos de Fogo e Incêndio. In: SEITO, A. I.; GILL, A. A.; PANNONI, F. D.; ONO, R.; SILVA, S. B.; CARLO, U. D.; SILVA, V. P. **A Segurança Contra Incêndio no Brasil**. São Paulo: Projeto, 2008. p. 35-54. Disponível em: <<http://www.lmc.ep.usp.br/people/Valdir/SCI.pdf>>. Acesso em: 15 jun. 2016.

SETE toneladas de peixes mortos são retiradas de rio durante incêndio. **G1**: Santos e região, 08 abr. 2015. Disponível em: <<http://g1.globo.com/sp/santos-regiao/noticia/2015/04/sete-toneladas-de-peixes-mortos-sao-retiradas-de-rio-durante-incendio.html>>. Acesso em: 27 maio 2016.

SOUZA JÚNIOR, V. de. **Simulação Computacional do Comportamento de Estruturas de Aço Sob Incêndio**. 2004. 126 f. Tese (Doutorado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2004.